



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

“PLANIFICACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO SOBRE REDES EN FRECUENCIA
ÚNICA DE TELEVISIÓN DIGITAL ATSC”

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

PRESENTA:
RICARDO ABRAHAM ZAVALA VEGA

TUTOR:
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F., JUNIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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. Gómez Castellanos Javier

Secretario: Dr. Rangel Licea Víctor

Vocal: Dr. Matías Maruri José María

1er. Suplente: Dr. Landeros Ayala Salvador

2do. Suplente: Dr. García Garduño Víctor

Lugar donde se realizó la tesis:

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

TUTOR DE TESIS

Dr. José María Matías Maruri

FIRMA

*“La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la
ingeniería la que cambia el mundo.”* Issac Asimov.

Agradecimientos

Al ser la primera vez que hago un trabajo de este tipo, el cual representa el fin y el comienzo de una nueva etapa de mi vida, quiero expresar mi gratitud a todos quienes de una u otra manera me han acompañado en esta labor.

Gracias a Dios por todas las bendiciones recibidas.

Gracias a mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y en especial mi más grande agradecimiento a mis padres y hermanas por sus enseñanzas y consejos que me han motivado para seguir mejorando en mi formación profesional.

Agradecer sinceramente a mi asesor de tesis, Dr. José María Matías Maruri, por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de este trabajo, por la confianza y paciencia para aclarar mis dudas permitiéndome aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto, capaz de ganarse mi lealtad y admiración por todo el apoyo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado esta tesis.

A mi gran amigo Jaime. Hoy, lo que parecía lejano está tan próximo. En lo académico, gracias por los nuevos conocimientos. En lo personal, agradezco las experiencias, los sueños compartidos, los buenos momentos que hemos pasado y, porque apesar de que comenzarás una nueva etapa profesional confío en que no tendremos distancias. Gracias, Nm. 6:24-26.

A Mario, Flor, Andrés, Jeni, Bere, Viri, a los chic@s de Licenciatura en Telecomunicaciones que estuvieron y aún están presentes en el desarrollo del proyecto REFUTV, mucho de lo que aparece en la presente lo conversé con ustedes. Gracias por preguntar cómo iba el desarrollo de mi tesis.

A todos los profesores de maestría y licenciatura que contribuyeron en mi formación académica y profesional; que día a día dan lo mejor de sí, que nunca desistieron en enseñarme y afianzaron mi formación como estudiante de posgrado.

A los miembros de mi jurado de examen de grado les agradezco profundamente su tiempo y dedicación por sus observaciones al manuscrito final y ser parte del jurado evaluador.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) le agradezco la beca recibida durante la maestría. También, la presente tesis fue desarrollada dentro del proyecto REFUTV; un proyecto de colaboración internacional con España, CONACYT-CDTI que está apoyado por el fondo institucional del CONACYT.

Y no podía faltar el agradecimiento a la UNAM y a la Facultad de Ingeniería que al igual que yo, muchos decidieron elegirla y que con mucho orgullo, pasión y respeto representamos y llevamos en el corazón.

Resumen

En el año 2004 el Gobierno Mexicano adoptó la norma americana ATSC (*Advanced Television Systems Committee*) como su estándar para la radiodifusión terrestre de televisión digital. Desde ese año nuestro país ha iniciado la migración de los sistemas de televisión analógicos al sistema digital ATSC. Se tiene previsto que la transición o el comúnmente llamado apagón analógico se complete para finales de 2015.

ATSC es un estándar que utiliza un tipo de modulación basado en amplitud y de una sola portadora, lo que lo hace ideal cuando éste se implementa sobre redes de un sólo transmisor principal. A diferencia de los otros estándares que utilizan una modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y que se pueden implementar en Redes de Frecuencia Única o SFN¹ (*DVB-T: Digital Video Broadcasting - Terrestrial, ISDB-T: Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial y DMB-T: Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial*), se pensaría que el sistema ATSC es imposible implementarse bajo la tecnología de las redes SFN. En 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 cuando se implementan ciertos esquemas en los sistemas transmisores de la red y sobre todo, gracias a los receptores por la innovadora tecnología que se ha implementado en el diseño de los ecualizadores.

En estos momentos tan importantes del despliegue de la televisión digital (*DTV*) en México, es conveniente conocer que parámetros se deben implementar en los transmisores ATSC para que puedan operar en Redes de Frecuencia Única. Las redes SFN permitirían mejorar considerablemente la gestión del espectro radioeléctrico en nuestro país, sobre todo liberar ciertas bandas de televisión que pueden ser asignadas para otros servicios de telecomunicaciones.

El objetivo principal de esta tesis es la planificación de una campaña de pruebas de campo en la Ciudad de México con una Red en Frecuencia Única implementada bajo el estándar de televisión digital ATSC. Existen pocos casos documentados sobre la planificación y despliegue de redes SFN con ATSC, por lo que para esta planificación de pruebas de campo se han determinado las condiciones y características de cobertura requeridas para el despliegue de una red SFN con ATSC compuesta por dos transmisores, se han definido los escenarios de transmisión en que operaría la red y el modo de recepción, se ha propuesto la metodología de las mediciones en campo y el equipamiento de medidas, por último, se ha definido el número total de sitios de medición, su distribución dentro de la zona de cobertura de la red y el tiempo necesario para llevar a cabo toda la campaña de pruebas.

Como resultado de esta tesis se ha podido definir los parámetros de operación que se deben implementar en los dos transmisores ATSC que forman la red SFN y que permiten realizar amplios estudios para evaluar los parámetros de desempeño de receptores ATSC que actualmente son comerciales en nuestro país y, que la razón principal de probar los receptores radica en que es la implementación de su ecualizador lo que permite que estos puedan o no recibir correctamente en un ambiente SFN.

¹De las siglas en inglés: *Single Frequency Network*

Índice general

Resumen	I
Lista de términos	IX
1. Introducción	1
1.1. Tecnologías de TV Digital y Redes en Frecuencia Única	1
1.2. Proyecto REFUTV: Desarrollo de redes en frecuencia única para ATSC en México	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos de la tesis	3
1.5. Organización de la tesis	4
2. Estado del arte	7
2.1. Sistemas de Televisión Digital Terrestre	7
2.1.1. DVB-T (<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>)	8
2.1.1.1. DVB-T2	8
2.1.2. ISDB-T (<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>)	9
2.1.2.1. ISDB-Tb o ISDB-T International	10
2.1.3. DMB-T o DTMB (<i>Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial</i>)	10
2.2. ATSC: Advanced Television Systems Committee	10
2.2.1. Principales características técnicas	11
2.3. Redes en Frecuencia Única: SFN	12
2.3.1. Principios de una red SFN	13
2.4. Transmisión Distribuida para ATSC	14
3. Pruebas de campo realizadas en el mundo con el estándar ATSC	17
3.1. Pruebas y parámetros de medición con ATSC	17
3.1.1. Pruebas de ATSC en Taiwán	17
3.1.2. Pruebas de ATSC y DVB-T en E.E.U.U.	18
3.1.3. Pruebas de ATSC y DVB-T en Taiwán	19
3.2. Configuraciones implementadas en pruebas de campo para redes SFN con el estándar ATSC	20
3.2.1. Transmisores Distribuidos	20
3.2.2. Repetidores Digitales en Canal	21
3.2.3. Repetidores Distribuidos	22
3.3. Principales conclusiones sobre las pruebas de campo realizadas bajo las configuraciones de redes SFN ATSC	23

4. Objetivos, requerimientos y definición de la red SFN ATSC para las pruebas de campo	25
4.1. Objetivos de las pruebas de campo: Estudio del desempeño de ATSC sobre una red SFN	25
4.2. Características del desempeño de los receptores ATSC	26
4.3. Condiciones de cobertura y características requeridas para el despliegue de la red SFN	27
4.4. Ubicación de la red SFN ATSC	28
4.5. Transmisores Distribuidos: configuración de la red SFN ATSC	31
4.6. Predicción de cobertura y campo eléctrico de la red SFN ATSC	31
4.6.1. Umbral de campo eléctrico para ATSC en México y parámetros de estimación de campo	32
4.6.2. Escenarios de transmisión y evaluación de cobertura	33
4.6.2.1. Modo Transmisor Único	35
4.6.2.2. Modo SFN: Sincronismo en la transmisión de señales	38
4.7. Resumen de la definición de parámetros de la red de transmisión experimental	38
5. Metodología para la medición y sistema de medidas en campo	41
5.1. Descripción general de la metodología	41
5.2. Modo de recepción	41
5.2.1. Mediciones estáticas en exteriores e interiores	42
5.3. Parámetros de medida	42
5.3.1. TOV (Threshold Of Visibility) o Umbral de visibilidad	42
5.3.2. MER	43
5.3.3. Campo eléctrico	43
5.3.3.1. Conversión del valor de campo eléctrico recibido a su equivalente en potencia .	43
5.3.4. Respuesta impulsional del canal	45
5.4. Caracterización del ruido	45
5.5. Descripción general del sistema de medidas	45
5.5.1. Adquisición de la señal de RF	46
5.5.2. Equipamiento de medidas	47
5.5.2.1. Parámetros de adquisición para una muestra en RF de la señal ATSC	48
5.5.3. Control y Alimentación Eléctrica	49
6. Planteamiento de las medidas en campo	51
6.1. Definición de los sitios de medición	51
6.2. Tiempo estimado de medición	58
6.2.1. Requerimientos para antes y después del traslado al sitio de medición	59
6.2.2. Sitio de medición	60
6.2.3. Número estimado de mediciones y duración aproximada de la campaña de pruebas	60
6.2.3.1. Fases de las pruebas de campo	61
6.3. Distribución de las medidas dentro de la red de transmisión	61
6.4. Consideraciones adicionales de las medidas en campo	64
7. Conclusiones	67
Bibliografía	69

Índice de figuras

2.1. Diagrama de bloques del sistema ATSC.	11
4.1. Recomendaciones mínimas del ecualizador adaptativo para un receptor ATSC según ATSC A/74.	27
4.2. Ubicación de los transmisores ATSC en la Ciudad de México.	30
4.3. Visión directa de los transmisores Cerro del Chiquihuite y TV UNAM en la Ciudad de México.	32
4.4. Versión del programa Radio Mobile y definición de parámetros para estimación del campo eléctrico.	33
4.5. Perfil del terreno entre los trasmisores sobre la Ciudad de México.	34
4.6. Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 1.	36
4.7. Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 2.	37
5.1. Diagrama del equipamiento de medidas a utilizar en las pruebas de campo.	46
6.1. Relación tiempo de retardo y amplitud de ecos para buena recepción en receptores ATSC según ATSC A/74.	52
6.2. Espectro de la señal ATSC (canal 18).	53
6.3. Desvanecimientos en el espectro ATSC (canal 18) cuando el retardo entre dos señales del mismo nivel de potencia es de $0 \mu s$	54
6.4. Desvanecimientos en el espectro ATSC (canal 18) cuando el retardo entre dos señales del mismo nivel de potencia es de $1 \mu s$	54
6.5. Desvanecimientos en el espectro ATSC (canal 18) cuando el retardo entre dos señales del mismo nivel de potencia es de $3 \mu s$	55
6.6. Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 2 con los transmisores sincronizados.	56
6.7. Nivel de potencia y tiempos de retardo entre las señales para la ruta que une a los dos transmisores (desde el transmisor TV UNAM al transmisor Cerro del Chiquihuite) y cuando la transmisión es sincronizada.	57
6.8. Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 2 cuando al transmisor TV UNAM se le añade un retardo de $33.6 \mu s$ con respecto del otro transmisor.	58
6.9. Nivel de potencia y tiempos de retardo entre las señales para la ruta que une a los dos transmisores (desde el transmisor TV UNAM al transmisor Cerro del Chiquihuite) y cuando al transmisor TV UNAM se le añade un retardo de $33.6 \mu s$ con respecto del otro.	59
6.10. Ubicación de los puntos de medición estáticos para exteriores (morado) e interiores (rojo), los transmisores están sincronizados en la transmisión de su señal.	63
6.11. Ubicación de 4 sitios de medición que forman el conjunto de medición E33 para medidas en exteriores, el emplazamiento se encuentra dentro de la cobertura de la red SFN y se ubica en las inmediaciones del aeropuerto de la Ciudad de México	65

Índice de cuadros

2.1. Ventajas y desventajas de las configuraciones de Transmisión Distribuida.	16
4.1. Detalles de ubicación de los transmisores ATSC.	30
4.2. Configuración de los escenarios propuestos para el despliegue de la red SFN ATSC en la planificación de las pruebas de campo.	34
6.1. Características del eco y de la cobertura para los puntos de medición en exteriores.	62
6.2. Características del eco en la cobertura de la red SFN para los puntos de medición en interiores.	64

Lista de términos

ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BCH	<i>Bose-Chaudhuri-Hocquengham</i>
CDTI	<i>Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CONACYT	<i>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología</i>
CRC	<i>Communications Research Centre</i>
DOCRs	<i>Digital On-Channel Repeaters</i>
DTMB ó DMB-T	<i>Digital Terrestrial Multimedia Broadcast</i>
DTV	<i>Digital Television</i>
DTxN	<i>Distributed Networks</i>
DTxRs	<i>Distributed Translators</i>
DTxTs	<i>Distributed Transmitters</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
IFT	<i>Instituto Federal de Telecomunicaciones</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LDCP	<i>Low Density Parity Check</i>
MER	<i>Modulation Error Rate</i>
MFN	<i>Multiple Frequency Network</i>
MIP	<i>Megaframe Initialization Packet</i>
MPEG-2	<i>Moving Picture Experts Group 2</i>
msns	<i>metros sobre el nivel del suelo</i>
NTSC	<i>National Television System Committee</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PIRE	<i>Potencia Isotrópica Radiada Equivalente</i>

REFUTV	<i>Desarrollo de redes en frecuencia única para televisión digital ATSC</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio, S/N</i>
TOV	<i>Threshold Of Visibility, Umbral de visibilidad</i>
TV	<i>Television, Televisión</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VSB	<i>Vestigial SideBand</i>

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo muestra el contexto de desarrollo de la presente tesis. Primero se presentan los sistemas de televisión digital terrestre existentes; para ATSC se presenta el estado que actualmente tiene en nuestro país y, se introduce en la tecnología de las Redes en Frecuencia Única que se han implementado con estos estándares de televisión digital. Se habla del proyecto REFUTV, proyecto dentro del cual se ha desarrollado ésta tesis. Después se justifican los motivos que sustentan la tesis y se exponen los objetivos que se desean lograr con su realización. Finalmente, se presenta la organización estructural de la tesis.

1.1. Tecnologías de TV Digital y Redes en Frecuencia Única

La televisión digital o DTV es una propuesta que permite transmitir una señal de televisión en formato digital, esta existe en forma terrestre, satelital y por cable, a lo largo de este documento sólo se hará referencia a la televisión digital terrestre.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en el año de 1997 publicó la recomendación UIT-R BT.1306-6 (12-2011)¹ [1], donde recomienda que las administraciones que deseen introducir la radiodifusión terrestre de televisión digital deberán de utilizar uno de los siguientes sistemas: Sistema A, B, C o D, que respectivamente corresponden a los estándares: ATSC, DVB-T, ISDB-T y la Norma China. Esta recomendación sólo es válida para la bandas métricas y decamétricas (bandas VHF y UHF) y en ella se establece que la elección deberá basarse en condiciones específicas tales como los recursos del espectro, políticas del país, requisitos de cobertura, estructura de la red existente, condiciones de recepción, tipo de servicio requerido y costos para los consumidores y radiodifusores.

En la década de los 90's se desarrolló el proyecto DVB (*Digital Video Broadcasting*), esta organización se dió a la tarea de investigar y analizar estándares para todas las áreas de aplicación de la televisión digital terrestre en Europa y dió como origen al estándar DVB-T. El sistema ATSC (*Advanced Television System Committee*) se desarrolló en Estados Unidos de América y se aprobó en 1996. El tercer sistema es el ISDB - T (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*), este fue desarrollado en Japón y es muy parecido al estándar europeo. Por otro lado, el gobierno de China aprobó su propio estándar en 2007: el DMB-T o DTMB (*Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial*). El panorama general de los cuatro sistemas de televisión digital terrestre que la ITU recomendó [1], es que estos sistemas ya se adoptaron y están operativos en varios países, en algunos otros se están llevando a cabo pruebas de campo con algunas modificaciones a los sistemas: algunos ya son la segunda generación (DVB-T2) y otros aún se encuentran en desarrollo de sus próximas generaciones

¹La referencia corresponde con la versión actual.

para permitir la operación eficiente en Redes en Frecuencia Única y mejorar los servicios móviles de DTV, tal como es el caso del estándar ATSC versión 3.0.

En julio de 2004 el Gobierno Mexicano anunció la adopción del estándar ATSC para la transmisión de televisión digital terrestre y estableció la Política para la transmisión digital de DTV en México [2]. Algunos de los sistemas de DTV operativos en nuestro país al igual que la televisión analógica, operan en Redes en Frecuencia Múltiple (MFN, *Multiple Frequency Network*): estas redes, utilizan para la misma programación canales de frecuencia distintos para ampliar el área de servicio y así evitar interferencias. Otros sistemas de DTV operan con transmisores complementarios de baja potencia utilizando la misma frecuencia que el transmisor principal (redes SFN de baja potencia); sin embargo, algunos de estos sistemas tienen el inconveniente de que su funcionamiento no es el esperado.

En una Red en Frecuencia Única, la cobertura de una área determinada puede ser proporcionada por cierto número de transmisores transmitiendo la misma señal digital en el mismo canal de frecuencia y a un tiempo sincronizado y, en donde las contribuciones de las señales en cierto punto de recepción no sólo no interfieren, si no que en determinadas circunstancias pueden mejorar la recepción de la señal. Por lo tanto, es obvio que las Redes en Frecuencia Única mejoran considerablemente la gestión del espectro radioeléctrico. Para los estándares de DTV, ya existen Redes en Frecuencia Única pero sólo para aquellos que utilizan una modulación basada en multiportadora, tal es el caso de DVB-T/T2, ISDB-T e ISDB-Tb. Para el caso de ATSC, no hay muchos casos documentados sobre el despliegue de éstas redes, sin embargo, por el tipo de modulación que lo caracteriza según resultados de pruebas realizadas en los últimos años, se indica que puede ser implementado bajo ciertos esquemas de los sistemas transmisores y al diseño mismo de los receptores que logran permitir su operación en Redes en Frecuencia Única [3, 4]².

1.2. Proyecto REFUTV: Desarrollo de redes en frecuencia única para ATSC en México

El proyecto **Desarrollo de redes en frecuencia única para televisión digital ATSC** cuyo acrónimo es **REFUTV**, es un proyecto de colaboración internacional con España, CONACYT - CDTI que está apoyado por el fondo institucional del CONACYT. Dentro del proyecto se cuenta con la participación de tres identidades: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), EGATEL S.L y Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V. (TELBOR). Los objetivos generales del proyecto son dos. Primero, el desarrollo de dos equipos para poder implementar redes SFN con el estándar ATSC: moduladores SFN y equipo MIP Inserter. El segundo, es la realización de un estudio e informe técnico que detalle la viabilidad de implementar la tecnología SFN con ATSC en México, con la idea de que esta tecnología pueda ser normativizada por las instituciones reguladoras, como el IFT (*Instituto Federal de Telecomunicaciones*).

En este segundo objetivo se realizarán dos pruebas, una de laboratorio y otra de campo. En las pruebas de laboratorio, se transmitirá en baja potencia con un equipo que genere señal ATSC simulando la recepción en una red SFN, y se recibirá en varios receptores comerciales y en un receptor profesional de medida. Los resultados servirán para definir parámetros de funcionamiento de la red SFN y para definir aspectos de las pruebas de campo. Las pruebas de campo se realizarán utilizando la infraestructura de un socio radiodifusor, los prototipos del MIP Inserter y los moduladores SFN para ATSC. Las pruebas de campo se espera que confirmen la viabilidad de implementar redes SFN con ATSC y que demuestren que su impacto en forma de

²Las referencias de los documentos corresponden a las versiones actuales

interferencias o de problemas en la recepción de los equipos actuales sea mínimo o inexistente. Finalmente, este estudio permitirá que el IFT tenga resultados realizados en el país y pueda ayudarle a fijar una postura sobre este tipo de redes³. En resumen, los principales objetivos del proyecto REFUTV son los siguientes:

1. Desarrollo de dos prototipos de equipo: modulador SFN y MIP inserter.
2. Estudio e informe técnico sobre la viabilidad de implementar la tecnología SFN con el estándar ATSC en México.

Del cumplimiento del primer objetivo se responsabilizarán EGATEL S.L y TELBOR S.A. de C.V., el objetivo restante estará bajo la responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual tiene entre sus propósitos primordiales estar al servicio del país y de la humanidad, de organizar y realizar investigaciones principalmente acerca de las condiciones y problemáticas nacionales. La presente tesis, tal como su nombre hace mención, es una planificación para pruebas de campo sobre Redes en Frecuencia Única para televisión digital ATSC.

1.3. Justificación

Hoy en día hay pocos estudios y casos documentados en el mundo de redes SFN operando con el estándar ATSC. Se han propuesto configuraciones a implementar en los transmisores ATSC para que pueden trabajar en una Red en Frecuencia Única, sin embargo, el desempeño y definición de los parámetros de funcionamiento de una red SFN también se basan en el desempeño de la tecnología con la que esta diseñado cada receptor que se encuentra operando dentro de la red. Actualmente para el caso del estándar ATSC, la tecnología de transmisión SFN puede que haya mejorado su desempeño, no por que se haya cambiado algo en el transmisor sino porque han evolucionado los receptores [5].

Nuestro país ha iniciado la migración de los sistemas de televisión analógicos al sistema digital ATSC que adoptó en 2004 [2]. El comúnmente llamado apagón analógico está definido para finales de 2015 [6]. En estos momentos tan importantes del despliegue de la DTV en México, es conveniente conocer qué parámetros se deben de implementar en los transmisores ATSC para que puedan operar en Redes en Frecuencia Única.

El objetivo de esta tesis es planificar una campaña de pruebas de campo cuyo objetivo principal es obtener parámetros que permitan cuantificar y cualificar el desempeño del estándar ATSC operando bajo Redes en Frecuencia Única utilizando en recepción equipos receptores ATSC comerciales, ya que estos equipos permitirán definir algunos de los parámetros óptimos de operación de éstas redes.

1.4. Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis consiste en planificar una campaña de pruebas de campo en la Ciudad de México con una Red en Frecuencia Única implementada con el estándar de televisión digital ATSC. Los objetivos que se derivan son el estudio de la recepción de la señal en receptores ATSC que actualmente son comerciales en nuestro país y que estos tecnológicamente delimitan los parámetros de funcionamiento de estas redes, por lo tanto, la planificación involucra más fines específicos. Los objetivos particulares de esta tesis son:

- Determinar las condiciones de cobertura requeridas para realizar la campaña de pruebas.

³En el acuerdo del 4 de mayo de 2012 sobre la transición de la televisión digital terrestre en México, se indica que el uso óptimo del espectro es una de las políticas prioritarias en dicha transición de la DTV.

- Definir la red SFN ATSC experimental y determinar (con base a las condiciones topográficas de los emplazamientos de transmisión) las potencias de transmisión requeridas para obtener las condiciones de cobertura que permitan la realización del estudio.
- Definir los escenarios de transmisión y de recepción.
- Proponer la metodología de medición en campo para estudiar el desempeño de los receptores ATSC en una Red en Frecuencia Única, entre ellos: el nivel de campo eléctrico y la respuesta impulsional del canal de propagación.
- Proponer el equipamiento de medidas, el número de sitios de medición, la distribución de estos sitios sobre la cobertura de la red y, estimar el tiempo requerido para realizar satisfactoriamente las pruebas de campo.

1.5. Organización de la tesis

El primer paso de la planificación es precisar los objetivos de la campaña de pruebas de campo, previo de una revisión de los resultados de algunas pruebas de campo hechas con ATSC y de las configuraciones que se proponen para que el estándar ATSC funcione sobre Redes en Frecuencia Única.

Con base a la infraestructura con la que cuenta el socio radiodifusor con el cual se llevarán a cabo las pruebas de campo, se establecen algunas características de la red de transmisión con el propósito de que esta planificación esté sustentada en bases realistas. Se plantean las condiciones y características de cobertura que se buscan tenga la red SFN para la realización de las medidas y se realizan predicciones de campo eléctrico con el software libre Radio Mobile *versión 11.5.8* para evaluar dos diferentes escenarios de transmisión que ayudarán a determinar los requerimientos de potencia de los transmisores a utilizar en la campaña de pruebas.

Finalmente, se define la metodología para la medición en campo de la campaña de pruebas estableciéndose condiciones de transmisión y de recepción en las que se medirá la señal ATSC que provenga de la Red en Frecuencia Única para cumplir con los objetivos de la planificación de las pruebas. Se define el equipamiento de medidas, los entornos y sitios de medición, así como la estimación del tiempo requerido para la realización de las pruebas de campo.

Además de este capítulo (Introducción), esta tesis comprende otros ocho capítulos. El capítulo 2 muestra el estado del arte de los principales estándares de DTV en especial de ATSC y de los aspectos principales de las Redes en Frecuencia Única y resume la adición de la tecnología de Transmisión Distribuida al estándar ATSC para que pueda operar bajo la tecnología de redes SFN. El capítulo 3 recopila pruebas de campo realizadas en el mundo con ATSC y sus principales parámetros de medición, también este capítulo recopila resultados de la evaluación de la tecnología de Redes en Frecuencia Única mediante diversas pruebas de campo con ATSC.

El capítulo 4 engloba los objetivos del estudio del desempeño del estándar ATSC sobre redes SFN que dieron origen y que se pretenden alcanzar con la planificación de las pruebas de campo, se introduce el término **SFN ATSC** para referirse a una red SFN implementada bajo el estándar terrestre de DTV ATSC. Con base a los objetivos de las pruebas de campo se establecen las condiciones y características de cobertura requeridas para definir la red SFN ATSC experimental, también se definen dos posibles escenarios de transmisión de la red para evaluar cuál de ellos es el más adecuado para el despliegue de la red, se realiza la predicción de cobertura para cada uno de los escenarios con la ayuda del software Radio Mobile *v.11.5.8*, la predicción de cobertura sigue la recomendación de los umbrales de campo y las condiciones estadísticas de recepción definidos en México para el estándar ATSC.

Siguiendo con la estructura de la tesis, el capítulo 5 describe dos aspectos importantes. Primero, la metodología general para realizar las mediciones en campo; abarca los modos de recepción, los principales parámetros de medida que se van a medir para cumplir con los objetivos de la planeación de las pruebas y la caracterización del ruido, este último enfocado al ruido exterior, es decir, el que no es generado por el sistema de medidas pero que puede afectar considerablemente las mediciones debido a que se trabajará en la banda de frecuencias UHF. Segundo, una vez descrita la metodología de medidas, se define y describe el sistema general de medidas que será utilizado en estas pruebas de campo. El sistema de medidas se define en cumplimiento con los objetivos y de los parámetros de medición trazados en la metodología de las pruebas de campo. Se siguen algunas recomendaciones de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) para la medición de cobertura de sistemas de televisión digital terrestre, además se complementa con el equipamiento definido en pruebas de campo realizadas para otros estándares de DTV y que operaban bajo Redes en Frecuencia Única.

El capítulo 6, define los entornos de recepción y la distribución de las medidas dentro del área de cobertura de la red SFN ATSC, en este capítulo también se define el tiempo necesario para llevar a cabo una medición con el objetivo de calcular el tiempo requerido en toda la campaña de medidas, al final del capítulo se enlistan algunas consideraciones adicionales que se deben tomar en cuenta para definir los sitios de medición tales como la seguridad del personal y del equipamiento de medidas.

Finalmente, el capítulo 7 recoge las conclusiones que se han derivado de la realización de esta tesis.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se resume de manera general el estado del arte de los principales estándares de televisión digital terrestre que se han implementado en el mundo centrándose en el estándar desarrollado en EUA: ATSC. Se comienza describiendo brevemente cada estándar para después centrarse en el estándar ATSC y para el cual se presentan sus principales características técnicas. Se describen los principios de una Red en Frecuencia Única y se finaliza describiendo la adición del concepto de Transmisión Distribuida al estándar ATSC el cual permite su operación en redes SFN.

En adelante, en este documento al término de Red en Frecuencia Única se le denominará SFN, por sus siglas en inglés *Single Frequency Network*.

2.1. Sistemas de Televisión Digital Terrestre

En las últimas décadas la radiodifusión de señales de televisión ha enfrentado grandes procesos de conversión; entre ellos tenemos el tipo de señales que se transmiten: hemos pasado de la Televisión Analógica a la Televisión Digital (DTV). La televisión digital es una propuesta que permite transmitir una señal de televisión en formato digital. La radiodifusión de señales analógicas de televisión hace posible una zona de servicio muy extensa donde los usuarios para acceder al servicio sólo necesitan contar con receptores capaces de recibir las señales analógicas. Sin embargo, hay ciertos factores que influyen y que pueden hacer que en ciertas zonas de servicio no se logre recibir correctamente, y es aquí en donde se observan algunas ventajas de transmitir señales digitales de televisión.

Entre las ventajas que la televisión digital ofrece sobre la televisión analógica se pueden mencionar: el aumento de la calidad de audio y video, la introducción de servicios auxiliares tales como: la guía de programación, servicios multimedia y comercio electrónico, los transmisores de DTV ofrecen la misma cobertura con una potencia de transmisión menor, la mejora de los servicios móviles de DTV, la eficiencia del espectro radioeléctrico y la posibilidad de implementar redes SFN. También es importante mencionar que es posible la transmisión simultánea de señales digitales y analógicas de televisión, hecho que es muy importante cuando un país se encuentra en proceso de transición pues permite la introducción gradual de la tecnología digital en la población. La televisión digital comercial existe en forma satelital, por cable y terrestre, siendo ésta última, históricamente la primera en implementarse.

Hay cuatro estándares para el desarrollo de la televisión digital terrestre en el mundo y los cuales han sido recomendados por la ITU en la recomendación UIT-R BT.1306-6 [1]. Uno de ellos es el estándar desarrollado en Europa llamado **DVB-T** (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*), el cual forma parte de un grupo de

estándares ya aprobados en ese continente con los que comparte muchas características como el DVB-S (*Satellite*) y el DVB-C (*Cable*). Otro de los estándares, desarrollado en los Estados Unidos de América es conocido como **ATSC** (*Advanced Television System Committee*). El tercero es el **ISDB-T** (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*), desarrollado en Japón y es muy parecido al estándar europeo. El cuarto, desarrollado en China es el **DMB-T** o **DTMB** (*Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial*) y está dirigido a la radiodifusión económica de televisión terrestre por medios digitales y con servicios suplementarios modernos. A continuación se presentan los rasgos más característicos de cada uno de los estándares enlistados anteriormente.

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

Desde 1991 fabricantes de equipo, industria de la televisión y una comisión regulatoria, se reunieron para discutir el desarrollo de la televisión digital en Europa. Este grupo en 1993 se autodenominó como el Proyecto **DVB** (*Digital Video Broadcasting*). El grupo estuvo enfocado a la creación de especificaciones para un sistema de televisión digital, la idea principal era crear un sistema unificado que permitiera manejar básicamente los mismos esquemas para cualquiera de las formas de transmisión. Debido a factores técnicos y regulatorios, el grupo desarrolló y puso en marcha los estándares para transmisión por satélite y cable, dejando para pocos años después la parte terrestre. En 1997, la norma terrestre para la transmisión de programas de TV digitales **DVB-T** fue definida en el ETS 300744 [7] en concordancia con el Proyecto DVB.

Un canal de DVB-T puede tener un ancho de banda de 6, 7 ó 8 MHz y la modulación utilizada es COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) además, el número de subportadoras COFDM debe ser una potencia de dos. En DVB-T se decidió usar símbolos con una longitud de aproximadamente 0.250 ms (modo 2K) ó 1 ms (modo (8K)). Por tanto existen dos modos diferentes de operación: el modo 2K y el modo 8K. El modo 2K acomoda 2048 puntos IFFT y tiene un mayor espaciamiento entre sub-portadoras (aproximadamente 4 kHz) pero el período de símbolos es más corto. El modo 8K tiene 8192 puntos IFFT, un espaciamiento entre sub-portadoras de 1 kHz, por lo que comparado con el modo 2K, 8K es menos susceptible a extenderse en el dominio de la frecuencia que puede ser causado por el efecto Doppler, pero más susceptible a los grandes retardos entre las señales. Por ejemplo, cuando se implementa DVB-T en redes SFN siempre se selecciona el modo 8K debido a que permite mayor espaciamiento entre transmisores.

Aparte de la longitud de símbolo, resultado del uso del modo 2K ó 8K, el intervalo de guardia puede ajustarse también dentro de un rango de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{32}$ de la longitud del símbolo. También es posible seleccionar uno de los siguientes tipos de modulación: QPSK, 16QAM y 64QAM. La norma DVB-T mantiene la modulación jerárquica como una opción, está se proveyó originalmente para transmitir el mismo programa de TV con una tasa de datos, corrección de error y calidad diferentes en un canal de DVB-T.

DVB-T usa modulación COFDM coherente, donde las portadoras de carga útil se mapean absolutamente y no se codifican diferencialmente. Esto requiere de la estimación y corrección del canal, por lo que se proveen numerosas señales piloto en el espectro de DVB-T que se usan como señales de prueba para la estimación del canal.

2.1.1.1. DVB-T2

En marzo de 2006, el grupo DVB decidió estudiar las opciones para un estándar mejorado de DVB-T. En junio del mismo año se establece de manera formal un grupo de estudio para desarrollar un esquema avanzado de modulación que se pudiera adoptar como un estándar de televisión digital terrestre de *segunda generación*, denominado **DVB-T2**.

La primera fase de DVB-T2 se dedicó a proporcionar una recepción óptima a los receptores estacionarios

(fijos) y portátiles usando las antenas existentes, mientras que la segunda y tercera fase estudió métodos para entregar mayores cargas útiles (con nuevas antenas) y la versión de la recepción móvil. Entre las mejoras a este sistema, se encuentra la pre-corrección de error con código LDPC/BCH (*Low Density Parity Check/Bose-Chaudhuri-Hocquengham*), la misma codificación que fue seleccionada para su homólogo estándar satelital (DVB-S2) y que ofrece un funcionamiento excelente en presencia de altos niveles de ruido e interferencia, dando por resultado una señal muy robusta. También hace uso de una nueva técnica llamada *Constelaciones Rotadas*, las cuales proporcionan robustez adicional en canales de mayor dificultad. Finalmente, el desarrollo de los receptores DVB-T2 hizo posible que puedan recibir DVB-T, pero no sucedió al revés pues se requieren cambios en el hardware de los receptores DVB-T.

2.1.2. ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*)

El ISDB-T es un estándar Japonés. Ha sido desarrollado por el consorcio ARIB (*Association of Radio Industries and Business*) [8]. Se encuentra documentado en el estándar ARIB STD-B31 [9] referente al sistema de transmisión y en el ARIB STD-B32 [10] respecto a la codificación de audio y video y, multiplexado de datos. El estándar también tiene sus versiones para cable y para satélite, la presente sección sólo se enfoca a describir las características más importantes de la parte terrestre.

Al igual que DVB-T, también utiliza modulación COFDM en los modos 2K, 4K y 8K lo que le otorga robustez. El canal de 6 MHz de ancho puede dividirse en trece segmentos o sub-bandas llamándose Band Segmented Transmission - OFDM (BST - OFDM). En cada una de estas sub-bandas pueden seleccionarse varios parámetros de modulación, corrección de errores y contenidos a transmitirse, el tamaño de estos segmentos es una catorceava parte del ancho de banda del canal, es decir $\frac{6}{14}$ MHz, unos 430 kHz. El catorceavo segmento de los 6 MHz que no se adjudica a ningún segmento, no se utiliza, dejando una pequeña banda de guarda en cada extremo del canal radioeléctrico. Algo muy importante, es que esta banda de guarda a su vez, no tiene que estar simétricamente distribuida a los extremos del canal de radiofrecuencia sino que se programa dinámicamente de acuerdo a las posibilidades de menor interferencia de los canales adyacentes.

El estándar admite transmisión jerárquica, lo que habilita que se establezcan distintos parámetros de modulación dentro del ancho de banda de transmisión. En particular puede realizarse transmisión a dispositivos móviles a través del mismo transmisor, con una transmisión dentro de la banda y simultánea a otros programas con mayor definición destinados a dispositivos fijos. En este caso, se utiliza el segmento central del canal con ciertos parámetros que le otorgan mayor robustez para poder ser recibidos por dispositivos móviles. Los receptores son llamados *1-seg* ya que utilizaron un segmento de los trece disponibles, en concreto el segmento central identificado como el número 7. Se dice que estos receptores pueden realizar una recepción parcial ya que logran obtener señal de sólo una parte del ancho de banda total de la transmisión, en otras palabras, no necesitan procesar los 6 MHz del canal.

Es posible en ISDB-T seleccionar los siguientes tipos de modulación: QPSK, 16QAM y 64QAM con corrección de canal y DQPSK sin corrección de canal. Existen tres modos de transmisión que permiten distintos números de portadoras, así como también es posible tener cuatro posibles longitudes del intervalo de guarda del tiempo de símbolo. Debido al concepto de sub-bandas o segmentos que ya fueron descritos, en el mercado es posible encontrar receptores de banda estrecha que reciben una o varias sub-bandas y receptores de banda ancha que reciban el canal completo de 6 MHz. En resumen, ISDB-T es ciertamente el estándar más flexible y, debido a la posibilidad de intercalado en el tiempo, también la norma más robusta. El estándar de codificación de video así como el flujo de transporte utilizado corresponden a MPEG-2.

2.1.2.1. ISDB-Tb o ISDB-T International

En 2006, Brasil adopta el estándar japonés. La ANATEL (*Agencia Nacional de Telecomunicaciones*) de Brasil le incluyó ciertas modificaciones [11, 12]. Esta nueva norma resultante se le llama ISDB-Tb o ISDB-T International. Las principales diferencias con el ISDB-T original son:

- La utilización de codificación de video en MPEG-4.
- La introducción de aplicaciones de televisión digital interactiva.

2.1.3. DMB-T o DTMB (*Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial*)

DMB-T también llamado DTMB es un estándar chino desarrollado por la universidad de Tsinghua en Pekín, está dirigido a la radiodifusión económica de televisión terrestre por medios digitales y con servicios suplementarios modernos. Fue publicado en 2006 [1]. El método de modulación usado es TD-COFDM (*Time Domain-Coded Orthogonal Frequency Multiplex*), el ancho de banda del canal soportado es de 6, 7 y 8 MHz.

En el modo 4K, DMB-T funciona con 3780 portadoras espaciadas a 3 kHz en un canal de 8 MHz. Del total de portadoras, sólo 36 son portadoras de señalización. Los tipos de modulación que pueden utilizarse son: 4QAM-NR, 4QAM, 16QAM, 32QAM y 64QAM. La pre-codificación de error (habitualmente referida como codificación FEC de *Forward Error Correction*)¹ consiste en: codificador BCH, codificador LDPC e intercalado de tiempo.

Al igual que otros sistemas de transmisión, utiliza flujos de transporte MPEG-2. DMB-T está diseñado para transmitir en definición estándar y en alta definición, funciona en los modos de transmisión fijo y móvil.

Como se ha visto hasta aquí, todos los estándares enlistados de DTV tienen una modulación basada en OFDM (*DVB-T, ISDB-T y DTMB*), en todos ellos es posible su funcionamiento cuando operan en redes MFN y SFN.

2.2. ATSC: Advanced Television Systems Committee

Las siglas de ATSC provienen de *Advanced Television Systems Committee* (Comité de Sistemas de Televisión Avanzada) fundado en Estados Unidos de América en 1982 con el propósito de investigar las nuevas tecnologías para el desarrollo de la televisión. En la actualidad ATSC es una organización internacional sin fines de lucro en el desarrollo de normas voluntarias para televisión digital. Las organizaciones miembros de ATSC representan a los fabricantes de equipos de transmisión, los equipos de radiodifusión, electrónica, informática, cable, satélite y las industrias de los semiconductores, en general, la industria de la televisión en E.E.U.U. es representada por la organización ATSC.

ATSC trabajó en conjunto con el Comité Asesor de la televisión digital, formado en 1987 para aconsejar a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de E.E.U.U. en los asuntos técnicos y públicos de la televisión avanzada. ATSC fue responsable de desarrollar y documentar las especificaciones para la ATV (*Advanced Television*) basado en el sistema de la Gran Alianza (GA).

La Gran Alianza se formó en mayo de 1993 por diversos grupos importantes en el campo de la televisión en E.E.U.U. para realizar una propuesta de un sistema de televisión totalmente digital. La propuesta final fue basada en cuatro propuestas realizadas en 1990 que estuvieron en competencia para ganar la exclusiva: estas propuestas ya contemplaban la televisión de alta definición (HDTV). Al final, como los prototipos fueron

¹La codificación FEC es la codificación de canal mediante la cual se añade suficiente redundancia y protección a la señal para hacerla más robusta con vistas a poder corregir los errores después de que ésta pasa por el canal de transmisión.

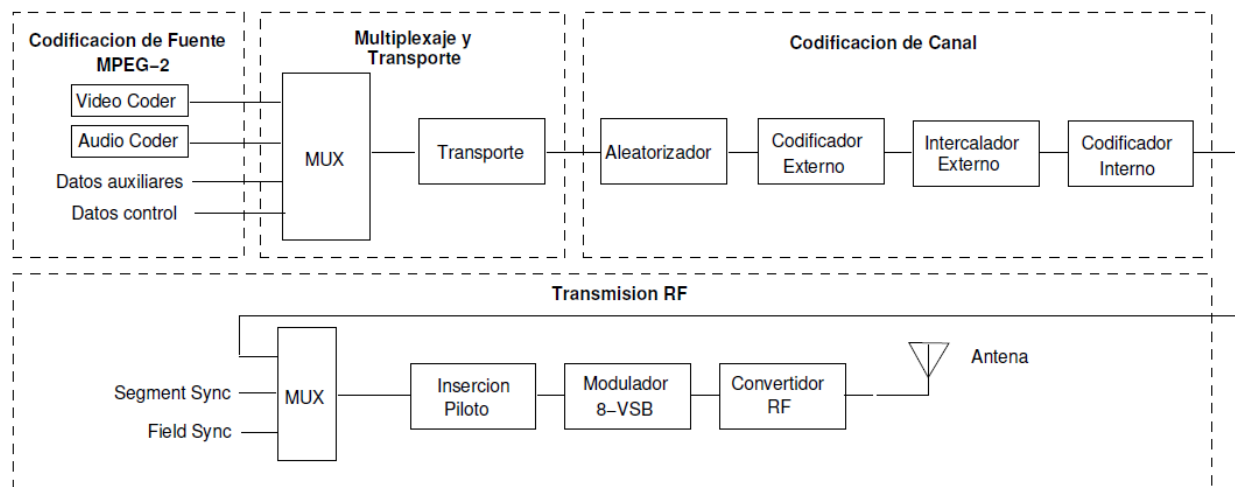


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema ATSC.

construidos de manera modular se consideró lo mejor de cada una de las cuatro propuestas. El estándar ATSC se aprobó en 1996 por la FCC y los primeros receptores aparecieron en el mercado en 1998 [13]. La documentación completa del estándar está definida en el documento A/53 de ATSC [14]².

Los países que actualmente han adoptado ATSC son Estados Unidos de América, Canadá, México, Corea del Sur, Guatemala, Honduras y República Dominicana [13, 15].

2.2.1. Principales características técnicas

El contenido de esta sección es puntualizar sobre algunos de los aspectos principales del estándar ATSC.

ATSC consideró y desarrolló los consensos industriales de varios formatos de la televisión en definición estándar (SDTV), los cuales fueron añadidos al sistema propuesto por la Gran Alianza para formar el sistema completo de televisión. Entre otras cosas, los formatos propuestos contemplaban la interoperabilidad con los estándares de televisión existentes (NTSC) y la convergencia de los diferentes dispositivos de televisión.

En este estándar es favorecida la televisión de alta definición (HDTV), por consiguiente la señal de entrada a un modulador ATSC es un flujo de transporte con video codificado MPEG-2 e información de audio digital codificada en Dolby AC-3. Las señales de video pueden ser SDTV o en señales de HDTV.

En la Figura 2.1 se presenta un diagrama del estándar ATSC en donde se destacan cuatro bloques principales y a continuación se detallan sus respectivas descripciones [14, 16]³.

- **Codificación de fuente.** Este bloque lleva a cabo la codificación y compresión de video y audio. Este último incluye los datos de control, datos de acceso condicional y datos asociados con los servicios del programa en video y audio. Este sistema emplea la sintaxis de flujos de datos del MPEG-2 para la codificación de video y el estándar AC-3 para la codificación de audio.
- **Multiplexaje y transporte.** Se usa la especificación de la sintaxis del MPEG-2 para el empaquetamiento y multiplexaje de video, audio y señales de datos. Los datos provenientes de la codificación de fuente se empaquetan en bloques de 188 bytes: se ocupa 1 byte para la información de sincronía y el resto para la *carga útil*. La característica principal de ATSC es que la salida del bloque del flujo de transporte, es un

²La referencia ATSC A/53 corresponde a la versión actual del documento.

³En adelante la referencia A/54 corresponde a la versión actual.

flujo MPEG-2 con una tasa constante de 19.38 Mbps.

- **Codificación de canal.** Involucra los siguientes procesos: aleatorización, codificación externa (*Reed-Solomon*), entrelazado externo y codificación interna (*Trellis*). En la codificación de canal primero se distribuyen los datos de manera aleatoria, posteriormente se protege contra errores usando la codificación Reed-Solomon, enseguida son entrelazados nuevamente y pasan a un codificador convolucional (*Trellis*). Estos procesos no son aplicados al byte de sincronía del paquete de transporte del MPEG-2. Por último y antes de la modulación, se insertan las señales de sincronía y son multiplexadas junto con los datos de la codificación de canal.

NOTA: En la codificación interna se añade un bit de redundancia por cada dos de entrada de la siguiente manera: el codificador convolucional (*Trellis*) utilizado tiene una tasa de $\frac{1}{2}$ (dos bits de salida por uno que entra), el otro bit pasa a la salida tal cual (sin codificación). De esta manera los tres bits a la salida se convertirán en los 8 niveles de la modulación 8-VSB.

- **Transmisión de RF.** Este proceso involucra los siguientes procesos previos a la adecuación de la señal para su transmisión: Mapeo de bits a símbolos, inserción de señal piloto y proceso VSB.

En el mapeo de bits a símbolos, los bits de salida del codificador convolucional son mapeados a sus respectivos niveles de voltaje según se indica en la Figura 6.14 del documento ATSC A/53 [14], después del mapeo se le suma un valor de 1.25 a cada valor para efectos de la señal piloto.

A la señal en banda base se le debe agregar una pequeña señal piloto con la finalidad de adquirir la portadora en el receptor. Esta señal es creada cuando se le ha sumado un valor de 1.25 a cada nivel mapeado. Esta señal sólo añade 0.3 dB a la potencia total de la señal. Sus ventajas son que ayuda a la recuperación de la portadora e independientemente de los datos proporciona una recuperación confiable de la señal. Como la frecuencia de la señal piloto depende del rango de frecuencias de cada canal, siempre se le agrega un *offset* de 309.44055 kHz al límite bajo del rango de frecuencias [16].

Para producir la modulación, la señal de banda base es filtrada con un filtro de Nyquist, este filtro es el encargado de la forma plana del espectro en frecuencia de la señal. El filtrado de la señal produce las componentes I (*in-phase*) y Q (*quadrature*) para la modulación. Sin embargo, ATSC es un método de portadora única que sólo usa el eje I: ocho puntos equidistantes de la constelación son distribuidos a lo largo de este eje. Para que la señal 8VSB tenga ocho niveles discretos de amplitud se hace lo siguiente. Primero, se genera una señal 8ASK (una señal sinusoidal modulada con 8 desplazamientos de amplitud) donde la información de los tres bits a transmitir están contenidas en un nivel de amplitud, y cada nivel de amplitud corresponde a un símbolo. El espectro de la señal 8ASK es un espectro de doble banda lateral. Segundo, para reducir el ancho de banda se tiene que suprimir parcialmente una banda lateral, por lo que la señal que se ha modulado en amplitud entra a un filtro VSB o de banda lateral vestigial (filtro de Nyquist), de ahí la denominación 8VSB.

El siguiente paso es la transmisión de la señal por medio de una antena. Actualmente los transmisores utilizan un proceso de modulación en dos pasos: primero modulan la señal en banda base en una portadora de frecuencia intermedia (la misma frecuencia para todos los canales) y segundo, trasladan la señal al canal de radiofrecuencia deseado.

2.3. Redes en Frecuencia Única: SFN

Una Red en Frecuencia Única o SFN consiste de varios transmisores que operan en un solo canal y que cubren un área de servicio para entregar un servicio de programa unitario o complemento de estos servicios.

Las señales procedentes de los diferentes transmisores de la red se solapan entre sí en el mismo área y tienen el potencial de interferir unas con otras.

2.3.1. Principios de una red SFN

Todos los transmisores de una red SFN utilizan la misma frecuencia de operación, por lo que existe interferencia entre transmisores. En condiciones especiales esta interferencia puede ser benéfica para mejorar la recepción de la señal, en otros casos es necesario el ajuste de parámetros en el diseño de la red [17].

Las razones para implementar redes SFN van desde la mejora del servicio hasta las consideraciones económicas, técnicas y regulatorias de la eficiencia del espectro. La ventaja más importante de una red SFN es la eficiencia espectral pues no se requieren de nuevas frecuencias para aumentar la cobertura, redundando en facilidad regulatoria para su despliegue. Entre los beneficios más importantes de implementar redes SFN se encuentran:

- Una red SFN habilita la posibilidad de prestar servicio en lugares (condiciones de terreno montañosos o accidentados) en donde no es posible la llegada de la señal (con los niveles de campo adecuados) al utilizar un sólo transmisor de alta potencia. Instalar un transmisor secundario de manera estratégica y adicional al transmisor principal (implementación de una red SFN) soluciona huecos de cobertura mediante la regulación de la potencia de transmisión de ambos transmisores hasta alcanzar los niveles de cobertura y señal deseados.
- El rehuso de instalaciones de servicios de telecomunicaciones: torres de telefonía celular y de radiodifusión. Esta alternativa evita la necesidad de una planificación para instalar nuevas torres en nuevos sitios y puede resultar en un costo total menor en la implementación de redes SFN.
- Las redes SFN reducen la cantidad de margen de desvanecimiento, es decir, es posible trabajar con niveles de potencia más bajos y obtener un nivel de señal bueno en un área de servicio en particular. Al operar en baja potencia se producen menos interferencias causadas por los transmisores vecinos, al mismo tiempo en combinación con un aumento en el número de transmisores hace que la distancia sea más corta entre receptor-transmisor y puede resultar en un nivel de señal más uniforme en la zona a la que da servicio ese transmisor. Los niveles de señal uniforme hacen posible el uso de antenas en interiores para la DTV.
- Las redes SFN mejoran las posibilidades de que la señal pueda ser recibida por receptores móviles al recibir señales de múltiples direcciones. Las redes SFN por sí solas no pueden hacer posible que una señal sea recibida por receptores móviles pero a medida que el receptor se mueve, la red minimiza el impacto de edificios, árboles, etc., pues cuando la señal de un transmisor se corta debido a estos obstáculos es probable que otra señal proveniente de otro transmisor esté disponible, por lo tanto se deduce que la red SFN trabaja muy bien cuando se tiene un número suficiente de transmisores.

La tecnología de redes SFN no puede ser utilizada en la radiodifusión analógica terrestre, donde todos los estándares de televisión analógicos existentes en el mundo utilizan una modulación de amplitud de banda lateral vestigial y por ello operan en redes multifrecuencia (redes MFN) [17]. La mayoría de los trabajos de investigación sobre redes SFN consideran el uso de la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). En algunos estándares de televisión digital⁴ OFDM es una buena modulación cuando se implementan redes SFN debido a su capacidad para reducir el efecto de señales multitrayecto o ecos, la idea básica es considerar a las

⁴Tal es el caso de DVB-T/T2 e ISDB-T/Tb

señales que interfieren como una mezcla de versiones retardadas de la señal original donde los retardos de estas señales corresponden a diferentes tiempos de propagación⁵ [18]. En resumen, una red SFN puede ser vista como una clásica red de un sólo transmisor donde se tienen ecos con sus respectivos retrasos.

Debido a que el estándar ATSC es una modulación digital basada en amplitud (8-VSB) se pensaría que es imposible su implementación de redes SFN, sin embargo, en los últimos años se han llevado a cabo pruebas de laboratorio y de campo y los resultados indican que es posible el despliegue de estas redes cuando se implementan ciertas configuraciones en los transmisores que conforman la red y sobre todo a que la tecnología en el diseño de receptores ATSC ha mejorado en los últimos años [19, 20]. En la siguiente sección se abunda más al respecto.

2.4. Transmisión Distribuida para ATSC

Una transmisión digital en cualquier estándar de DTV consiste en la comunicación de datos a través de un canal mediante el uso de formas de onda digitales. En un receptor para recuperar los datos, se realiza una gran variedad de pasos para superar las deficiencias de la señal producto del canal de transmisión y así recuperar los bits transmitidos. Las deficiencias causadas por el canal principalmente son: adición de ruido, variaciones de amplitud y retardo, multitrayectoria y desplazamiento Doppler de la señal.

Para el caso de la modulación 8-VSB, los receptores ATSC aplican diferentes técnicas para superar las deficiencias del canal y recuperar los datos, entre ellas el uso de equalizadores adaptativos [19, 21]. Los equalizadores adaptativos se aplican debido a que las alteraciones producidas en una señal por el canal de transmisión se comportan de manera muy parecida a cuando a una señal se le aplican filtros lineales, los filtros causan interferencia entre símbolos (ISI) y pueden hacer que en ocasiones sea imposible la recuperación de los datos. Cuando se caracteriza un canal de transmisión (respuesta al impulso del canal) es posible el diseño de nuevos filtros que son capaces de revertir los efectos ISI permitiendo que los datos transportados en la modulación sean recuperados con exactitud⁶. La multitrayectoria de señales hace que el receptor experimente ecos⁷, por lo que se tienen umbrales en el sistema de corrección de errores en el cual un receptor se vuelve incapaz de recuperar los datos. Con equalizadores adaptativos, este umbral es mucho mayor. En general, se puede decir que las redes SFN toman ventaja de las técnicas incorporadas en los receptores para el tratamiento del multitrayecto haciendo que las señales procedentes de múltiples transmisores de una red SFN le parezcan al receptor como ecos de un solo transmisor.

En julio de 2004 ATSC aprobó la norma ATSC A/110 [3] que define la sincronización de múltiples transmisores emitiendo la señal de DTV de acuerdo a la norma ATSC A/53. También se aprobó la práctica recomendada ATSC RP A/111 [4] en la cual la Transmisión Distribuida es una manera de cubrir un área de servicio grande con una red de múltiples transmisores, todos ellos sincronizados y transmitiendo exactamente el mismo programa, pero utilizando menos cantidad de canales que el número de transmisores que constituyen la red. Si el número de canales utilizados por una red de este tipo es uno, entonces tenemos una red en frecuencia única. En 2011, se aprueba la norma A/110:2011 [3] que extiende el alcance de A/110 a la operación de DTV móvil (norma ATSC A/153) [22]⁸.

En la práctica recomendada ATSC RP A/111 se proporcionan las directrices para el diseño de una red con Transmisión Distribuida (**DTxN**) y para la gestión de las interferencias. A continuación se enlistan los tres

⁵Los retardos son proporcionales a las distancias entre los transmisores y el receptor.

⁶Estos filtros pueden operar en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo, los filtros en el dominio del tiempo son más frecuentes en el diseño de los receptores ATSC.

⁷La transmisión digital no causa fantasmas como en la transmisión analógica

⁸En adelante, la referencia A/153 corresponde a su versión actual.

métodos propuestos para la implementación de un DTxN.

- **Transmisores Distribuidos (Distributed Transmitters: DTxTs).**

La característica principal de este sistema es la utilización de un enlace (estudio-transmisor) para entregar la señal a cada uno de los transmisores de la red, debido a esto no hay limitación en la potencia de transmisión o en el tiempo de emisión de la señal. Para lograr lo anterior, cada transmisor debe tener su propio excitador y estos deben estar sincronizados en todos los transmisores. A pesar de que esta configuración representa el método más complejo para establecer una red SFN, se proporciona mayor flexibilidad en cuanto a los parámetros de diseño de una red en particular. Se permiten soluciones que no son posibles en las siguientes configuraciones que se enlistan. Éste es el tipo de red que se desea estudiar en el proyecto REFUTV y por tanto el tipo de red para el cual se diseñarán las pruebas de campo.

- **Repetidores Digitales en Canal (Digital On-Channel Repeaters: DOCRs)**

Esta configuración es el equivalente a los retransmisores que se utilizan en los servicios analógicos pero aprovechando varias técnicas de procesamiento digital que no son aplicables a señales analógicas. Visto de la siguiente manera, la configuración DOCRs es el método más simple para establecer una red SFN. Se recibe la señal del transmisor principal a través del aire (radioenlace dedicado) y se retransmite en el mismo canal de frecuencia. Como se recibe y se retransmite en el mismo canal, se tiene que tener un fuerte aislamiento entre la antena receptora y la transmisora además, el diseño del propio DOCR le introduce un retardo a la señal. Por lo anterior, un DOCR está limitado en potencia y en los lugares donde puede ser utilizado.

- **Repetidores Distribuidos (Distributed Translators: DTxRs)**

Los repetidores distribuidos son un híbrido de las dos configuraciones anteriores. Se recibe la señal de un transmisor principal a través del aire (esta señal no es de un enlace dedicado y también puede ser recibida por los receptores de la población) y se retransmite la señal en un canal de RF diferente. Bajo condiciones adecuadas, los DTxRs son capaces de proveer una señal sin limitación de potencia⁹ y con un retardo producido por el sistema menor, sin embargo, siguen teniendo limitaciones en los lugares donde son utilizados: como se ha podido observar, se debe tener un buen nivel de señal para poder instalar un DTxR.

La diferencia principal entre las configuraciones es la utilización del espectro y la forma en que las señales se entregan a los transmisores, la Tabla 2.1 resume sus pros y sus contras entendiéndose que cada una de ellas puede ser considerada más adecuada en función de la situación específica y de las condiciones existentes en las que se desea implementar la red.

⁹Esto debido a las diferentes frecuencias de entrada y salida: si los canales de RF están lo suficientemente separados, se evitan muchos de los problemas de acoplamiento entre la antena receptora y transmisora que se tienen en la configuración DOCRs.

Características	DTxTs	DOCRx	DTxRs
Sin límites de potencia	Ideal	No aplica	Puede aplicar
Sin límites en los tiempos de transmisión	Ideal	No aplica	Ideal
Sin límites de ubicación geográficos	Ideal	No aplica	Puede aplicar
Sin la necesidad de utilizar enlaces	No aplica	Ideal	Ideal
Sin la necesidad de espectro adicional	Ideal	Ideal	No aplica
Costo	\$\$\$	\$	\$\$

Cuadro 2.1: Ventajas y desventajas de las configuraciones de Transmisión Distribuida.

Capítulo 3

Pruebas de campo realizadas en el mundo con el estándar ATSC

A continuación en este capítulo se presentan los resultados más relevantes obtenidos de pruebas de campo que se han realizado en el mundo con el estándar de televisión digital terrestre ATSC. El capítulo continúa describiendo las pruebas bajo Redes en Frecuencia Única implementadas con ATSC en el mundo.

Se han realizado pruebas de laboratorio y de campo para probar el sistema ATSC [13, 23, 24]. En Estados Unidos de América, Taiwán y México se decidió comparar el desempeño de ATSC, DVD-T e ISDB-T usando el mejor equipo disponible en el mercado hasta ese momento [25–27].

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas para evaluar el desempeño de los receptores con su correspondiente estándar [28], las pruebas de campo sirvieron para comprobar en entornos reales los resultados de laboratorio. Las ubicaciones que se seleccionaron para la transmisión en las pruebas de campo fueron usualmente sitios donde se transmitía la televisión analógica [24, 28].

3.1. Pruebas y parámetros de medición con ATSC

En la presente tesis, se presentan las pruebas de campo que han sido documentadas y que se han hecho bajo el estándar ATSC, desafortunadamente no se tienen documentados los resultados de las pruebas de campo que se realizaron en México como parte del proceso para adoptar un estándar de DTV, pero para las que sí están documentadas se presentan los principales parámetros de medición y los resultados que se obtuvieron para cada una, ya que han servido para definir qué parámetros se recomienda medir en las subsecuentes pruebas de campo que se han realizado con ATSC.

3.1.1. Pruebas de ATSC en Taiwán

En mayo de 1998, el Ministerio de Comunicaciones y Transporte (MOTC) de Taiwán adoptó ATSC como su estándar de televisión digital y propuso que la implementación debía completarse en el año de 2006. Antes de que Taiwán adoptara ATSC como su estándar, se diseñó un plan de pruebas de campo para evaluar el desempeño y calidad de transmisión del sistema digital mediante comparaciones con el rendimiento del sistema NTSC. Los resultados de estas pruebas sirvieron para que Taiwán adoptara ATSC y, para deducir y proporcionar directrices en el diseño de las estaciones de televisión, del sistema de transmisión, área de cobertura y el mejoramiento de la calidad de recepción de la señal digital [24].

A continuación se detallan las características más importantes de esta pruebas. Uso del canal 35 (596 MHz-602 MHz, banda UHF) de RF para la transmisión de la señal de prueba con un ancho de banda de 6 MHz. La estación transmisora de TV tuvo una altura de 55 metros sobre el nivel del suelo y estuvo localizada en la montaña Chu-Zue, Taipei (1040 metros sobre el nivel del mar, snm). El sistema radiodifusor de TV consistió en una antena, líneas de transmisión y amplificadores de potencia que fueron diseñados para la radiodifusión de NTSC y que no fueron alterados para las pruebas de DTV.

En la parte de recepción utilizaron una unidad móvil. Entre el equipamiento utilizado se encuentra un prototipo de receptor profesional diseñado por Zenith y que fue utilizado para demodular y decodificar la señal de DTV, un generador de ruido con el propósito de determinar el umbral de error de visibilidad (TOV) de la señal definida como el BER [16]. También se utilizó un filtro pasa banda para el filtrado de señales no deseadas fuera de banda y de los armónicos generados por la mezcla de intermodulación del amplificador utilizado en la transmisión de la señal. Finalmente se incluyó un atenuador que impidió la sobrecarga de señales fuertes a la entrada del amplificador y que le permitió trabajar en su región lineal.

El total de sitios medidos fue 100 y se distribuyeron de la siguiente manera: 45 lugares a lo largo de tres radiales, 43 situadas en cuatro arcos y 12 dentro de la zona urbana de Taipei.

Los parámetros de medición y los resultados obtenidos fueron:

- **Portadora señal a ruido ($\frac{C}{N}$).** Se tuvo buena calidad de recepción en 83 de los 100 sitios de medición. En más de la mitad de los sitios se superó el valor de $C/N= 16.1$ [dB] para el requerimiento de umbral de visibilidad (TOV). Este valor es 1.2 [dB] más grande que el definido en el estándar ATSC [16].
- **Margen de sitio o margen de ruido blanco.** Esta es una medida de hasta que punto una señal puede caer antes de perder la imagen y el sonido, este valor está limitado por el nivel de ruido en el receptor, es decir, el margen de sitio está en función del nivel de campo eléctrico recibido. El margen de sitio disminuye a medida que lo hace la intensidad de campo, un valor de 0 [dB] para el margen de sitio indica que no hay recepción fiable, es decir, es el margen dinámico de la capacidad del sistema para soportar el ruido ambiental. Para una buena recepción, el nivel mínimo de campo estimado fue de $44,6$ [$dB\mu V/m$], y el nivel mínimo de campo eléctrico en las pruebas fue de $46,3$ [$dB\mu V/m$], entonces su margen de sitio fue de 0.8 [dB], lo que sugiere que la recepción en estos sitios era tan sensible a la presencia de cualquier señal o ruido de fondo no deseado.
- **Distorsión multitrayectoria.** Se encontró que la calidad de recepción se determina principalmente por la relación C/N y la distorsión por trayectos múltiples. El valor de $C/N= 16.1$ [dB] en presencia de multitrayectoria no fue suficiente para recibir una señal digital con buena calidad. Se concluye que el uso de un receptor con un ecualizador bien diseñado puede emplearse para reducir la distorsión a un nivel aceptable.
- **Caracterización del canal con los sistemas NTSC y ATSC.** Se utilizaron los datos recogidos de 45 sitios de prueba y se obtuvo que en 42 de ellos se recibió la señal digital y en 32 de ellos la señal de NTSC a pesar de que la potencia transmitida de DTV fue menor que la de NTSC. Se llegó a la conclusión de que el sistema ATSC superó claramente al sistema de televisión analógica convencional en términos de disponibilidad y calidad en los lugares de recepción.

3.1.2. Pruebas de ATSC y DVB-T en E.E.U.U.

En 1999 Sinclair Broadcasting hizo una demostración con radiodifusores de Baltimore (E.E.U.U.) sobre recepción de señales digitales en COFDM y 8-VSB. Este hecho planteó preocupaciones en todo el mundo sobre el

rendimiento del sistema ATSC (8-VSB) en comparación con el sistema europeo DVB-T (COFDM) pues se encontró que el último sistema era capaz de manejar la propagación de señales debido a multitrayectos producidos en zonas como ciudades y terrenos accidentados o montañosos. Entre los resultados más relevantes se encontró que el sistema DVB-T trabajó muy bien en ambientes interiores con una antena simple (*omnidireccional*) a diferencia del sistema ATSC que requirió de una antena direccional (Yagui) [25].

3.1.3. Pruebas de ATSC y DVB-T en Taiwán

En febrero de 2001 en Taiwán se llevaron a cabo pruebas de campo con los dos estándares más populares: ATSC y DVB-T con la finalidad de reafirmar la decisión inicial de adoptar ATSC y tener un soporte para determinar el estándar a adoptar [26]. La antena transmisora se ubicó en la montaña de Yang-Ming-Shang y tuvo las siguientes características: estuvo conformada por un arreglo de dipolos, la frecuencia del canal fue de 593 MHz, con una potencia de 5 [kW] a la entrada de la antena y una polarización horizontal de la señal. Las pruebas de recepción consideraron canales con un ancho de banda de 6 MHz y se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Recepción fija con antena en exteriores: 102 sitios de medición.**

La antena utilizada en recepción fue log-periódica, calibrada y tenía una altura de 8.1 metros sobre el nivel del suelo, podía rotar hasta encontrar la dirección de mejor recepción. Los principales parámetros medidos y los resultados obtenidos para ATSC fueron los siguientes: Campo eléctrico de 42.2 [dB μ V/m], potencia promedio en recepción de -77,1 [dBm], umbral $S/N=15,5$ [dB] y valor mínimo de margen de sitio de 1.9 [dB]. Para DVB-T (modo 8k) se registraron los siguientes: campo eléctrico de 42.1 [dB μ V/m], potencia promedio en recepción de -77,2 [dBm], umbral $S/N=21,68$ [dB] y valor mínimo de margen de sitio de 2.76 [dB]. Como se observa, a pesar de que los dos primeros valores (campo eléctrico y potencia de recepción) no dependen del estándar utilizado pero sí de la potencia del transmisor y de la distancia a la que se encuentre el receptor del mismo y de su antena, los últimos valores si dependen de las especificaciones del estándar, estos resultados determinaron que la recepción en exteriores con DVB-T fue mejor que la señal recibida con ATSC.

- **Recepción fija con antena en interiores: 103 sitios de medición.**

En estas mediciones se utilizó una antena omnidireccional calibrada. Al tener la ciudad de Taiwán muchos edificios altos se generan muchas trayectorias de la señal digital. En ambientes interiores el espectro de la señal ATSC se degrada haciendo que ATSC falle muy fácilmente debido a su dependencia de la señal piloto para fines de demodulación. El valor de campo eléctrico obtenido para ATSC en interiores donde la señal se recibió bien (umbral TOV) fue de 47.5 [dB μ V/m] y para DVB-T de 43.6 [dB μ V/m], se concluyó que debido al multitrayecto no fue posible usar los datos de intensidad de campo eléctrico para predecir los lugares donde la calidad de la imagen se recibe bien con ATSC. La mayoría de los sitios de medición favoreció a DVB-T: debido a que por las características de propagación de la modulación OFDM ésta prefiere el uso de una antena omnidireccional sobre una direccional.

- **Recepción móvil en exteriores.**

Se usó de una antena omnidireccional calibrada (la misma que fue utilizada en mediciones en interiores). Los resultados favorecieron a DVB-T, ya que no fue posible la recepción con ATSC.

Finalmente en base al análisis de los resultados, las autoridades en telecomunicaciones de Taiwán decidieron adoptar al estándar DVB-T como su sistema de radiodifusión terrestre digital.

3.2. Configuraciones implementadas en pruebas de campo para redes SFN con el estándar ATSC

Se han llevado a cabo algunos estudios para las configuraciones de la Transmisión Distribuida [29]. Según casos documentados, se instaló una red de Transmisores Distribuidos (DTxTs) en la Ciudad de Nueva York [30]. La CRC (*Communications Research Centre*) Canada ha estudiado, mediante diversas pruebas de campo, el rendimiento bajo diferentes condiciones la configuración de DOCRs [31,32]. También se tiene documentado un estudio para la configuración de DTxRs implementado sobre la Ciudad de Ottawa, Canadá [33].

A continuación algunos de los estudios mencionados anteriormente, para más detalle de cada uno ir a la documentación.

3.2.1. Transmisores Distribuidos

El 22 de marzo de 2007 la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*) aprobó una solicitud de la MTVA (*Metropolitan Television Alliance*) para apoyar el diseño e implementación de un sistema de emisión de televisión digital temporal para sus estaciones miembro de la ciudad de Nueva York. El sistema en cuestión fue un prototipo de sistema de Transmisión Distribuida: DTxTs a pequeña escala en la ciudad de Nueva York, y ayudó a determinar la viabilidad de la utilización de esta técnica en edificaciones densas y ambientes urbanos (se estimó el área de cobertura y desempeño del servicio).

El área de medidas se llevó a cabo en Brooklyn. La red consistió en cuatro transmisores operando en la frecuencia de los canales 12, 33 y 65, antenas de transmisión omnidireccionales y con una potencia PIRE¹ de 100 W. Los transmisores fueron sincronizados y ajustados tal como lo marca ATSC A/110. Se realizaron un total de 132 sitios de medición que involucró mediciones en exteriores (109 sitios) e interiores (23 sitios) [30], estos sitios estuvieron ubicados en estructura de rejilla, es decir, los puntos cubrieron en forma de red a toda el área de Brooklyn. En recepción, se utilizaron dos receptores ATSC de 5ta. generación. A continuación se enlistan los resultados más relevantes:

1. Mediciones en exteriores

Se realizaron mediciones en los canales 12, 33 y 65 utilizando antenas direccionales log-periódicas calibradas para las bandas VHF y UHF, cada medición en exterior se realizó orientando la antena en la dirección donde se obtuvo el máximo nivel de señal y ubicando la antena a 15 y 30 metros sobre el nivel del suelo (msns).

- Para el canal 12, se obtuvieron valores de señales promedio de 70 [dB μ V/m] cuando se utilizaba una antena ubicada a 30 msns, y un valor de 2.5 [dB] menos con la antena ubicada a 15 msns con respecto de la de 30 msns. Se obtenían altos niveles de SNR, los cuales estaban muy por encima del umbral de 15 [dB] que se requiere para una buena recepción según la documentación ATSC A/74 [34].
- Canal 33, valor de señal promedio de 80 [dB μ V/m] cuando se utilizaba una antena ubicada a 30 msns, y un valor inferior de 3 [dB] con la antena ubicada a 15 msns. Valores de SNR mayores de 47 [dB].
- Canal 65, valores de señal promedio de 76 [dB μ V/m] cuando se utilizaba una antena ubicada a 30 msns, y un valor inferior de 2 [dB] con la antena ubicada a 15 msns. Valores mayores de SNR de 40 [dB].

¹Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.

2. Mediciones en interiores

Se realizó mediciones en el canal 33 utilizando dos antenas, una dipolo y otra direccional ambas calibradas para las bandas VHF y UHF. Los sitios de pruebas en interiores proporcionaron resultados con tendencias similares a los resultados que se obtuvieron en exteriores, por ejemplo para el canal 33, se tuvo un valor promedio de campo de $69 \text{ [dB}\mu\text{V/m]}$ esto considerando que las antenas ya no fueron ubicadas a alturas de 15 y 30 msns, sino que fueron ubicadas al nivel de donde se encontraban los receptores. El valor SNR promedio fue de 38 [dB] .

En las pruebas en interiores, a pesar de que se contó con menos puntos que las realizadas en exteriores, se observó que la antena direccional tuvo un buen desempeño, pero no tan bueno como con la antena dipolo. Esto les indicó que tal vez los receptores de 5ta. generación (que eran recientes en el mercado para el momento en que realizaron las pruebas) presentaban innovaciones en los algoritmos utilizados en el diseño de sus ecualizadores y, que estos nuevos algoritmos ya eran capaces de utilizar los ecos de la señal (que normalmente son captados más a menudo con una antena dipolo que con una direccional, debido a su patrón de radiación) para mitigar el efecto del multitrayecto.

De manera general, para esta prueba de campo bajo la configuración de Transmisores Distribuidos (DTxTs) se recomendó que para extender el resultado a un área mas grande de la ciudad y para el despliegue de una red en áreas metropolitanas similares se debe tomar en cuenta un gran número de sitios de medición con el objeto de estudiar la variabilidad temporal de las señales recibidas ya que dependerán del diseño de la red y de un gran número de factores que escapan a los que fueron probados en la Ciudad de Nueva York.

3.2.2. Repetidores Digitales en Canal

La CRC estudió en diversas pruebas de campo el rendimiento para diversas configuraciones de DOCRs [31,32]. Se describen dos pruebas de campo llevadas a cabo en Canadá: para ambas pruebas se usó un transmisor principal con una potencia PIRE de 30 [kW] , la frecuencia de operación fue el canal 67, la antena de transmisión fue omnidireccional y se ubicó a 215 metros sobre el nivel del suelo (msns), la antena del DOCR en recepción tuvo 12 [dBd] (antena tipo Yagui) y la de transmisión 7.5 [dBi] (antena log-periódica), la potencia PIRE de transmisión del DOCR para la primera prueba fue de 10.5 [dBW] y de 11.5 [dBW] para la segunda.

Para ambas pruebas se realizaron 9 sitios de medición, 6 en exteriores y 3 en interiores; estos sitios de medición variaron de ubicación con respecto del DOCR y del transmisor principal en cada prueba, la razón de variar las ubicaciones fue por que se quiso conocer el área de cobertura que se tenía en cada una de las siguientes configuraciones. En la primera prueba el DOCR se ubicó a 28.8 km del transmisor principal y se procuró que se mantuviera una línea de vista entre ellos, la distancia entre las antenas del DOCR (receptora-transmisora) se ubicaron a 15 metros. En la segunda prueba, el DOCR se ubicó con línea de vista a 26.2 km del transmisor principal, la distancia entre las antenas (receptora-transmisora) del DOCR fue en este caso de 25 metros.

Las mediciones se realizaron cuando la red SFN estaba inactiva (sólo el transmisor principal operando) y en esta situación se encontró el área en que era posible la recepción desde el transmisor principal. También se realizaron las mismas mediciones para cuando la red SFN se encontró activa (transmisor principal y DOCR operando). Lo anterior les sirvió para comparar la facilidad de recepción en los casos de SFN inactiva y SFN activa y también para evaluar la cobertura que se tiene para cada una de las configuraciones de distancia y potencia definidas en esta prueba de campo.

En la recepción, se utilizaron receptores comerciales que estuvieron disponibles a finales del año 2000 y principios del 2001 y que además presentaron un buen desempeño después de someterlos a las pruebas de

laboratorio que recomienda ATSC A/74 [34]. Las pruebas en exteriores se realizaron con una antena direccional de 7.5 [dBi] de ganancia, 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 interiores ayuda a discriminar entre las señales que llegan al receptor al apuntar en la dirección de máxima recepción.

En cuanto a los transmisores, las conclusiones más relevantes de las pruebas giraron entorno al grado de acoplamiento entre la antena receptora y transmisora del DOCR, estableciéndose que la señal que se recibe debe ser fuerte y constante y, que el deterioro de la señal que recibe el DOCR es mínima independientemente de la distancia. Para evitar las interferencias con la señal principal se encontró que adicionando un retraso al DOCR el éxito de tener una buena recepción en las áreas interferentes es alta. También se encontró que cuando la antena transmisora del DOCR irradia en dirección del transmisor principal se tienen áreas en donde la recepción de la señal es imposible, sin embargo, se espera (en el tiempo que se realizaron las mediciones) que la recepción mejore si los ecualizadores de los receptores se diseñan para soportar de mejor manera los multitrayectos. Finalmente también se encontró que el uso de la configuración de DOCRs hace posible la recepción en interiores.

3.2.3. Repetidores Distribuidos

Un estudio realizado en Ottawa, Canadá utilizó tres repetidores [33]. El transmisor principal del cual recibían la señal se ubicó 30 km al sur de la ciudad de Ottawa, la antena de transmisión fue omnidireccional e irradiaba una potencia PIRE de 30 [kW], la antena tenía entre 209 y 215.4 metros sobre el nivel del suelo.

Los repetidores convertían una señal recibida en el canal 67 (788-794 MHz) a una señal de salida en el canal 54 (710-716 MHz) y para sincronizar a los repetidores se usó un GPS con una frecuencia de referencia de 10 MHz. La ubicación de los repetidores formó un triángulo equilátero entre ellos tratando de que en su centro quedara la Ciudad de Ottawa. Las potencias PIRE de transmisión de los repetidores fueron ajustadas entre 5 [W] y 7 [W].

Los puntos de medición se encontraban en las esquinas de cuadros que formaban parte de una red en forma de rejilla y que cubría el área de la Ciudad de Ottawa. El número total de puntos de medición fue de 69 puntos localizados a una distancia de entre 100 y 200 metros el uno del otro. Las mediciones en exteriores, se realizaron en las aceras de las calles ubicando dos tipos de antena (omnidireccional y direccional) a una altura de 1.5 msns. La antena omnidireccional fue pensada para recibir las principales señales y todos sus múltiples trayectos sin ninguna atenuación, la antena direccional (aproximadamente 5 [dBi] de ganancia y que en el momento de las pruebas era utilizada comercialmente para recepción en interiores) se incluyó para lograr atenuar y/o discriminar las señales multitrayecto en relación con una señal principal o que proviene de un solo transmisor.

Con la antena omnidireccional, en cada sitio de recepción, después de medir la fuerza de la señal recibida en el canal 54 (canal utilizado por los repetidores) se observó la respuesta al impulso en el canal y su correspondiente dispersión de retardo. Estos retrasos se compararon con los valores que se habían predicho para comprobar la contribución de cada repetidor en la señal que se recibía. La antena direccional ayudó a establecer la dirección en donde se tenía *facilidad de recepción*, para esto se giró la antena en azimut (sin cambiar su ubicación) para encontrar ángulos de dirección en donde la recepción presenta un mayor nivel de la señal. Esta medición sirvió para comparar sitios y encontrar cuales de ellos presentan el mayor número de direcciones en donde es posible recibir la señal correctamente. Todas las mediciones se realizaron en un nuevo prototipo de receptor ATSC y en uno perteneciente a una generación anterior (en comparación con los disponibles en ese momento de las pruebas). Para comparar la cobertura de la red SFN contra la cobertura de un sólo transmisor en los lugares

de medición se realizaron las mismas pruebas también para la señal en el canal 67, frecuencia de la señal del transmisor principal que proporcionaba la RF de entrada a los repetidores.

Los resultados mostraron que el uso de esta configuración de DTxRs proporciona mejor disponibilidad en recepción en todas las circunstancias cuando se compara con la recepción de la señal debida a un sólo transmisor principal. Según los resultados de las pruebas de campo, se llegó a la conclusión de que cuando se usó un receptor de una generación anterior (en comparación con la generación de receptores que se tenían hasta el momento de las pruebas) con una antena receptora omnidireccional, el uso de la configuración de DTxRs no ocasionó un impacto negativo en el funcionamiento de dicho receptor.

3.3. Principales conclusiones sobre las pruebas de campo realizadas bajo las configuraciones de redes SFN ATSC

Todos los estudios realizados con las diferentes configuraciones de Transmisión Distribuida recomendaron llevar a cabo la realización de más pruebas de campo para estudiar el desempeño de los receptores ATSC ante el aumento del retraso de las señales eco como resultado del aumento de las distancias entre los transmisores que constituyen la red. Y se señala que los estudios deben enfocarse en la posibilidad de bajar la potencia de cada uno de los transmisores de la red para encontrar el número óptimo de transmisores que deben tener cada una de las configuraciones y que maximizan sus beneficios.

De igual manera se observó que en cuanto a receptores se refiere, el desempeño de los *nuevos* receptores con que se contaba al momento de realizar las pruebas de campo era mucho mejor que el de los receptores de fabricación anterior. Se recomendó el uso de antenas receptoras direccionales para proporcionar una recepción exitosa en mayor porcentaje de localizaciones en comparación con las que se tienen al utilizar una antena receptora omnidireccional. Sin embargo, también se destacó que el desempeño del receptor al usar una antena receptora omnidireccional está condicionada a la capacidad del receptor (en especial de su ecualizador) para aceptar multitrayectos de la señal. Se espera que a medida que la tecnología de desarrollo de los receptores mejora, su desempeño con una antena omnidireccional sea tan bueno como el que se tiene con una antena directiva.

Capítulo 4

Objetivos, requerimientos y definición de la red SFN ATSC para las pruebas de campo

A partir de este capítulo se expone la planificación de las pruebas de campo. En el presente se definen los objetivos que se desean alcanzar con la realización de las mismas. Estos objetivos determinarán los requerimientos de la red de transmisión, del equipamiento de medida y definirán las bases de la metodología de medición en campo, algunos de los cuales se abordan en los siguientes capítulos. También, se define la red experimental SFN ATSC en base a los objetivos de las pruebas de campo. A partir del desempeño esperado de los receptores se establecen las condiciones y características de cobertura de la red SFN requeridas para llevar a cabo las pruebas en la Ciudad de México. Se definen dos posibles escenarios de transmisión de la red, con el objetivo de evaluar cuál de ellos es el adecuado para el despliegue se realiza una predicción de cobertura para cada uno con la ayuda del software Radio Mobile *v.11.5.8*, la predicción de cobertura toma en cuenta los umbrales de campo y condiciones estadísticas de recepción definidos en México para el estándar ATSC. Una vez que se han definido los parámetros de operación de la red, se definen los modos de transmisión en que la red será operada.

4.1. Objetivos de las pruebas de campo: Estudio del desempeño de ATSC sobre una red SFN

La planificación de pruebas de campo sobre redes SFN para el estándar ATSC tiene como objetivo evaluar los parámetros de desempeño para tener una buena recepción en la mayoría de los receptores ATSC comerciales existentes en México.

La importancia de probar los receptores ATSC radica en que es la implementación de los receptores (y principalmente en el ecualizador de canal del receptor) la que permite que éstos reciban correctamente en un entorno SFN. En tecnologías basadas en la modulación OFDM la capacidad básica de recepción en un entorno SFN radica en los parámetros de modulación (y principalmente en la duración del prefijo cíclico). El primer objetivo de las pruebas de campo es medir la respuesta de diferentes receptores comerciales en diferentes condiciones de recepción dentro de una red SFN. Conociendo la capacidad de recepción de los receptores se desea definir o incluso delimitar los parámetros de funcionamiento de los transmisores de una red SFN-ATSC tales como: la distancia máxima, potencia, tiempo de sincronización para transmitir la señal, localización geográfica,

etc., que al implementarse permitirán la recepción correcta de la señal ATSC.

En resumen, éstas pruebas de campo permitirán conocer la respuesta genérica de los receptores al multitrayecto del canal inalámbrico, y definir algunos parámetros que se deben implementar en una red SFN ATSC para que los receptores ATSC comerciales reciban de manera correcta.

4.2. Características del desempeño de los receptores ATSC

Como se mencionó en la sección 2.3 y 2.4, aparte de que la implementación de una red SFN debe proporcionar niveles de señal adecuados, el diseño y funcionamiento esperado de la red debe responder a la capacidad de los ecualizadores de canal implementados en los receptores y que les permite recibir correctamente las señales dentro del entorno SFN.

Generalmente, los ecualizadores son de tipo adaptativo y se caracterizan en términos de la **longitud de los ecos** (es decir, del tiempo de retardo que existe entre señales) que pueden corregir y de la **amplitud de los ecos** (con respecto a la señal recibida más fuerte) que se tiene a la entrada del receptor. Por lo anterior, desde el punto de vista del diseño de una red SFN, el ecualizador adaptativo ideal que debe tener un receptor es aquel que tiene una capacidad de dispersión de retardo muy grande y que es capaz de admitir para cualquier valor de retardo una amplitud de las señales igual (o con diferencias entre ellas muy pequeñas). Dado que no es posible aún contar con ecualizadores ideales en los receptores que estén al alcance del consumidor, los diseñadores de redes SFN deben ser capaces de aprovechar al máximo y tomar ventaja de las actuales técnicas y algoritmos de ecualización implementados en los receptores para el tratamiento del multitrayecto o eco de la señal.

La organización ATSC ha producido una práctica recomendada *Receiver Performance Guidelines (A/74)*: el documento ATSC A/74 [34]. En ATSC A/74 se describen las reglas de funcionamiento para los receptores ATSC que se deben cumplir para asegurar la correcta recepción de la señal, en la Figura 4.1 se muestra la relación entre el tiempo de retardo y la amplitud (*respuesta al impulso del canal*) para dos señales eco que son recibidas por un receptor en modo estático y que, además de garantizar buena recepción, provienen de un sólo transmisor. Las dos señales eco se pueden comportar de la siguiente manera:

- Siempre se tiene una señal de mayor intensidad de entre las dos que llegan. Ésta se considera la señal principal.
- La otra señal (de menor intensidad) puede llegar antes o después que la señal principal. Si ésta señal llega antes da origen a situaciones de pre-eco, si llega después se considera un post-eco.

En resumen, un receptor debe presentar un buen desempeño para señales que llegan en el rango de $-30 \mu s$ (pre-eco) a $40 \mu s$ (post-eco). De los dos tipos de situaciones, el pre-eco es el que más afecta el desempeño de un receptor ATSC pues la relación **D/U (Desired/Undesired)**¹ debe ser mayor a medida que el retraso entre señales aumenta [34]. La relación mostrada en la Figura 4.1 fue resultado de una prueba de laboratorio llamada **Single Static Echoes Amplitude/Equalizer Profile** y que perfila las mínimas características que son de esperar (diseño de ecualizadores) en los receptores comerciales posteriores a la publicación del documento ATSC A/74 [34].

La tecnología de los receptores ATSC que aparecieron posteriores a la práctica recomendada sin duda ha mejorado, en la Figura 4.1 se puede decir muestra una **máscara del eco estático** en la que se puede esperar que las condiciones que caen por encima de la línea trazada en rojo sean manejadas de manera limitada por

¹Señal Deseada/No deseada.

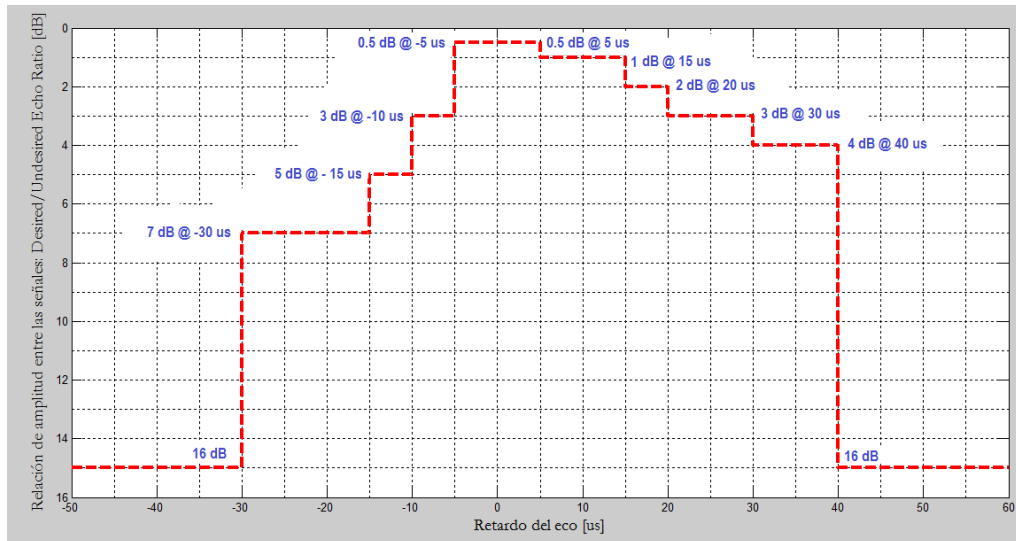


Figura 4.1: Recomendaciones mínimas del ecualizador adaptativo para un receptor ATSC según ATSC A/74.

dichos receptores, mientras que las que caen por debajo están en el rango en donde el ecualizador adaptativo de los receptores las pueden tratar adecuadamente.

En la documentación ATSC A/74, la información contenida también es la suficiente para orientar sobre el diseño de redes SFN con el estándar ATSC. Como se ha mencionado, las situaciones de pre-eco son las que más afectan el desempeño en recepción y esto será en mayor o menor grado debido al diseño del ecualizador de cada receptor. En ATSC A/110 se recomienda que para minimizar las situaciones de pre-eco en una red SFN (trabajando con el estándar fijo de ATSC) y que esté conformada por dos o más transmisores se debe añadir un retraso en el tiempo de transmisión de la señal a alguno de ellos, con lo anterior, el desempeño de un receptor ATSC dentro de una SFN debe mejorar considerablemente (el efecto que causa añadir un retraso a un transmisor con respecto del otro se detalla en la sección 6.1) [3].

Aprovechando que una red SFN puede ser vista por un receptor como una red de un sólo transmisor donde se tiene una señal principal y ecos con sus respectivos retardos, para efectos de la presente tesis las condiciones de cobertura y características de la red SFN se definen a partir de la máscara del desempeño del ecualizador adaptativo recomendado por ATSC A/74, esto permitirá seguir evaluando el desempeño de receptores actualmente comerciales en base a las recomendaciones que se han hecho en ATSC A/74.

4.3. Condiciones de cobertura y características requeridas para el despliegue de la red SFN

A continuación se presentan las condiciones de cobertura y características de la red requeridas para llevar a cabo las pruebas de campo en la Ciudad de México. Estos requerimientos son genéricos y deberían cumplirse si finalmente la red se instala en otra localización.

Las **condiciones de cobertura de la red SFN ATSC** que se requieren para desarrollar las pruebas de campo son las siguientes:

1. Zonas dentro de la cobertura de la red en donde las señales tienen la característica de que entre ellas presentan una **diferencia de tiempos menor a 40 μ s**. La amplitud y el valor de tiempo de recepción

entre las señales es un parámetro fundamental para decidir si los receptores reciben correctamente según lo describe el documento ATSC A/74.

2. Zonas dentro de la red con la característica de que las señales recibidas presentan entre ellas una **diferencia de tiempos mayor a 40 μ s**. Estas zonas definirán nuevas relaciones de tiempo y amplitud entre las señales en donde se tiene buena recepción. Esto permite obtener nuevas máscaras del eco estático (como la mostrada en la Figura 4.1) para los ecualizadores de los receptores que se utilizarán en estas pruebas de campo y que los resultados a obtener delimitarán las zonas dentro de la cobertura de la red donde los receptores son capaces de recibir correctamente.
3. Como el nivel de campo recibido depende de la potencia de transmisión de los transmisores y de la distancia del receptor a cada uno de ellos, se pretende encontrar el valor de retardo entre las señales en zonas dentro de la cobertura de la red donde se reciben con el **mismo nivel de campo eléctrico**. Este valor de retardo nos define las áreas en donde se tiene pre-eco, dependiendo del tamaño del área se puede utilizar este valor para añadirlo en el tiempo de transmisión de un transmisor, con esto se definen nuevas zonas en donde los receptores reciben correctamente.
4. Adicionalmente, zonas en donde existe cobertura de un sólo transmisor. Esto permite estudiar el efecto de multitrayecto que se tiene en recepción debido sólo a este transmisor y a su entorno.

Para las **características de la red**, se propone que la red de transmisión esté conformada por dos transmisores. Son tres las razones principales para que sean sólo dos transmisores.

1. Dos transmisores es la mínima configuración para que se pueda implementar una red SFN, por lo que no pueden ser menos.
2. La segunda condición está relacionada con las condiciones de cobertura que esperamos tener en la Ciudad de México; se busca que la planificación de la red nos provea de la gran mayoría de escenarios de recepción que podemos encontrarnos en un entorno SFN, para alcanzar la mayor cobertura posible es necesario ubicar a los transmisores a la mayor distancia posible entre ellos y en las instalaciones donde ya se provee actualmente de servicios de radiodifusión, en específico de TV: estos lugares generalmente se encuentran en los extremos de la ciudad al norte y al sur y, pueden llegar a contar con una elevación mayor al de la ciudad, también dependerá del socio radiodifusor con el que se lleven a cabo las pruebas ya que puede o no llegar a contar con infraestructura en estos lugares.
3. Al evaluar los recursos económicos que han asignados al proyecto REFUTV, es factible el despliegue de la red con dos transmisores y que la campaña de pruebas en campo se lleve a cabo, sin embargo, no hay presupuesto suficiente para una red de tres transmisores.

Se espera que el análisis de los resultados que se obtengan a futuro de las pruebas de campo sean la base a considerar cuando se deseen implementar redes SFN ATSC de igual o mayor escala y en ambientes metropolitanos como el de la Ciudad de México.

4.4. Ubicación de la red SFN ATSC

La Ciudad de México se encuentra localizada a una latitud de 19.419444 Norte y a una longitud 99.145556 Oeste. En su orografía presenta algunas formaciones montañosas situadas al norte (Cerro del Zacatenco y del Chiquihuite) y sur (Sierra del Ajusco) de la ciudad. Las formaciones más representativas donde se ha instalado

infraestructura para servicios de radiodifusión tanto analógicos como digitales son el Cerro del Chiquihuite y las inmediaciones del cerro del Ajusco.

La ubicación de los dos transmisores ATSC estará a cargo de un socio radiodifusor. Muy posiblemente TV UNAM; esta estación televisiva al pertenecer a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se enfoca a participar en proyectos de investigación y en el desarrollo de nuevas tecnologías, por lo que se considera candidata idónea para participar y ser pionera en el despliegue de la tecnología de redes SFN ATSC en la Ciudad de México, además se desea que una vez cumplido el objetivo de las pruebas de campo la red quede operativa y sea en beneficio de la universidad.

Los sitios adecuados para la ubicación de los transmisores son aquellos en donde el socio radiodifusor ya cuenta con infraestructura para proveer servicios de radiodifusión y en caso de no contar con alguno, realizar la instalación en aquellos sitios donde otros radiodifusores ya lo ofrecen. Además, estos emplazamientos tienen la característica de que al estar operativos nos ofrecen una visión general de la zona de cobertura alcanzada (donde los servicios se reciben correctamente). Para el caso del socio con el que se piensa trabajar, la infraestructura con la que cuenta es la siguiente:

- TV UNAM, una estación transmisora de TV ubicada en el edificio del mismo nombre dentro de Ciudad Universitaria.

Teniendo en cuenta que la red SFN a implementar estará conformada por dos transmisores ubicados a la mayor distancia posible para otorgar las condiciones de cobertura requeridas para las pruebas de campo en la Ciudad de México, la elección de los emplazamientos transmisores tomará en cuenta los siguientes aspectos de infraestructura del socio radiodifusor. Para el caso de TV UNAM, este emplazamiento localizado al sur de la ciudad es ideal, pues ya se tiene una estación transmisora de televisión digital ATSC, bastaría con obtener el permiso ante el organismo correspondiente para solicitar un aumento de potencia de la estación. Este aumento de potencia radica en que el actual nivel sólo cubre la zona de Ciudad Universitaria y que para las pruebas se requiere una mayor área de cobertura, también se minimiza en cierta medida la adquisición de equipamiento de transmisión, acuerdos y tiempos para la puesta en operación.

Como una de las características requeridas para implementar la red SFN experimental es que cuente con el mayor número de entornos que se puedan encontrar en una SFN, la UNAM al no contar con más infraestructura es necesario que solicite ante la IFT² la ubicación de una nueva estación transmisora de TV al norte de la ciudad (muy posiblemente el Cerro del Chiquihuite) y la conservación y aumento de potencia de la estación que actualmente ya tiene (TV UNAM) y, así desplegar una red SFN con dos estaciones transmisoras. El Cerro del Chiquihuite cuenta con una gran cantidad de estaciones transmisores de TV, es el sitio que da mayor cobertura a la zona metropolitana de la ciudad por lo que es altamente recomendable situar al segundo transmisor en este lugar, sin embargo, colocar una nueva estación transmisora en este lugar significa que se ha otorgado el permiso correspondiente para obtener un espacio en una torre y ubicar a la antena transmisora, la colocación del equipo transmisor, enlaces de microondas o satelitales y de las instalaciones eléctricas requeridas.

Por estas razones, en la presente tesis se considerará que la ubicación de los dos transmisores serán los emplazamientos de TV UNAM y el Cerro del Chiquihuite. La Figura 4.2 muestra la ubicación de los transmisores sobre un mapa de elevación de la Ciudad de México y la Tabla 4.1 los detalles de los emplazamientos.

²Instituto Federal de Telecomunicaciones

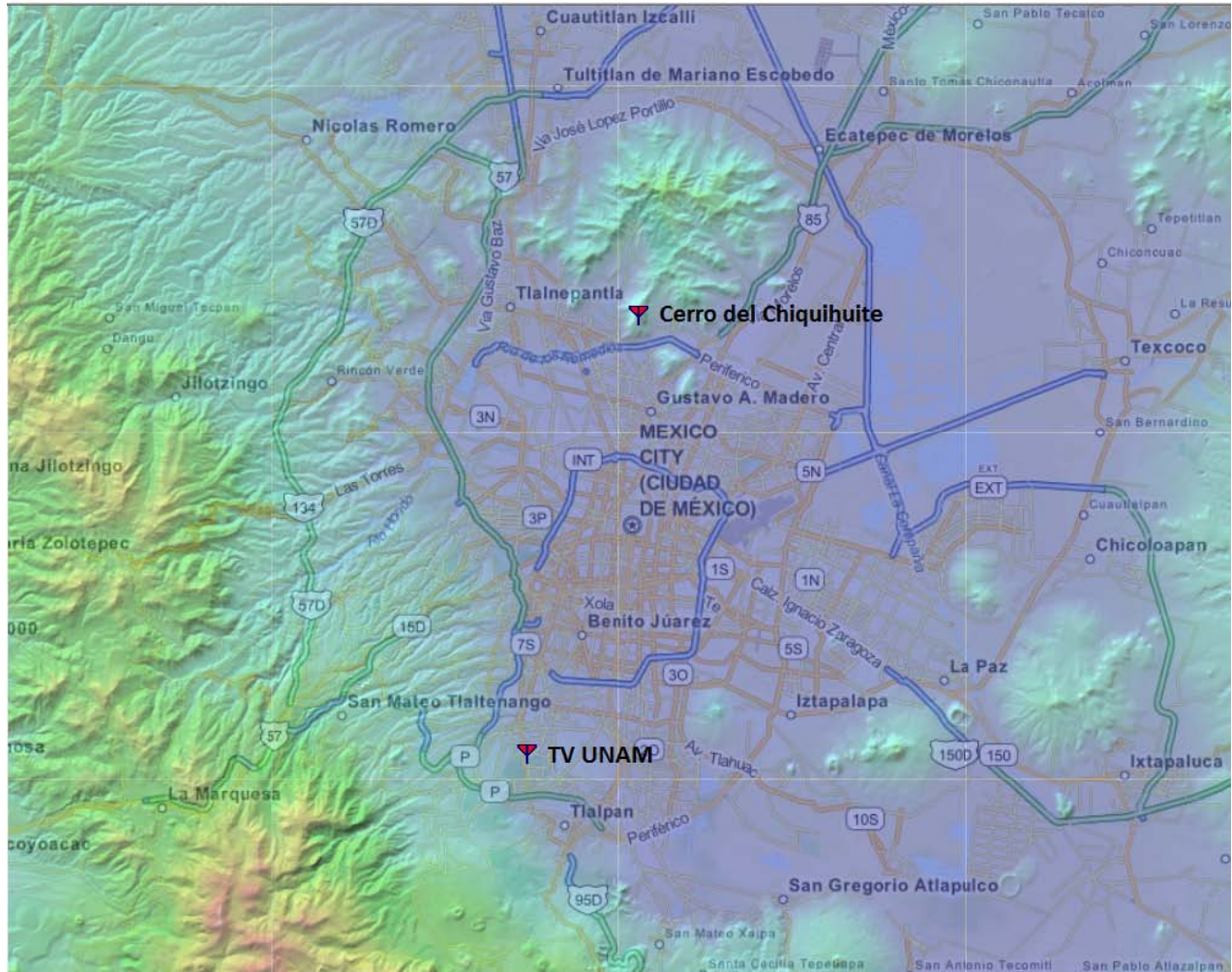


Figura 4.2: Ubicación de los transmisores ATSC en la Ciudad de México.

Estación Transmisora	Coordenadas Geográficas	Altura (msnm)
Cerro del Chiquihuite	19°31'58.00"N 99°07'50.00"O	2694.7
TV UNAM	19°19'22.19"N 99°11'11.68"O	2293.8

Cuadro 4.1: Detalles de ubicación de los transmisores ATSC.

4.5. Transmisores Distribuidos: configuración de la red SFN ATSC

Tal y como lo menciona ATSC A/74, las situaciones de pre-eco en recepción de una señal son las que más afectan el desempeño de los receptores, estas situaciones pueden minimizarse en un entorno SFN si se cambia la potencia y/o el tiempo de transmisión de la señal en los transmisores [3, 34].

Como se vio en la sección 2.4, una de las configuraciones para implementar redes SFN bajo el estándar ATSC es la de Transmisores Distribuidos (DTxTs) [4], la cual otorga la flexibilidad de configurar la potencia y tiempo de emisión de la señal para cada uno de los transmisores que conforman la red, de tal manera que para obtener distintas zonas de cobertura se pueden definir potencias y tiempos de transmisión (retardos de un transmisor con respecto del otro) y que permiten evaluar el impacto de las señales recibidas para diversos entornos de recepción.

Debido a que TV UNAM ya tiene transmisiones digitales, el canal de frecuencia a utilizar será el correspondiente al canal 20 digital (506 MHz - 512 MHz), canal que TV UNAM utiliza actualmente. Para realizar las pruebas de campo es necesario un aumento de la cobertura que actualmente posee y que sólo es Ciudad Universitaria.

4.6. Predicción de cobertura y campo eléctrico de la red SFN ATSC

Cuando se planifica una red de radiodifusión ya sea de TV o de radio, es necesario elegir la ubicación de las estaciones transmisoras, altura de las antenas con respecto del suelo, etc., o en su defecto corroborar que los sitios de transmisión y configuraciones con las que se cuenta actualmente sean los adecuados para la red que se planifica. En este punto es necesario el uso de modelos orientados a la simulación de la propagación de las ondas radioeléctricas en entornos que nosotros podemos caracterizar para que se acerquen en lo posible a los entornos reales y que nos ayudan a estimar la zona de cobertura de una red. Para estimar la zona de cobertura se puede hacer mediante la estimación de muchos parámetros, entre ellos el campo eléctrico, despeje de las zonas de fresnel, línea de vista entre transmisor y el receptor, etc. En la presente tesis, la predicción de cobertura de la red SFN ATSC mediante el nivel de campo eléctrico definido para ATSC en México nos ayuda a definir en cierta medida la potencia requerida en los transmisores pero principalmente los sitios en donde se llevarán a cabo las mediciones de la señal.

La estimación de campo eléctrico se realizó con el software Radio Mobile *v.11.5.8*³ que utiliza el modelo de predicción de propagación ITM (Irregular Terrain Model) también llamado Modelo Longley-Rice [6, 35], este software ya ha sido utilizado en la planificación de cobertura de varias pruebas de campo de radio digital DRM en la Ciudad de México [36] y en algunas partes del mundo [37, 38]. Además, el método Longley-Rice es el método que pide la IFT para estimar la cobertura de una transmisión digital de TV en el documento en donde se describe el acuerdo por el que se adopta el estándar ATSC en México y se establece su política de transición [2]. Antes de la estimación de campo, para garantizar que la ubicación de los sitios transmisores es la adecuada se estima el área en la que existe visión directa (LOS, de las siglas en inglés "*Line Of Sight*") entre un receptor ubicado a dos metros sobre el nivel del suelo a cada uno de los transmisores⁴. En la Figura 4.3 se muestra en color azul la cobertura visual de los transmisores del Cerro del Chiquihuite y TV UNAM sobre la Ciudad de México.

El software Radio Mobile no toma en cuenta la morfología del terreno, es decir, árboles, edificios, ambientes urbanos, etc., sólo considera el perfil del terreno. En la medición de la cobertura visual se consideró una

³Página Web Oficial: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>

⁴La razón de porqué esta altura se define sistema de medidas en la sección 5.5.1 referente a la adquisición de la señal de RF.

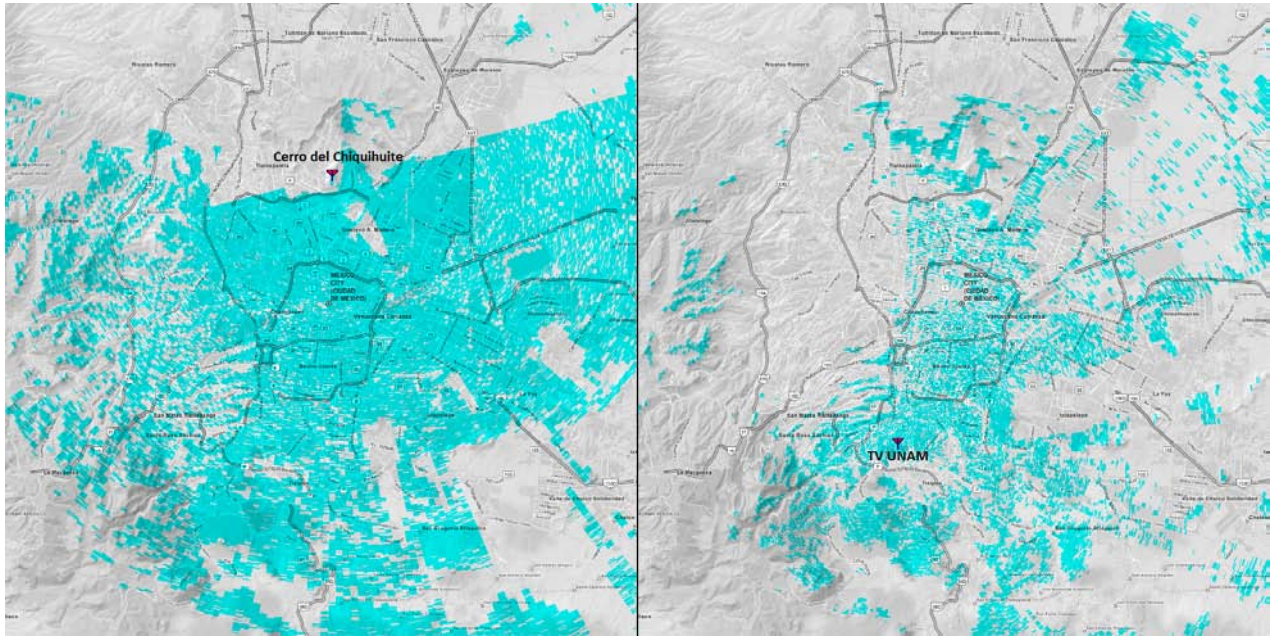


Figura 4.3: Visión directa de los transmisores Cerro del Chiquihuite y TV UNAM en la Ciudad de México.

altura constante para las antenas del Cerro del chiquihuite y para TV UNAM de 30 metros, estos valores fueron definidos con el fin de obtener una cobertura visual con características reales de los transmisores, los cuales generalmente tienen las antenas transmisoras ubicadas a estas alturas al nivel del suelo ya sea que se encuentren en una torre transmisora (Cerro del Chiquihuite) o en el techo de un edificio como es el caso de TV UNAM. Como se puede ver en la Figura 4.3, el transmisor del Cerro del Chiquihuite proporciona una cobertura visual casi en toda la ciudad; en cambio el transmisor TV UNAM al encontrarse casi al nivel de la ciudad sólo la proporciona en sus cercanías.

4.6.1. Umbral de campo eléctrico para ATSC en México y parámetros de estimación de campo

Con el finalidad de evaluar la cobertura de cada uno de los sitios transmisores y de la red SFN que será formada entre ellos, se calcula el campo eléctrico que se tiene en la zona de cobertura. Para ello debemos conocer el umbral de campo eléctrico de ATSC definido para México.

Cuando México adopta a ATSC como su estándar de televisión digital terrestre, en los acuerdos se fijó el valor de $41 \text{ [dB}\mu\text{V/m]}$ como el umbral mínimo de recepción de la señal ATSC [2]. Posteriormente se modificó el valor a $35 \text{ [dB}\mu\text{V/m]}$ para los canales 2 al 6, $43 \text{ [dB}\mu\text{V/m]}$ para los canales 7 al 13 y, $48 \text{ [dB}\mu\text{V/m]}$ para los canales 14 al 51 [6]. En el presente trabajo la estimación del campo eléctrico se realizó para el canal 20 digital (506 MHz - 512 MHz), este canal como ya se mencionó anteriormente es el que actualmente tiene operando TV UNAM para la transmisión de servicios de TV digitales.

La estimación del campo se realizó con un valor umbral de campo eléctrico de $48 \text{ [dB}\mu\text{V/m]}$. A continuación se muestra la lista de parámetros con las que se realiza la estimación de campo eléctrico [39] y que fueron definidos en el software Radio Mobile (ver Figura 4.4) tratando de reproducir en lo posible las condiciones del terreno en la Ciudad de México, algunos de estos parámetros están definidos en la *Política para la Transición Digital Terrestre* que se publicó en la Gaceta del Diario Oficial de la Federación de México en Septiembre de 2014 [6]:

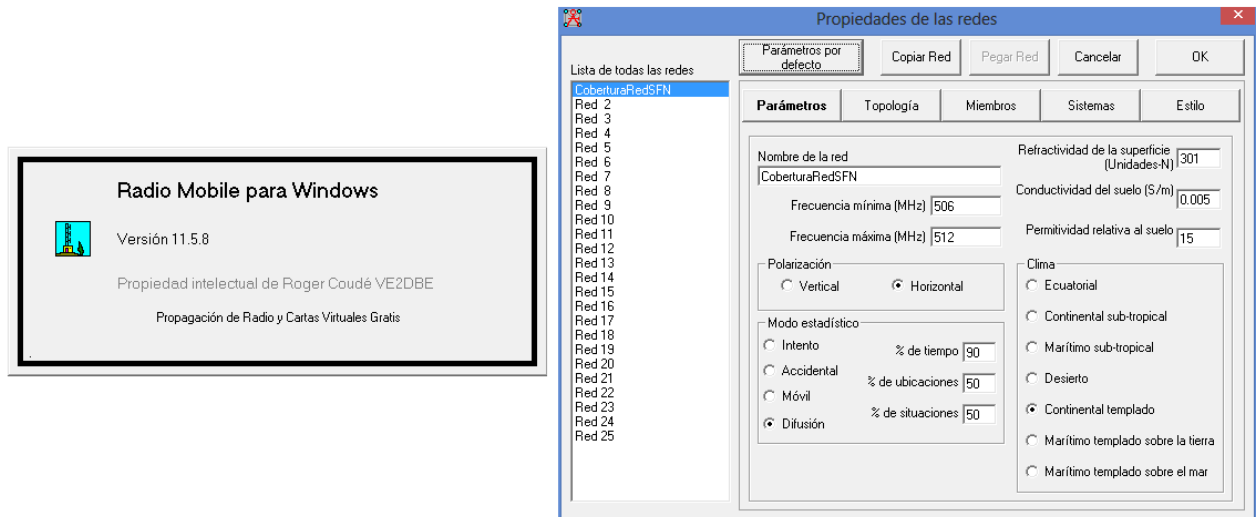


Figura 4.4: Versión del programa Radio Mobile y definición de parámetros para estimación del campo eléctrico.

- Conductividad del suelo: 5 [mS/m].
- Permitividad relativa al suelo: 15.
- Refractividad del suelo: 301 unidades N.
- Clima: Templado continental.
- Polarización: Horizontal.
- Rango de frecuencias: Canal 20 digital (506 - 512 MHz).
- Perdidas adicionales por ciudad o por bosque: 0 %.
- Probabilidad de tiempo: 90 % [6].
- Probabilidad de localización: 50 % [6].
- Probabilidad de situación: 50 % [6].

4.6.2. Escenarios de transmisión y evaluación de cobertura

Habiendo definido la ubicación de los dos transmisores que conformarán la red SFN ATSC, lo que sigue a continuación es encontrar los requerimientos de potencia de transmisión de cada transmisor de tal manera que se tenga una zona de cobertura en la red lo suficientemente grande para realizar las pruebas de campo.

En la Figura 4.5, se observa que el centro transmisor del Cerro del Chiquihuite está elevado 452 metros sobre la Ciudad de México, mientras que el centro transmisor de TV UNAM se encuentra casi al mismo nivel que la ciudad (aproximadamente sólo 55 metros por encima del Zócalo o centro de la ciudad). Así mismo se tiene que la distancia entre los dos transmisores es de 24.079 km. Al considerar la altura del transmisor Cerro del Chiquihuite y de su cobertura visual sobre la ciudad, se decide usar un transmisor más potente en esta ubicación con la finalidad de que éste transmisor de cobertura en la mayor parte de la ciudad, por lo tanto, el transmisor de TV UNAM al tener un transmisor menos potente servirá de apoyo a la zona de cobertura que ya existe al lograr incrementar el nivel de cobertura en porcentaje de tiempo y/o de localizaciones en que la señal es correctamente recibida, además se espera que una vez concluidas las pruebas la red quede operativa sin que sufra cambios drásticos en la potencia de transmisión.

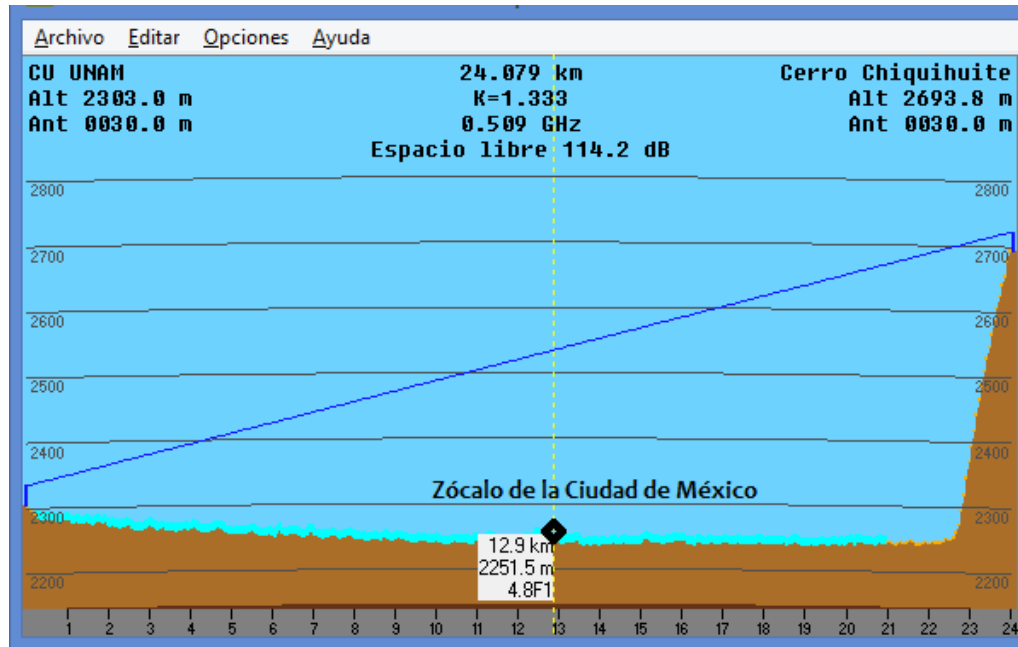


Figura 4.5: Perfil del terreno entre los transmisores sobre la Ciudad de México.

Escenario	Potencia de los transmisores
SFN ATSC 1	Cerro del Chiquihuite, 1.5 kW TV UNAM, 0.5 kW
SFN ATSC 2	Cerro del Chiquihuite, 3 kW TV UNAM, 1 kW

Cuadro 4.2: Configuración de los escenarios propuestos para el despliegue de la red SFN ATSC en la planificación de las pruebas de campo.

Para definir los requerimientos de potencia de cada transmisor y considerando que trabajarán bajo el esquema de Transmisores Distribuidos (DTxTs), se definen dos escenarios de potencia para la red (la descripción de cada uno de ellos se hace más adelante). El objetivo de definir dos escenarios es evaluar con cuál de ellos se tiene la mayor cobertura dentro de la ciudad, lo que garantizará el cumplimiento de las condiciones de cobertura requeridas para llevar a cabo las pruebas de campo y que se definieron al inicio del presente capítulo.

Cada escenario tiene definida una potencia para cada transmisor; esta potencia considera la ya mencionada relación de potencia que debe haber entre los transmisores y utiliza valores menores a los típicos de potencia utilizada para la radiodifusión de DTV en México [40]. En ambos transmisores se usa una antena direccional para favorecer la radiación de la señal sobre la zona a la que se desea dar cobertura: la Ciudad de México. La antena direccional es para radiodifusión de DTV y tiene una ganancia de 4 [dBi]. Para cada transmisor, el patrón de radiación de la antena direccional considera su orientación (azimut) tratando de seguir dos condiciones, primero en dirección hacia el centro de la Ciudad de México (la zona a la cual se dará cobertura) y segundo, en la dirección del radial en donde se tiene la mayor cobertura visual en la ciudad ya que esto nos garantiza una mayor cobertura en dicha dirección debida a la presencia mínima de obstáculos naturales. De la evaluación de los dos escenarios que se muestran en la Tabla 4.2 se espera obtener el escenario que asegura un buen nivel de señal y una extensa área de cobertura de la red SFN sobre la Ciudad de México.

A continuación se muestra la evaluación de cobertura que se obtuvo con cada uno de los escenarios de la Tabla 4.2. De los dos escenarios mostrados se eligió el que cumple con los requerimientos de cobertura para realizar la campaña de pruebas, es decir, el escenario elegido es el que proporciona la mejor cobertura y engloba la mayor cantidad de entornos de recepción para llevar a cabo las pruebas. Para cada escenario, cada imagen ilustra el área de cobertura que se tiene con la red SFN ATSC de la siguiente manera: el color azul es utilizado para indicar el área de cobertura que sólo es alcanzada por el transmisor Cerro del Chiquihuite, el color amarillo indica lo mismo pero para el transmisor TV UNAM, finalmente el color verde indica la cobertura alcanzada por los dos transmisores, es decir, el área en donde tenemos una red SFN⁵.

La Figura 4.6 nos muestra el área de cobertura alcanzada por el escenario SFN ATSC 1. Se observa que con bajos niveles de potencia en los transmisores no garantizan una suficiente cobertura de la red SFN sobre la ciudad pues la cobertura sólo está definida en los alrededores del transmisor TV UNAM. El estudio de la recepción en este escenario no permite cumplir con todas las condiciones de cobertura esperadas para llevar a cabo las pruebas de campo y que son obtener el mayor posible número de entornos de recepción que se puede encontrar dentro de una red SFN.

El aumento de potencia en los dos transmisores da origen al escenario SFN ATSC 2 (Figura 4.7). El transmisor Cerro del Chiquihuite tiene definida una potencia mayor de tal manera que éste da cobertura en la mayor parte de la ciudad, también, al incrementarse la potencia del segundo transmisor (TV UNAM) aumenta la zona de solape entre de las dos señales que es prácticamente la zona de cobertura de la red SFN. Como se observa, el segundo transmisor (TV UNAM) no aumenta la zona de cobertura sobre la ciudad que ya tiene el transmisor Cerro del Chiquihuite, lo que hace es definir la red SFN dentro de la cobertura que ya existe y aumenta en porcentaje de tiempo y localización el nivel de la señal que se tiene en recepción. El escenario SFN ATSC 2 permite el estudio de la recepción de las señales con grandes retrasos entre ellas y con efectos de multitrayecto en entornos muy específicos, por ejemplo cerca de aeropuertos, estaciones de metro al aire libre y/o la presencia densa de edificios y de vegetación. Este escenario proporciona las condiciones necesarias de cobertura que se buscan en la planeación de las pruebas de campo (definidas en la sección 4.3).

Como la red SFN consta de dos transmisores, es posible que se lleven a cabo mediciones cuando uno de ellos esté encendido y el otro apagado. Estas mediciones ayudan al socio radiodifusor a evaluar la cobertura que alcanza con un sólo transmisor. A continuación la idea general de la operación de la red para el cual se han planeado las pruebas de campo.

4.6.2.1. Modo Transmisor Único

En este modo, el transmisor TV UNAM será el único que se encuentre encendido y transmitiendo. El hecho de elegir el transmisor de TV UNAM es por que se desea evaluar la zona de cobertura del transmisor que tiene la menor potencia y que se encuentra situado relativamente al nivel de la ciudad para evaluar la viabilidad de instalar transmisores de baja potencia dentro de zonas urbanas. Además, el transmisor TV UNAM al encontrarse en Ciudad Universitaria (UNAM) cuenta con un entorno muy característico y que es casi imposible encontrar en otra zona de la ciudad.

Ciudad Universitaria, conocida coloquialmente como CU, es el conjunto de edificios y espacios que conforman el campus principal de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicada en las cercanías del Pedregal de San Ángel, al sur de la Ciudad de México. CU alberga una reserva ecológica, aloja cerca de mil edificios, cuenta con un espacio escultórico de proporciones colosales y con un estadio olímpico. Su extensión

⁵Se escogieron dos colores primarios para representar la zona de cobertura de cada transmisor, de tal manera que cuando tenemos el traslape de las dos señales (cobertura de la red SFN ATSC) se garantiza que esta zona se mostrará de manera gráfica como el color secundario que resulta de la combinación de los dos anteriores (Azul + Amarillo = Verde).

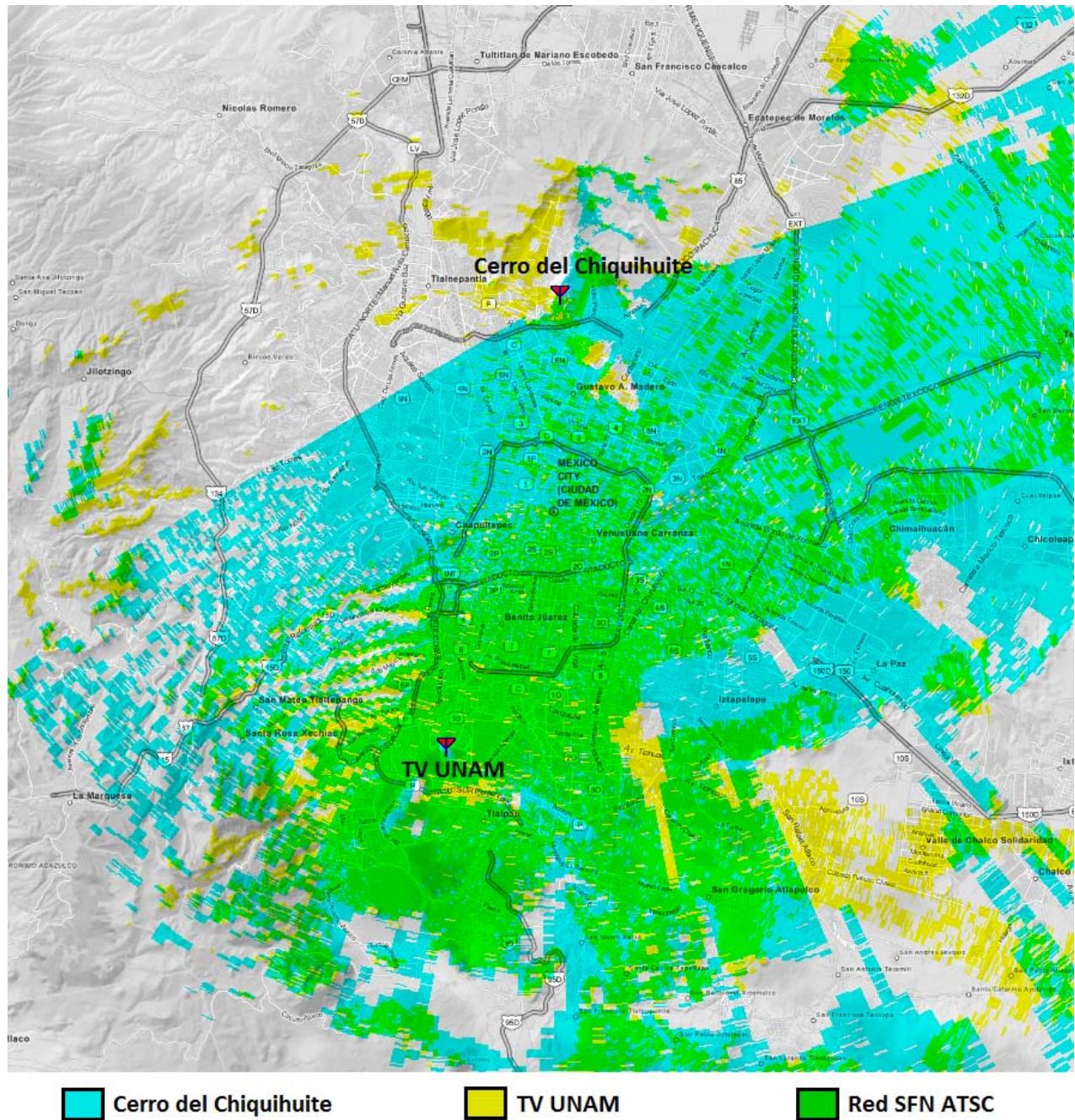


Figura 4.6: Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 1.

es de aproximadamente 7 km^2 , esta extensión es comparable con algunas ciudades de Europa e incluso con los países más pequeños del mundo como el Vaticano y Mónaco. Se espera que la presencia de edificios y de vegetación ocasionen efectos a la señal de DTV de manera significativa.

4.6.2.2. Modo SFN: Sincronismo en la transmisión de señales

Este modo de operación es la red SFN ATSC. La principal limitante para la correcta recepción de los receptores en una red SFN ATSC es la ubicación del receptor con respecto de los transmisores ya que esto se traduce en retrasos con que llegan las señales de los dos transmisores y además se añade retraso debido a obstáculos naturales y/o artificiales que se encuentran a lo largo de la propagación de la señal.

En primera instancia se evaluará el desempeño de los receptores cuando la red está sincronizada; la tecnología de los receptores ha mejorado en los últimos años y evaluar la capacidad y desempeño cuando se tienen situaciones de pre-eco o post-eco (descritos en la sección 4.2) permitirá conocer las zonas donde se tiene buena recepción y en donde no.

Con objeto de evaluar el impacto de la recepción de las señales en la zona de cobertura inicial (red sincronizada), se puede definir un valor de retraso que se añade a alguno de los transmisores de la red con el fin para ampliar las zonas de recepción, minimizar las situaciones de pre-eco y/o mover la cobertura de la red donde los receptores son capaces de recibir bien. Un posible valor de retardo que se puede configurar para un escenario de este tipo se aborda en el capítulo 6.

4.7. Resumen de la definición de parámetros de la red de transmisión experimental

En esta sección se resumen los principales parámetros de operación de la red SFN ATSC que se desplegará en la Ciudad de México y que cumple con las condiciones y características de cobertura para llevar a cabo las pruebas de campo.

La red SFN será desplegada por el socio radiodifusor TV UNAM. La red, estará compuesta por dos estaciones transmisoras ubicadas en sitios donde actualmente ya se provee de servicios de TV y que son el Cerro del Chiquihuite ubicado al norte de la Ciudad de México y el emplazamiento de TV UNAM situado en las inmediaciones de Ciudad Universitaria. La distancia entre los transmisores es de 24.079 km. La frecuencia de operación de la red será el canal 20 digital (506 MHz - 512 MHz), canal que actualmente tiene asignado la radiodifusora TV UNAM para la radiodifusión de DTV.

La red SFN será implementada siguiendo las especificaciones que recomienda la organización ATSC en la documentación ATSC A/110 y ATSC A/111 [3, 4]: la configuración de Transmisores Distribuidos, la cual ofrece gran flexibilidad para ajuste de potencia y tiempo de transmisión de cada uno de los transmisores. Se usarán en ambos transmisores antenas direccionales con una ganancia de 4 [dBi]. La instalación de las antenas transmisoras será a una altura de 30 metros con respecto del nivel del suelo.

La potencia de operación del transmisor Cerro del Chiquihuite será mayor en comparación con la del transmisor TV UNAM, se definió esta relación de valores esperando que una vez concluidas la pruebas de campo la red SFN quede operativa y que en caso de que requiera un ajuste de potencia éste no sea drástico. También se busco que los niveles de campo que se tengan en recepción y que dependen de la potencia de transmisión y de la distancia a la que se encuentra el receptor de los transmisores sean niveles de campo fuerte, esto permite que los estudios se realicen en presencia de señales fuertes y a que el nivel de campo no sea nulo

para cualquier ubicación del receptor dentro de la zona de cobertura. Los valores de potencia propuestas para los transmisores fueron los siguientes:

- El transmisor Cerro del Chiquihuite con 3 [kW] de potencia. Este transmisor al ubicarse a mayor altura sobre el nivel promedio de la ciudad proporciona gran cobertura sobre la misma.
- El transmisor TV UNAM operará con una potencia de 1 [kW]. El transmisor TV UNAM define la red SFN sobre la cobertura del transmisor Cerro del Chiquihuite, este transmisor ayuda a incrementar los niveles de la señal en recepción vistos como porcentajes de tiempo y de localizaciones.

Con los parámetros de la red anteriormente enlistados, se logra obtener una zona de cobertura lo suficientemente grande en la ciudad y que además cumple con las condiciones de cobertura requeridas para llevar a cabo la campaña de pruebas.

Los parámetros de la red que se definen a partir de las condiciones de cobertura (sección 4.3) son genéricos y deberán de cumplirse en caso de que la red se despliegue en otra parte de la ciudad o zona urbana similar.

Capítulo 5

Metodología para la medición y sistema de medidas en campo

El presente capítulo expone la metodología para la medición en campo. La metodología está basada en los objetivos de las pruebas de campo y en aquellas posibilidades de medición que se tienen en las diferentes zonas de la ciudad donde se ubica la red de transmisión. El capítulo comienza con la descripción general de la metodología de medición en campo incluyendo el tipo de mediciones y el ambiente en que serán realizadas, se definen los principales parámetros de la señal que serán medidos en la campaña de pruebas. También se define el equipamiento a utilizar en las pruebas de campo y que permitirá comprobar en entornos reales algunos de los resultados de pruebas de laboratorio y/o estimaciones informáticas que se han realizado previamente. Para definir el sistema de medidas se tomó en cuenta que el equipamiento a utilizar debe ser un reflejo de todos los objetivos de la planeación de las pruebas y que será capaz de medir los parámetros de medición que se desean evaluar. También se tomaron en cuenta algunas de las recomendaciones que realiza la ITU para mediciones de cobertura de TV digital [41], la Guía para evaluación del desempeño de los receptores: ATSC A/74 [34] y diversos sistemas de equipamiento utilizados en pruebas de campo para redes SFN sobre ATSC y para los otros estándares de DTV terrestre [29–33, 42–44].

5.1. Descripción general de la metodología

En cumplimiento con los objetivos descritos en el capítulo 4, la medición de la recepción de la señal ATSC se llevará a cabo en recepción estática o también conocida como recepción fija [41]. A parte de que este tipo de medición es más sencilla en comparación con la recepción móvil, por ahora en México no se cuenta con una disponibilidad comercial de receptores ATSC para recepción en movimiento, es por ello que la transmisión de la señal en la red SFN será en cumplimiento con las norma ATSC A/53 [14]: documentación definida para el estándar de recepción fijo de ATSC.

5.2. Modo de recepción

Se ha observado que en anteriores pruebas de campo realizadas sobre redes SFN para el estándar fijo de ATSC se han realizado en su mayoría mediciones en el modo de recepción fijo pues ni los receptores ni el estándar ATSC están diseñados para la recepción móvil.

5.2.1. Mediciones estáticas en exteriores e interiores

Las mediciones en recepción fija dan la posibilidad de estudiar la variación que presenta en el tiempo la señal que recibe un receptor. Se ha planeado que las mediciones estáticas se lleven a cabo en ambientes exteriores e interiores. Según el informe UIT-R BT.2035-2 (11/2008), la recepción fija se define como la recepción con un receptor y una antena receptora que permanecen inmóviles. Típicamente incluye una antena montada sobre un tejado o sobre el techo de una camioneta que es utilizada para trasladar el equipamiento al lugar de medición (recepción en exteriores), o una antena fija en interiores (recepción en interiores) [41]. De los dos tipos de recepción, la recepción en exteriores es la más importante, por lo que será ésta la primera que se quiere probar, además las mediciones en exteriores ayudarán a registrar los aspectos de orientación de la antena que influyen en la capacidad del receptor para decodificar adecuadamente la señal que esté recibiendo, la mayor parte de los puntos de medición se va a definir para ambientes exteriores y serán definidos en calles y avenidas principalmente. Las mediciones en interiores abarcarán lugares cerrados tales como plazas, estacionamientos y/o casas habitación, el número de medidas según se recomienda deberá ser el correspondiente a la quinta parte del número de emplazamientos utilizados para medición en exteriores y en donde se presenta un buen nivel de campo de la señal [41].

Para cada una de las medidas fijas, estas serán definidas sobre la predicción del área de cobertura de la red. Para el traslado al lugar de medición en exteriores se empleará una unidad móvil que será provista con todo el equipamiento necesario para registrar la medidas que ayudarán a cumplir con los objetivos de la planeación de las pruebas de campo, para las medidas en interiores se desplazará el equipamiento necesario al lugar de la medida.

5.3. Parámetros de medida

En esta sección se describen los principales parámetros a medir para caracterizar la recepción de la señal ATSC operando bajo una red SFN. El principal parámetro para resultados es el TOV de los receptores (descrito a continuación), otros parámetros están clasificados de acuerdo al tipo de información que proveen: características de calidad de recepción de la señal ATSC y de las características de las condiciones de recepción de la señal ATSC. La información de calidad de recepción de la señal ATSC se va obtener con la medición del MER utilizando el equipo adecuado. La información de las condiciones de recepción de la señal se harán para conocer las características del canal de propagación y se obtendrán midiendo la intensidad del campo eléctrico, el espectro y la respuesta impulsional del canal. A continuación se describen algunos parámetros de medición que se desean medir.

5.3.1. TOV (Threshold Of Visibility) o Umbral de visibilidad

Para medir si el desempeño de cada receptor ATSC en cada uno de los puntos de medición es bueno o malo se encontrará el número de fallas que presenta un receptor para un determinado tiempo de medición, este parámetro es el llamado TOV. El umbral de TOV dentro del proyecto REFUTV para el cual el receptor bajo prueba tiene mala recepción se ha definido tomando como criterio la existencia de al menos dos errores visibles en un período de un minuto de observación de la señal recibida, este criterio también sigue las directrices recomendadas para la evaluación de receptores en pruebas de laboratorio que recomienda la organización ATSC [34]. Para cada receptor, en base al parámetro TOV, se medirá el valor de campo eléctrico con el cual se tiene buena recepción.

5.3.2. MER

El MER indica la calidad de la señal ATSC recibida, este parámetro se puede ver como una medida de la desviación de los valores recibidos que presenta la constelación 8-VSB con respecto de los valores ideales de dicha constelación.

5.3.3. Campo eléctrico

El umbral de campo eléctrico será medido para determinar el nivel de cobertura de la red SFN ATSC, el valor se puede obtener directamente a través del equipamiento adecuado y del valor de sensibilidad de potencia medido por el mismo. Para encontrar el umbral de campo eléctrico en el que se tiene aún una buena recepción se cotejarán los valores de campo eléctrico con los obtenidos al evaluar el parámetro TOV. La siguiente sección muestra la relación de conversión entre un valor de campo eléctrico y un valor de potencia que se recibe.

5.3.3.1. Conversión del valor de campo eléctrico recibido a su equivalente en potencia

A continuación se presentan las fórmulas y procedimiento necesario para realizar la conversión de un valor de campo eléctrico medido en $[dB\mu V/m]$ a su equivalente valor en potencia expresado en $[dBm]$. Los valores de potencia en $[dBm]$ son generalmente un parámetro proporcionado por los fabricantes de receptores para indicar el nivel de potencia de la señal que pueden tener a su entrada, lo que se conoce como sensibilidad de potencia. Al final de la presente sección, se presenta la conversión para el umbral de campo eléctrico definido en México para los canales 14 al 51 (470 - 698 MHz), de 48 $[dB\mu V/m]$ a su correspondiente valor de potencia en $[dBm]$, se considera la frecuencia central del canal 20 digital (509 MHz) y dos antenas en recepción: una omnidireccional con ganancia de 0 $[dBi]$ y otra directiva con ganancia de 4 $[dBi]$.

La densidad de potencia radiada que presenta una señal dado un valor de campo eléctrico está expresada por la fórmula:

$$W_i = Re \left[\vec{E} \times \vec{H}^* \right] = \frac{|E|^2}{\eta} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

donde:

$W_i \rightarrow$ Densidad de potencia radiada $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

$\vec{E} \rightarrow$ Vector de campo eléctrico $\left[\frac{V}{m} \right]$

$\vec{H} \rightarrow$ Vector de campo magnético $\left[\frac{A}{m} \right]$

$\eta \rightarrow$ Impedancia característica del medio, para el espacio libre es $120 \pi \left[\Omega \right]$

Y la potencia recibida dado un valor de densidad de potencia $W_i \left[\frac{W}{m^2} \right]$:

$$P_{rx} = \frac{W_i \lambda^2 G_r}{4 \pi} \left[W \right]$$

donde:

$\lambda \rightarrow$ Longitud de onda de la señal $[m]$

$G_r \rightarrow$ Ganancia de la antena receptora $[dBi]$

El valor de potencia expresado en $[W]$ se convierte finalmente a un valor de dBm :

$$P_{rx} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{rx}}{1 \times 10^{-3}} \right) [dBm]$$

Ejemplo:

El siguiente ejemplo muestra la conversión del umbral de campo eléctrico definido en México para los canales 14 al 51 (470 - 698 MHz), de $48 [dB\mu V/m]$ a su correspondiente valor de potencia en $[dBm]$, este valor de potencia representa la sensibilidad que debe tener un receptor ATSC para recibir correctamente una señal de DTV que esté dentro del rango de estas frecuencias.

Considerando la frecuencia central de una señal transmitida en el canal 20 digital (506 - 512 MHz) y, que la antena en recepción es omnidireccional con una ganancia de $0 [dBi]$ e impedancia de $75 [\Omega]$, tenemos:

$$W_i = \frac{|E|^2}{\eta} = \frac{\left(10^{\frac{48}{20}} \times 10^{-6} \right)^2}{120 \pi} = 167,3666338 \times 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Calculando la potencia recibida:

$$P_{rx} = \frac{W_i \lambda^2 G_r}{4 \pi} = \frac{(167,3666338 \times 10^{-12}) \left(\frac{3 \times 10^8}{509 \times 10^6} \right)^2 \left(10^{\frac{0}{10}} \right)}{4 \pi} = 4,6266427 \times 10^{-12} [W]$$

Finalmente, la sensibilidad de potencia que deben tener los receptores para recibir en el umbral del canal 20 digital:

$$P_{rx} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{rx}}{1 \times 10^{-3}} \right) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{4,6266427 \times 10^{-12}}{1 \times 10^{-3}} \right) = -83,347 [dBm]$$

Si se quiere conocer el valor de voltaje $[V]$ de la señal que se recibe a la entrada de los receptores, se toma en cuenta el valor de la potencia recibida P_{rx} en $[W]$ y la impedancia de entrada del receptor (R), que debe ser la misma que la impedancia de la antena receptora:

$$V_{rx} = \sqrt{P_{rx} \times R} = \sqrt{(4,6266427 \times 10^{-12}) (75)} = 18,62788 [\mu V]$$

Cuando se considera una **antena direccional en recepción con ganancia de 4 [dBi]**, del valor calculado de $W_i = 167,3666338 \times 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ se calcula la potencia recibida:

$$P_{rx} = \frac{W_i \lambda^2 G_r}{4 \pi} = \frac{(167,3666338 \times 10^{-12}) \left(\frac{3 \times 10^8}{509 \times 10^6} \right)^2 \left(10^{\frac{4}{10}} \right)}{4 \pi} = 11,62160103 \times 10^{-12} [W]$$

Finalmente, la sensibilidad de potencia que deben tener los receptores para recibir en el umbral del canal 20 digital cuando utilizan una antena direccional de 4 [dBi]:

$$P_{rx} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{rx}}{1 \times 10^{-3}} \right) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{11,62160103 \times 10^{-12}}{1 \times 10^{-3}} \right) = -79,347 [dBm]$$

Como se pudo observar, el valor de potencia que recibe un receptor depende del tipo de antena que sea utilizada en la recepción de la señal, utilizar una antena direccional significa un aumento en el nivel de potencia que se tiene a la entrada de un receptor en comparación con el valor que se tiene con una antena omnidireccional;

específicamente, el incremento de potencia que se tiene al utilizar una antena direccional es equivalente a su ganancia en [dBi]. El incremento en el nivel de potencia a la entrada de un receptor no garantiza el buen desempeño del mismo, ya que dependerá de la ubicación que tenga éste con respecto del transmisor y del entorno ya que pueden generarse condiciones de multitrayecto, por lo tanto, las señales que llegan al receptor presentan adición de retardo debido a la distancia y al entorno que indudablemente condicionarán su funcionamiento y que está ligado a la capacidad que tiene su ecualizador para revertir estos efectos.

5.3.4. Respuesta impulsional del canal

La respuesta impulsional del canal involucra la dispersión temporal y espacial de la señal. Este parámetro es muy importante porque además de que servirá para conocer cómo es el canal de propagación en la Ciudad de México bajo una red SFN ATSC con dos transmisores, la respuesta impulsional del canal delimitará el funcionamiento de un receptor dentro de la misma. La implementación de cada receptor, en especial de su ecualizador de canal es lo que permite determinar si éste puede o no recibir correctamente la señal. Una vez que se conoce la respuesta genérica del receptor al multitrayecto del canal inalámbrico, se pueden definir algunos parámetros a implementar en los transmisores que conforman la red SFN de tal manera que se logra cambiar la dispersión temporal y por ende la espacial de la señal al modificarse las áreas de recepción en donde los receptores funcionan correctamente.

5.4. Caracterización del ruido

Como primer paso antes de realizar las mediciones en campo, se llevarán a cabo medidas con los dos transmisores que conforman la red SFN ATSC en estado inactivo, es decir, los transmisores no estarán encendidos y el equipo de medidas será sintonizado en el canal de frecuencia que se usará en la pruebas en ciertos lugares definidos para la medición, en resumen, el ruido se caracterizará dentro del canal de frecuencia en que opera la red SFN.

En las bandas de UHF tenemos una frecuencia alta lo que ocasiona que se tenga una longitud de onda menor en comparación con la que se tiene en VHF, considerando que la zona de cobertura de la red SFN ATSC es la Ciudad de México, en un ambiente en su mayoría urbano es de vital necesidad analizar la influencia del entorno en la señales que se tienen en recepción. El objetivo de medir lo anterior es para obtener el nivel de ruido artificial en los puntos de medición. Este valor será de utilidad para identificar aquellos puntos que, por causas ajenas a las transmisiones y no previstas pueden afectar la recepción de la señal ATSC, esto ayudará a evitar formular conclusiones erróneas acerca de la mala recepción en algún punto, además puede servir para tomar decisiones para tratar de minimizar el efecto negativo que esto ocasiona y que pueden ir desde un aumento en la potencia de transmisión de la red SFN ATSC, cambio del patrón de radiación de los transmisores y/o la definición de nuevos lugares de medición dentro de la zona de cobertura; de esta manera también se tiene como referencia el valor de piso de ruido del entorno y del equipamiento de medidas el cual se podrá considerar en el posterior análisis de los datos de las pruebas de campo.

5.5. Descripción general del sistema de medidas

Las pruebas de campo consistirán en evaluar el desempeño de receptores comerciales de televisión digital ATSC¹ bajo una red experimental SFN ATSC. Para optimizar los recursos disponibles (costos y tiempos); se implementará un sistema que permita recibir, muestrear y guardar la señal de RF de la red SFN ATSC. El

¹Los receptores comerciales a utilizar se describen de manera genérica más adelante en la sección de equipamiento

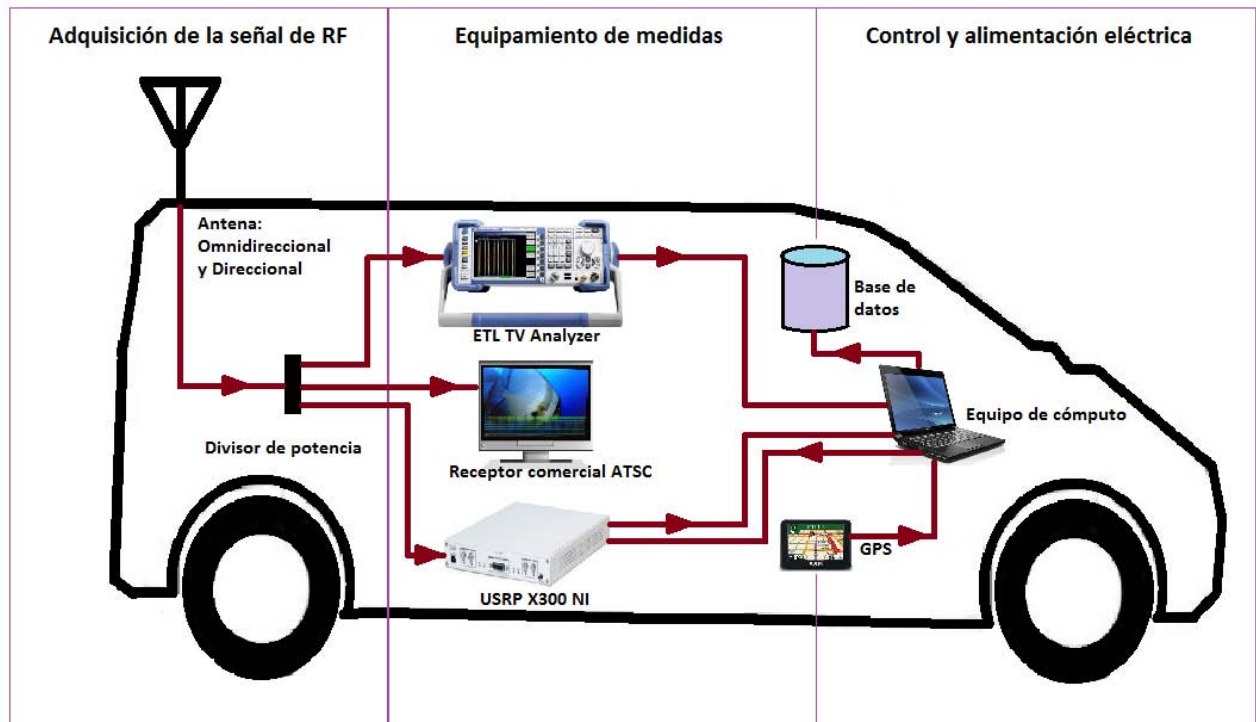


Figura 5.1: Diagrama del equipamiento de medidas a utilizar en las pruebas de campo.

El sistema anterior tiene como objetivo permitir repetir la medida en el laboratorio con cada receptor evitando el traslado de cada uno de ellos al lugar de medición, es decir, brindará la posibilidad de que posteriormente en laboratorio se reproduzca la señal y se analice el desempeño de los receptores las veces que sean necesarias además de asegurar de esta forma que en todos los receptores se probarán exactamente con las mismas señales. Para llevar a cabo este objetivo, es necesario contar con el equipamiento y accesorios adecuados que permitirán implementar el sistema de medición de forma segura y eficiente.

El sistema de medidas tiene tres partes que se muestran en la Figura 5.1. La primera, adquisición de la señal de RF, es la encargada de la captación de la señal y pasarla a la siguiente parte del sistema. El segundo sistema es la del equipamiento de medidas, sistema encargado de medir los parámetros de la señal y de su respectivo almacenamiento en una base de datos. Finalmente, la parte de control y alimentación, será la encargada de controlar a todo el equipamiento de medidas y de proporcionarle alimentación eléctrica.

Para poder llevar a cabo las medidas de manera efectiva se equipará una unidad móvil. Esta unidad móvil será utilizada para transportar al equipamiento y personal de medición a los lugares de medidas. Las características de estos sistemas se describen a continuación.

5.5.1. Adquisición de la señal de RF

El sistema de RF está encargado de la captación de la señal del aire. Siguiendo las recomendaciones de la guía ATSC A/74, el sistema estará formado por dos antenas calibradas para la recepción, una antena directiva y otra no directiva ambas para las bandas VHF-UHF [34]. Las razones principales por las cuales se usarán dos antenas serán las siguientes:

- Las mediciones con la antena omnidireccional permitirán considerar todas las señales multitrayecto que estarían llegando al receptor.

- Hacer mediciones con una antena direccional otorga a la posibilidad de estudiar en un entorno real el desempeño de los receptores ATSC cuando la antena apunta a uno de los transmisores: ya sea el transmisor más cercano y/o el transmisor de mayor potencia. Además, al usar antenas directivas y moverlas en busca de la dirección de buena recepción se logra modificar la relación de las potencias recibida de los transmisores, de tal manera que se pueden proponer parámetros de funcionamiento óptimos de la red SFN ATSC cuando en la recepción se usan antenas directivas o arreglos de ellas [5].

Las antenas utilizadas estarán ubicadas a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo, ubicadas en el techo de la unidad móvil de medidas. Según la recomendación de la ITU referente a las *Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de televisión digital terrenal incluida la determinación de sus zonas de cobertura: Informe ITU-R BT-2035-2* [41], la altura de 2 metros es adecuada y además está dentro de la altura de las antenas utilizadas para mediciones en exteriores de la Guía ATSC A/74 [34].

Como la señal captada por la antena será pasada al sistema encargado de la medición de la señal, se utilizará un divisor de potencia para garantizar que la señal llegará con las mismas condiciones a los subsistemas que forman parte del equipamiento de medidas. En principio, la pérdida de potencia ocasionada por el divisor no es relevante, ya que el estudio evalúa el desempeño de los receptores debido al multitrayecto artificial y la sensibilidad en potencia no es tan importante.

5.5.2. Equipamiento de medidas

Esta parte está formada por cuatro subsistemas: un receptor profesional de televisión digital para ATSC, un receptor comercial ATSC, un equipo SDR (*Software Definido por Radio*) y, una base de datos conformada por discos duros externos. El receptor profesional ATSC será el encargado de recibir la señal obtenida por la antena, demodularla, medir la intensidad de campo eléctrico y de obtener algunos parámetros de la señal ATSC. En cuanto al receptor comercial, aparte de ser el único receptor bajo prueba que será llevado a las pruebas de campo, éste servirá para demodular la señal y evaluar subjetivamente la señal que se recibe de la antena. El equipo SDR estará encargado de muestrear la señal RF recibida y convertirla en muestras IQ para su posterior almacenamiento en la base de datos.

El receptor profesional a utilizar en las pruebas de campo es el equipo ETL TV Analyzer de Rohde and Schwarz [45]. Este equipo combina un receptor de televisión digital y un analizador de espectros. Este equipo permitirá grabar ciertos parámetros de medida de la señal que se está recibiendo de la antena. Este equipo es muy importante en la evaluación de los resultados de las pruebas de campo, pues permitirá realizar mediciones sobre la señal que está demodulando y decodificando y así caracterizar los parámetros de la red SFN ATSC con un alto grado de precisión, medidas tales como el TOV (puede ser caracterizado por el valor de BER de 3×10^{-6} [34]), MER, y medidas de dispersión en el canal; gracias a que tiene una resolución de retardo de las señales multitrayecto de un nanosegundo. Un parámetro de medición adicional que este equipo es capaz de medir y que no será utilizado en las pruebas de campo, es que permite ajustar de manera precisa el tiempo de transmisión de cada uno de los transmisores de la red SFN garantizando la mayor cobertura posible [46].

Los receptores comerciales utilizados en estas pruebas son 6 equipos, se escogieron que en conjunto fueran una muestra representativa de todos los receptores que están a la venta en México y los que actualmente se están utilizando. Los criterios que se siguieron para seleccionarlos son que los receptores son de diferente marca y calidad de recepción. Ésta selección se basó en un estudio realizado por la *Revista del Consumidor* [47]. La idea de llevar un equipo receptor comercial ATSC a las pruebas de campo permitirá evaluar de manera subjetiva la calidad de recepción en cada uno de los puntos de medición, lo que ayudará a documentar mejor las medidas que tome el receptor profesional ETL TV Analyzer.

El equipo SDR también juega un papel muy importante en el equipo de medición. Este equipo permite realizar el diseño e implementación de plataformas de sistemas de radio programable, tales como la adquisición, muestreo y cuantización de una señal de RF de TV digital. El equipo a utilizar es el equipo USRP X300 (*Universal Software Radio Peripheral*) un periférico del fabricante Ettus Research (una compañía de National Instruments desde 2010) diseñado para trabajar en conjunto con un procesador externo a través de un FPGA programable a través de diversos software de terceros (GNU Radio, C ++/API Python, NI LabVIEW, entre otros más) [48]. El USRP X300 realiza las funciones de llevar la señal de RF a banda base por medio de una sección de frecuencia intermedia y viceversa, este equipo trabaja con tarjetas de RF secundarias, las cuales se deben de adquirir por separado; dependiendo de las características de la señal que se desea estudiar, la tarjeta secundaria puede ser del tipo transmisor, receptor o transceptora, además debe de contar con el ancho de banda adecuado y ubicarse en el rango de frecuencia de trabajo de la señal de estudio. La tarjeta utilizada en esta aplicación es la WBX 50-2200 MHz Rx/Tx (40 MHz), tarjeta con un ancho de banda de 40 MHz y capaz de trabajar en un rango de frecuencias desde los 50 MHz a los 2.2 GHz [49]. Tanto el equipo como la tarjeta cumplen con las características necesarias para la transmisión de datos y la velocidad de grabación de la señal de DTV muestreada en RF, la siguiente sección aborda los parámetros de adquisición necesarios para una muestra en RF de la señal ATSC.

5.5.2.1. Parámetros de adquisición para una muestra en RF de la señal ATSC

A continuación se calcula la velocidad de grabación y el espacio en almacenamiento requerido para obtener una muestra de señal en RF de TV digital ATSC. La principales razones de muestrear una señal en RF son porque permite la optimización de los tiempos y recursos disponibles en una campaña de pruebas de campo, permitiendo obtener una captura temporal de las condiciones de recepción y las características de propagación que sufre la señal en el canal inalámbrico y así posteriormente éstas condiciones de la señal pueden reproducirse en laboratorio las veces que sean necesarias bajo cualquier equipo receptor y/o demodulador de la señal. Para ello, es de vital importancia definir los parámetros de adquisición de la señal que nos permitan reconstruirla en laboratorio y nos garanticen al mismo tiempo que se tendrán las condiciones reales de recepción que tendría un receptor si éste hubiera estado presente durante la grabación de la señal.

En las pruebas de campo realizadas por la organización ATSC para evaluar el desempeño de los receptores y que se documentó en el documento ATSC A/74 [34] el canal digital fue muestreado a una frecuencia de 21.524476 MHz y la conversión analógica/digital se realizó a 12 bits. Para la presente planificación se consideran valores similares a los estipulados en ATSC A/74, de preferencia enteros y que cumplen con el teorema de Nyquist² por lo que, la frecuencia de muestreo que se define es 4 veces mayor al ancho de banda de la señal ATSC: $f_s = 24 \text{ MHz}$, es decir, el muestreo de la señal será de $24 \times 10^6 \left[\frac{\text{muestras}}{\text{segundo}} \right]$ y la cuantización de cada muestra será en palabras de **2 bytes (16 bits)**. Por lo tanto, la tasa de adquisición de datos es:

$$\left(24 \times 10^6 \left[\frac{\text{muestras}}{\text{segundo}} \right] \right) \times \left(16 \left[\frac{\text{bits}}{\text{muestra}} \right] \right) = 384 \times 10^6 \left[\frac{\text{bits}}{\text{segundo}} \right] = 384 \text{ Mbps}$$

Pasando a bytes:

$$\frac{384 \times 10^6 \left[\frac{\text{bits}}{\text{segundo}} \right]}{8 \left[\frac{\text{bits}}{\text{Byte}} \right]} = 48 \times 10^6 \left[\frac{\text{Bytes}}{\text{segundo}} \right] = 48 \text{ MB/s}$$

Una vez que se conoce la tasa de adquisición de datos, se calcula el espacio requerido en disco para su almacenamiento. Considerando que el tiempo de adquisición de la señal es de 5 minutos³ (300 *segundos*) tenemos:

²El teorema de Nyquist dice que la frecuencia de muestreo f_s mínima a la que se debe muestrear una señal y que hace posible recuperarla posteriormente debe ser mayor o igual al doble del ancho de banda de la señal que se muestrea.

³El tiempo para registrar la señal de RF por un lapso de 5 minutos se aborda en la sección 6.2.2.

$$\left(48 \left[\frac{MB}{segundo}\right]\right) \times (300 [segundos]) = 14.4 GB$$

Entonces, el tamaño de una sola muestra de señal ATSC con un ancho de banda de 6 MHz, cuando esta se muestrea con una frecuencia 4 veces mayor que su ancho de banda y cuantizada a 16 bits por muestra, es de **14.4 GB**.

5.5.3. Control y Alimentación Eléctrica

Control es la parte encargada de controlar todo el equipamiento de medidas, recopilar las muestras y almacenarlas en la base de datos para su posterior reproducción en laboratorio. Esta parte incluye un equipo de posicionamiento GPS para el geotiquetado de las medidas. En cuanto a la alimentación eléctrica, esta será proporcionada a todo el equipamiento de medición.

El equipo USRP X300 será controlado desde un ordenador portátil. Este ordenador cuenta con sistema operativo Linux y con el software GNU Radio en el cual se desarrolló un programa que se encargará de darle las instrucciones necesarias al USRP X300 para que muestre y digitalize las muestras en IQ y sean guardadas en el disco duro del equipo portátil y/o directamente en la base de datos. El programa que se ha desarrollado para esta tarea cumple con los datos de transmisión de datos especificados en la sección 5.5.2.1.

La base de datos estará conformada por unidades de almacenamiento externo, lo que nos permitirá transferir los archivos de las muestras al final de un día de mediciones o cuando el disco duro del equipo de cómputo se congestione.

El equipo GPS será utilizado para el geotiquetado de las muestras IQ, lo que garantiza conocer la posición exacta donde fueron adquiridos los archivos de medidas y los parámetros obtenidos con el ETL TV Analyzer.

La alimentación del equipamiento de medidas será un sistema autónomo de la instalación eléctrica de la unidad móvil de medición.

Capítulo 6

Planteamiento de las medidas en campo

El presente capítulo aborda los sitios de medición que encontramos dentro del área de cobertura de la red SFN ATSC y su localización en la ciudad. Se calcula el tiempo que lleva hacer una medición para que las mediciones en campo sean programadas eficientemente, el número total de lugares de medición y la estimación del tiempo total que requiere la campaña de pruebas de campo. Finalmente, se dan algunas consideraciones adicionales que se deben tomar en cuenta para la definición los sitios de medición tales como la seguridad del personal y del equipamiento de medidas.

6.1. Definición de los sitios de medición

La ubicación del receptor dentro de la zona de cobertura influye en las características de la señal que recibe y en la calidad de recepción. En la presente sección se describirán algunas zonas de medida que se proponen para la recepción de la señal en modo estático, cada una de estas zonas tienen entornos con características muy particulares y que cumplen con las condiciones y características de cobertura que debe tener la red SFN ATSC definidas en el capítulo 4, en dicho capítulo se mostraron las reglas de funcionamiento en el equalizador que un receptor debe cumplir para asegurar la correcta recepción de la señal ATSC cuando a éste le llegan ecos de la señal debidas al multitrayecto [34]. La Figura 6.1 muestra la relación entre el tiempo de retardo y la amplitud para dos señales eco que son recibidas por un receptor y que según lo recomendado por ATSC A/74 garantizan condiciones de buena recepción.

Como se ha mencionado, dependiendo del entorno en el que se encuentre el receptor se tendrá mayor o menor presencia de señales eco o también conocidas como multitrayectos de la señal, es decir, que dentro del área de cobertura de la red habrá cierto número de ecos con sus respectivas variaciones de tiempo y amplitud entre ellos. Para conocer el efecto que se tendría con la presencia de multitrayecto debida sólo a dos señales (cada eco es la señal que proviene de un transmisor) sin tomar en cuenta los ecos que se pueden llegar a generar por la presencia de obstáculos, se definirán sitios de medición que serán ubicados en zonas específicas en donde al estimar las características de las dos señales se puede conocer su campo eléctrico y su tiempo de propagación a cada uno de estos sitios.

De las dos señales que llegan al receptor (y que provienen de cada uno de los transmisores), una de ellas siempre llega con mayor intensidad. La señal de un transmisor con respecto del otro se comporta como pre-eco (si la señal de menor intensidad precede a la de mayor intensidad) o de post-eco (la señal de menor intensidad

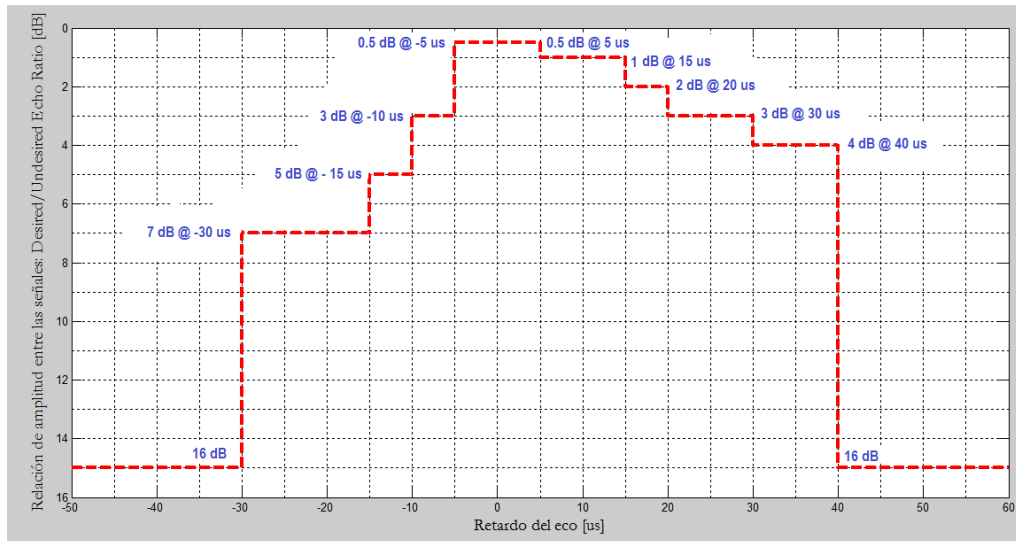


Figura 6.1: Relación tiempo de retardo y amplitud de ecos para buena recepción en receptores ATSC según ATSC A/74.

es posterior a la de mayor intensidad).

De los dos tipos de situaciones, la de pre-eco es la que más afecta el desempeño de un receptor ATSC [3, 34], sin embargo, también una de las limitantes para el funcionamiento de la red SFN es el máximo retraso con el que pueden llegar al receptor las señales de los transmisores y en donde aún son capaces de recibir correctamente¹. La diferencia de tiempos entre la recepción de las dos señales dependerá de la ubicación del receptor dentro de la zona de cobertura, sin embargo, el máximo tiempo que se puede presentar entre las dos señales está determinado por la distancia que existe entre los transmisores, Cerro del Chiquihuite y TV UNAM. Según la Figura 4.5, distancia es de 24.079 km, esto nos da una diferencia máxima de 80.26 μs entre la recepción de las dos señales para cualquier ubicación dentro de la zona de cobertura de la red SFN ATSC. Sin embargo, el retardo multitrayecto de una señal no solo se debe a la distancia a la que se encuentra el receptor de los transmisores, si no que también se añade un valor de retraso debido a los rebotes de la señal en edificios y/o montañas, este valor depende de la presencia de estos obstáculos en la propagación de la señal. Por otro lado, también el retraso entre señales depende directamente de la sincronización deliberada que tengan los dos transmisores en la transmisión de su señal [50].

En recepción, el tiempo de retardo entre señales tiene influencia en el ancho de banda de la señal ATSC; pues el valor inverso de un tiempo de retardo le ocasiona desvanecimientos en el espectro, por lo que cuando el retardo es menor tendremos un número menor de desvanecimientos; pero cuando al retardo aumenta, la degradación del espectro puede hacer que en la recepción sea imposible la demodulación y decodificación correcta de la señal [34]. Para ejemplificar los desvanecimientos debidos al retardo en el espectro de la señal ATSC, a continuación en la Figura 6.2 se muestra el espectro (6 MHz) obtenido en laboratorio de una señal ATSC con potencia de recepción de -28 [dBm]^2 , el canal utilizado es el 18 (494 - 950 MHz). La Figura 6.3 muestra el espectro que resulta cuando llegan al receptor dos señales con el mismo nivel (-28 [dBm]) y entre ellas existe un retraso de $0 \mu\text{s}$, en este caso no existen desvanecimientos en el espectro pero lo que se observa es un incremento de 3 [dB] debido a que llegan dos señales de igual potencia en el mismo instante. En la Figura

¹De manera genérica, para los receptores ATSC es de aproximadamente $40 \mu\text{s}$, este valor depende de la tecnología implementada en el equalizador de cada receptor.

²La potencia medida en el analizador de espectros considera las pérdidas introducidas por cables y conectores, además la potencia medida depende de la sensibilidad del equipo.

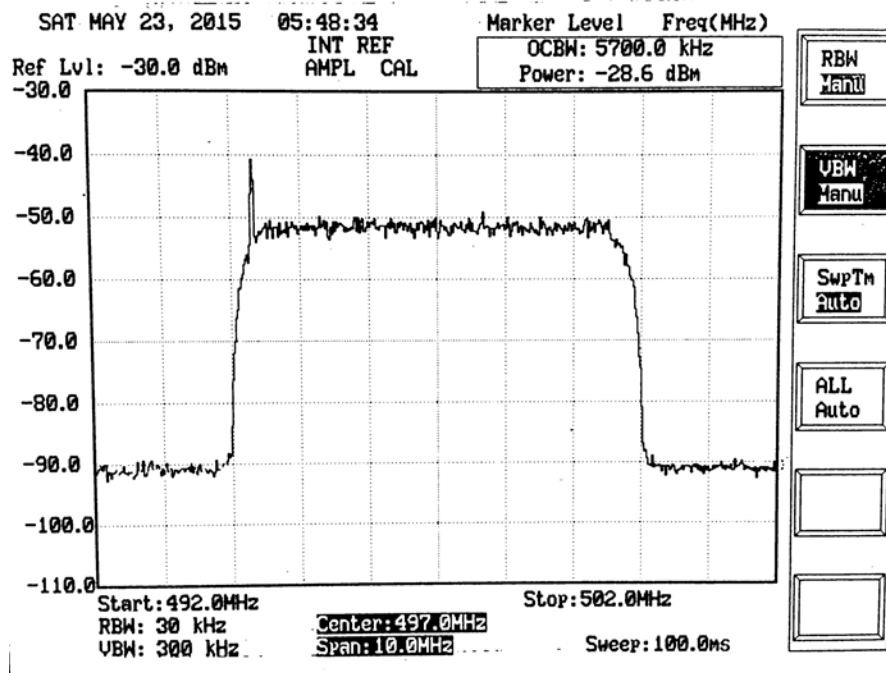


Figura 6.2: Espectro de la señal ATSC (canal 18).

6.4 muestra el espectro cuando llegan al receptor dos señales ATSC con el mismo nivel (-28 [dBm]) y entre ellas existe un retraso de $1 \mu\text{s}$, como se dijo, el inverso de este tiempo ocasiona desvanecimientos de 1 MHz en el ancho de banda de la señal ATSC, en este caso tenemos 6 desvanecimientos. Finalmente, la Figura 6.5 se muestra el espectro para señales con el mismo nivel de potencia (-28 [dBm]) y cuando entre ellas existe un retardo de $3 \mu\text{s}$ lo que ocasiona 18 desvanecimientos de 0.333 MHz.

El escenario de transmisión SFN ATSC 2 descrito en la sección 4.6.2 al proporcionar una buena cobertura de la red dentro de la ciudad otorga la flexibilidad para definir las zonas de medición, el mayor criterio que se seguirá para definir las zonas es la necesidad de realizar estudios en zonas específicas dentro de la cobertura de la red y que ayudarán a concluir si los receptores reciben bien o no y, bajo qué condiciones implementadas en los transmisores de la red pueden hacerlo.

La distribución de las zonas de medición son definidas sobre el escenario SFN ATSC 2 el cual se muestra en la Figura 6.6. Este escenario muestra sobre el mapa de la ciudad las zonas en donde se recibe la señal ATSC con un nivel de campo eléctrico mayor al umbral establecido para México para el canal 20 digital: 48 [$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$] [6]; la imagen presenta en colores la cobertura de cada transmisor y de la red que forman entre ellos: el color verde es el área de cobertura de la red SFN ATSC y que se forma cuando el área del transmisor TV UNAM en color amarillo se solapa con la cobertura del transmisor Cerro del Chiquihuite representada en color azul. Se muestra una ruta que une a los dos transmisores (esta ruta se describe más adelante), también se muestran líneas de retardo que se definen a partir de la diferencia de tiempos que hay entre las señales que llegan al receptor. Cada línea de retardo indica que dentro de la zona que delimita se tienen valores de retardo menores al valor indicado.

Como se observa, en la Figura 6.6 se definió una ruta que une a los dos transmisores (trazada en línea punteada magenta), la cual parte de un sitio de transmisión para llegar al otro. Esta ruta que a continuación se describe, es representativa porque sobre ella podemos obtener todas las condiciones generales de recepción de las dos señales. En la Figura 6.7 se muestran los niveles de potencia estimados para un receptor con una antena

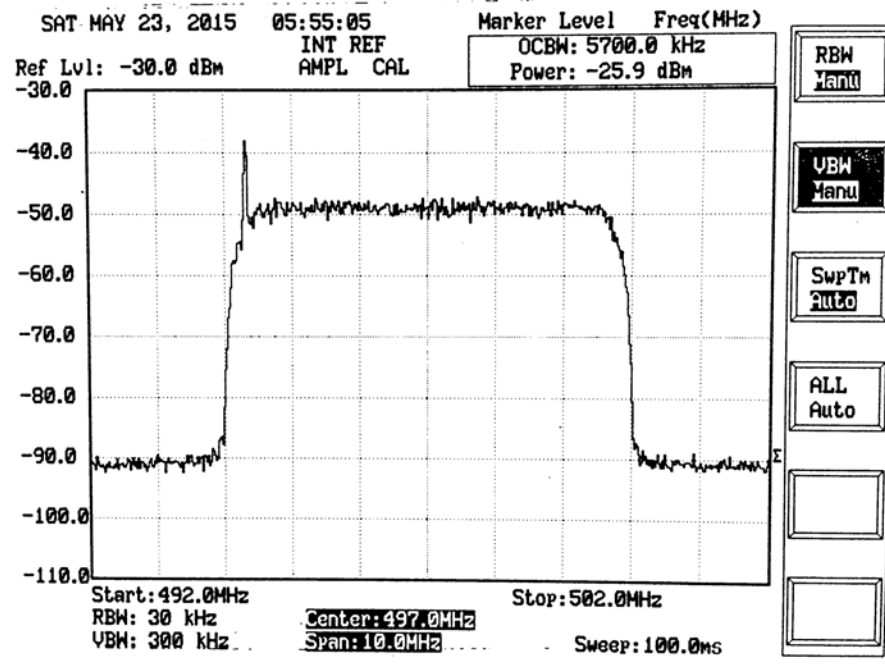


Figura 6.3: Desvanecimientos en el espectro ATSC (canal 18) cuando el retardo entre dos señales del mismo nivel de potencia es de 0 μ s.

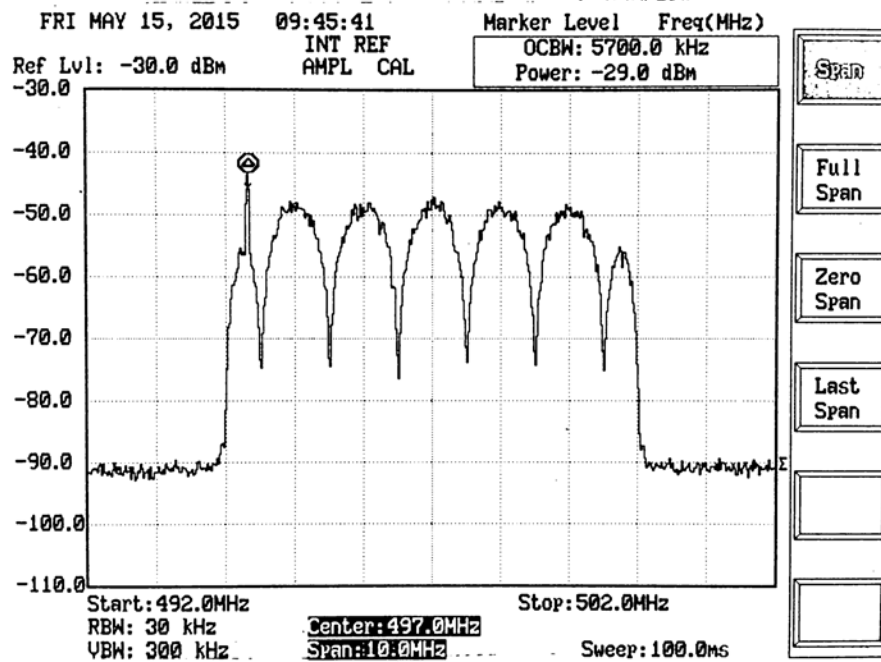


Figura 6.4: Desvanecimientos en el espectro ATSC (canal 18) cuando el retardo entre dos señales del mismo nivel de potencia es de 1 μ s.

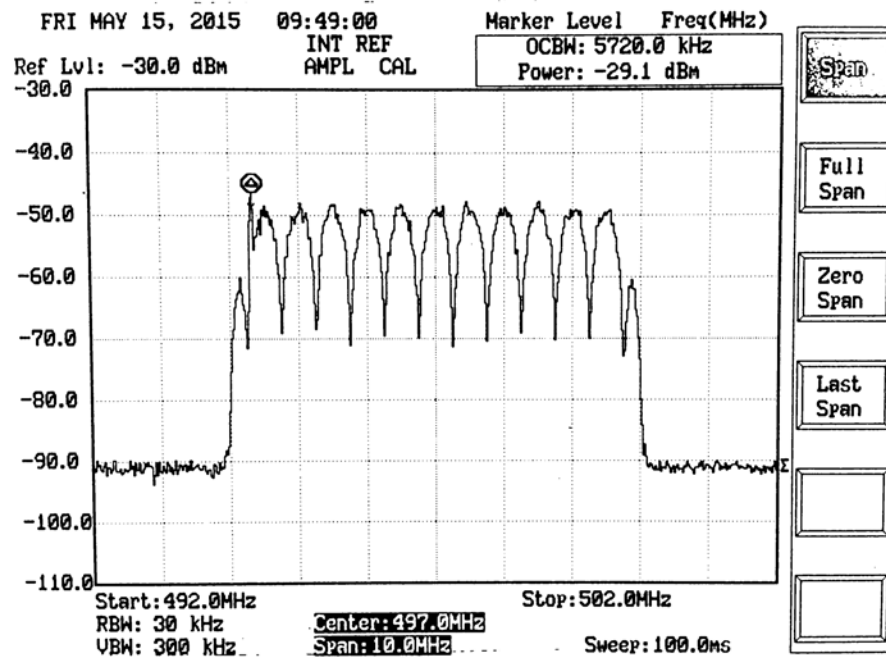


Figura 6.5: Desvanecimientos en el espectro ATSC (canal 18) cuando el retardo entre dos señales del mismo nivel de potencia es de $3 \mu s$.

omnidireccional de ganancia 0 [dBi], cuando recorre la ruta partiendo del transmisor TV UNAM al transmisor del Cerro del Chiquihuite. Al avanzar sobre esta ruta el campo eléctrico que se recibe desde el transmisor al que nos dirigimos aumenta en relación con el campo eléctrico que se recibe desde el transmisor desde el cual se parte y que disminuye cada vez que nos alejamos. Se observa que conforme se avanza en dirección al transmisor destino la distancia se acorta, lo mismo pasa con el retardo en recepción de su señal, mientras que, el retardo de la señal del transmisor del cual se parte se incrementa porque aumenta la distancia hacia él. Comparando la diferencia de retardos entre las dos señales para cualquier punto dentro de la zona de cobertura de la red, se definen las líneas de retardo (mencionadas anteriormente), para esta ruta, se tiene una zona en donde el valor del retardo es nulo (cuya ubicación es exactamente la mitad de la distancia entre los transmisores); y que antes de llegar a esta zona se observa que la relación del valor de retardo entre las señales disminuye y conforme la pasa esta relación vuelve a aumentar. En la zona donde el retardo es nulo se tendrá en recepción dos señales con un distinto nivel de campo eléctrico, debido a que los transmisores trabajan con diferente potencia de transmisión; esto implica que se tendrán áreas con presencia de pre-eco, con los debidos problemas que ello ocasiona.

Para minimizar los efectos del pre-eco existen dos formas posibles: aumentar la potencia de los transmisores hasta conseguir que la amplitud de las señales recibidas en la línea de $0 \mu s$ sea igual, o bien se le añade un retardo a la transmisión de la señal del transmisor de menor potencia. El primer método no se recomienda porque modifica el área de cobertura inicial de la red, el segundo método es el más utilizado pues sólo se trata de ajustar el tiempo de transmisión de uno de los transmisores sin modificar la zona de cobertura de la red [3, 4].

El área de pre-eco según se muestra en la Figura 6.7 se encuentra ubicada en el 7 km al 12 km: a partir del kilómetro 7 la señal de TV UNAM llega antes pero con un nivel menor que la señal que llega después del Cerro del Chiquihuite y que lo hace con un nivel mayor. Después de los 12 km, ya no se tiene la situación anterior pues ahora la señal de TV UNAM se comportará como post-eco hasta los 24.079 km, que es donde se ubica el

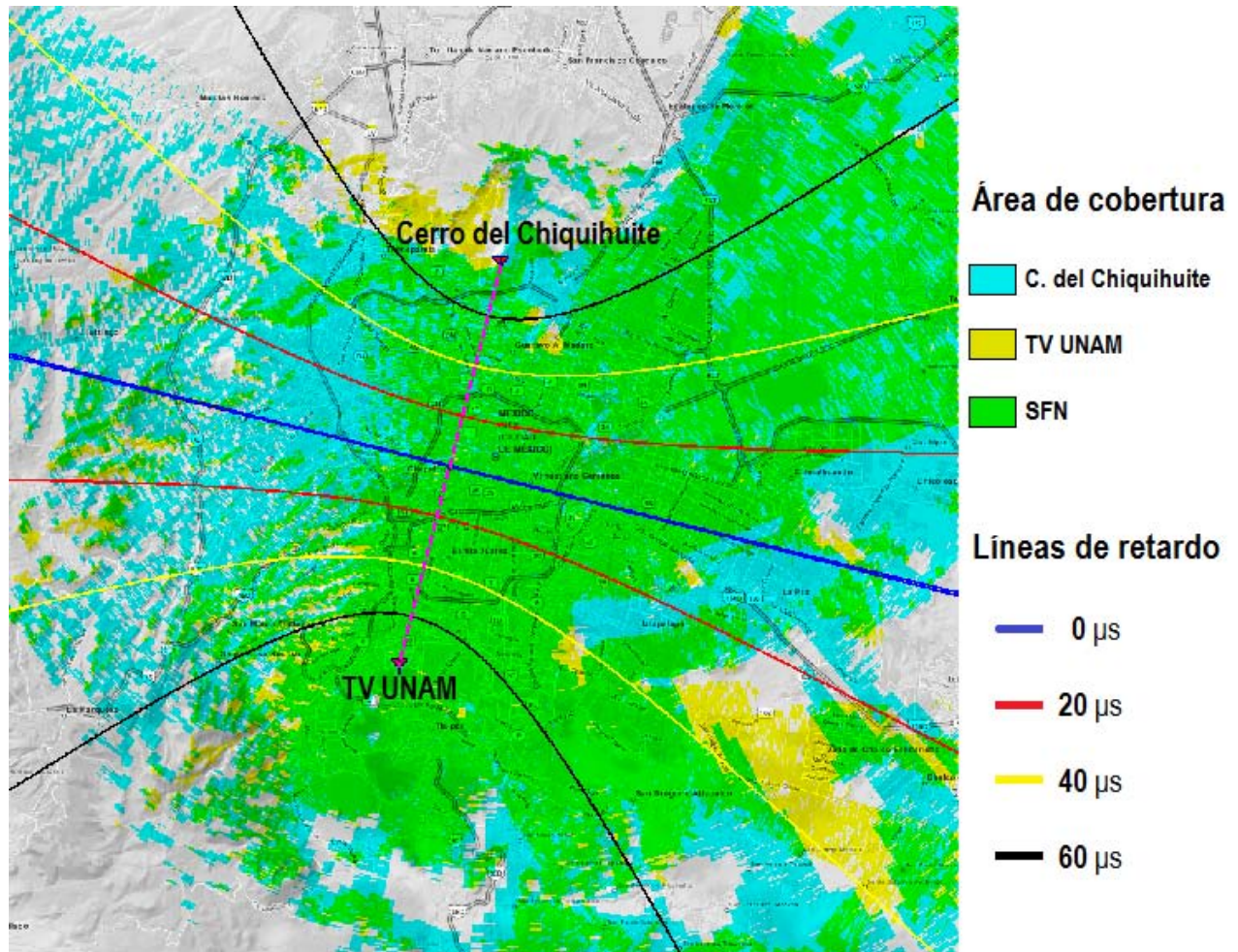


Figura 6.6: Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 2 con los transmisores sincronizados.

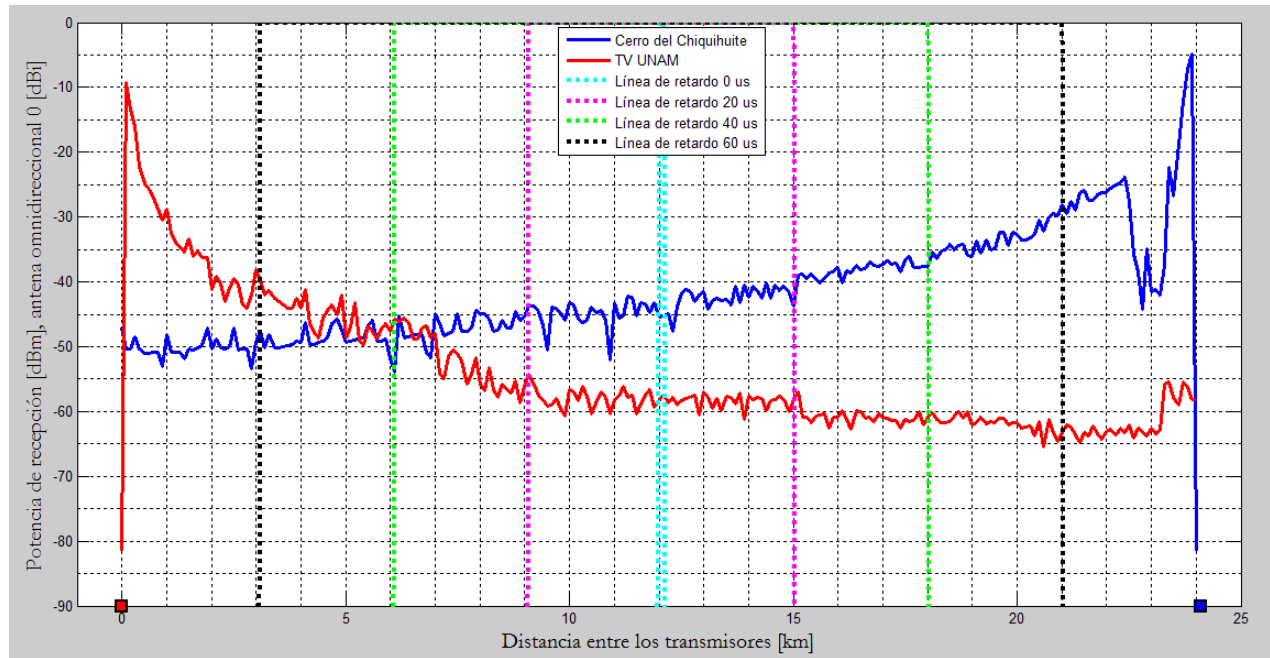


Figura 6.7: Nivel de potencia y tiempos de retardo entre las señales para la ruta que une a los dos transmisores (desde el transmisor TV UNAM al transmisor Cerro del Chiquihuite) y cuando la transmisión es sincronizada.

transmisor Cerro del Chiquihuite. Si se traduce esta área de pre-eco a tiempo de retardo entre las señales que se reciben a los 7 km (distancia del transmisor TV UNAM en dirección al transmisor Cerro del Chiquihuite donde se inicia la situación de pre-eco), tenemos que la distancia entre TV UNAM y el receptor son 7 km y que la distancia del Cerro del Chiquihuite al receptor son 17.079 km, ya que juntas estas distancias deben sumar 24.079 km (distancia entre los transmisores). Para el retardo que presenta la señal del Cerro del Chiquihuite con respecto a la señal de TV UNAM cuando el receptor se encuentra a los 7 km:

$$\text{retardo} = \frac{(17,079-7) \times 10^3 \text{ m}}{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 33,6 \times 10^{-6} \text{ s} = 33,6 \mu\text{s}$$

Entonces, si se agrega a TV UNAM (transmisor de menor potencia) este valor de retardo implica que las líneas de retardo entre las señales mostradas en la Figura 6.6 y la Figura 6.7 se mueven para situarse más cerca de la ubicación del transmisor TV UNAM (al que se le ha añadido un retardo adicional).

La Figura 6.8 muestra la cobertura cuando al transmisor de TV UNAM se le agrega un retardo de 33.6 μs en la transmisión de su señal con respecto del transmisor Cerro del Chiquihuite. La potencia de las dos señales que recibe el receptor no cambia cuando éste recorre la ruta que une a los dos transmisores desde el transmisor TV UNAM al transmisor Cerro del Chiquihuite, lo único que cambia es el instante de llegada entre una señal y la otra. Lo que se observa ahora es que ya no se tienen áreas de pre-eco, sin embargo, las áreas donde hay post-eco debido a que la señal del transmisor TV UNAM llega después que la señal de Cerro del Chiquihuite han aumentado (lado derecho de la línea de 0 μs en la Figura 6.9).

De acuerdo con la Guía ATSC A/74 y a los limitantes de operación de una red SFN implementada bajo cualquier configuración con ATSC, el valor de retardo añadido a un transmisor con respecto del otro es importante a tener en cuenta pues aparte de minimizar las áreas con presencia de pre-eco, limita de manera significativa el desempeño de cualquier ecualizador en las áreas de post-eco: pues ahora estas áreas presentan retardos más grandes y una gran variación de amplitud entre las señales y, los ecualizadores aún a pesar de que

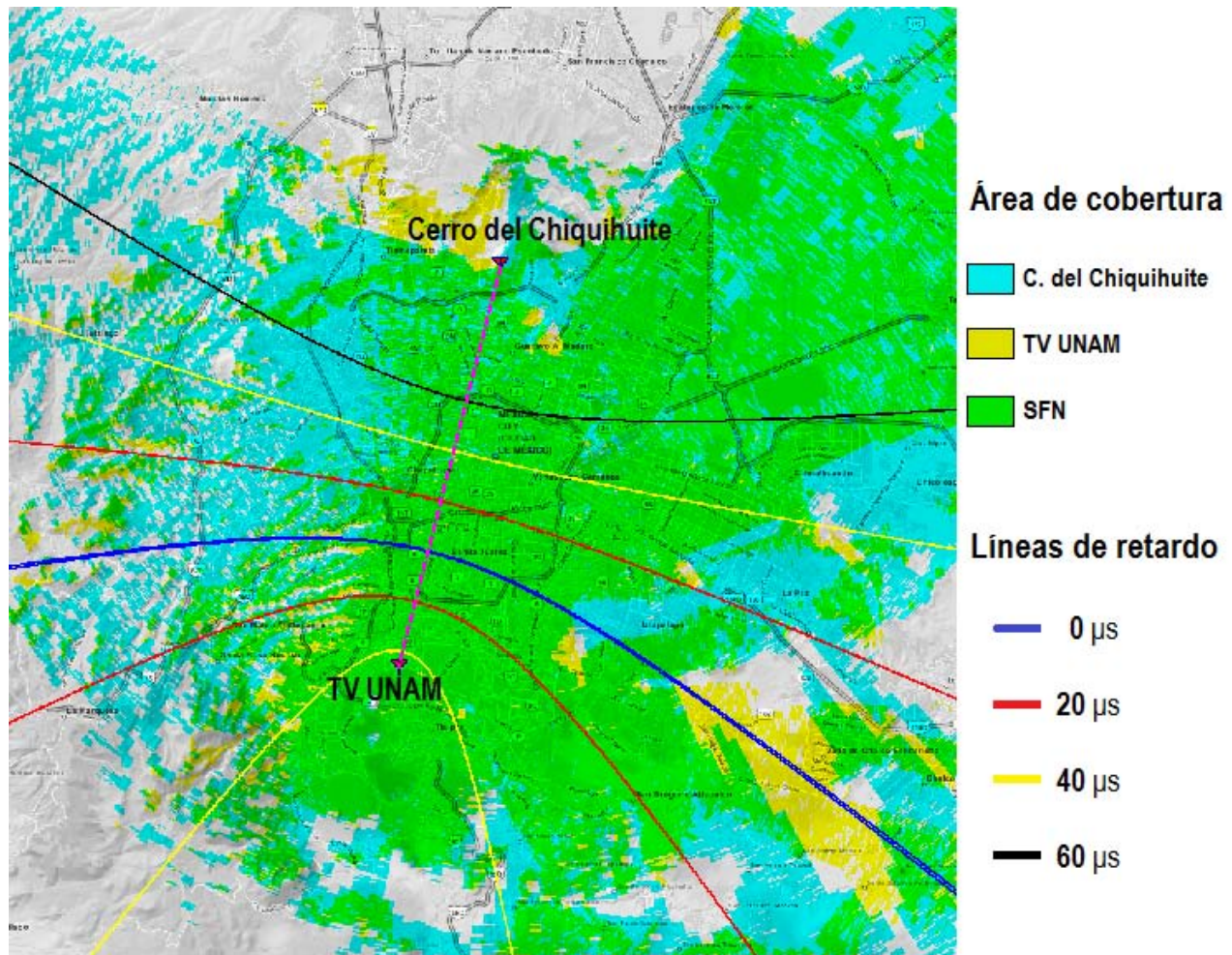


Figura 6.8: Predicción de cobertura para el escenario SFN ATSC 2 cuando al transmisor TV UNAM se le añade un retardo de 33.6 μs con respecto del otro transmisor.

día con día mejoran en su diseño aún no son capaces de contar con ecualizadores capaces de aceptar señales post-eco con estas características [3, 4, 34].

6.2. Tiempo estimado de medición

Se puede estimar el tiempo requerido para realizar todas las mediciones de campo, para ello a continuación se hace una aproximación del tiempo requerido para la adquisición de una muestra útil de la señal de RF y su posterior evaluación. El objetivo de esta estimación es que a partir de esta se pueda planear el número total de mediciones que se realizarán en las pruebas de campo y la duración total aproximada de la campaña de mediciones.

Con el objeto de optimizar los recursos de las pruebas de campo, las actividades de la campaña de pruebas constarán de dos partes:

1. Adquisición de muestras de la señal de RF y conformación de una base de datos. En esta parte el equipamiento descrito en el capítulo 5 y el personal encargado de las pruebas se transportará en la unidad móvil a cada uno de los emplazamientos que se elijan para realizar las pruebas de campo. De manera general, en cada uno de estos lugares, la señal de RF se va a recibir, muestrear y grabar en las

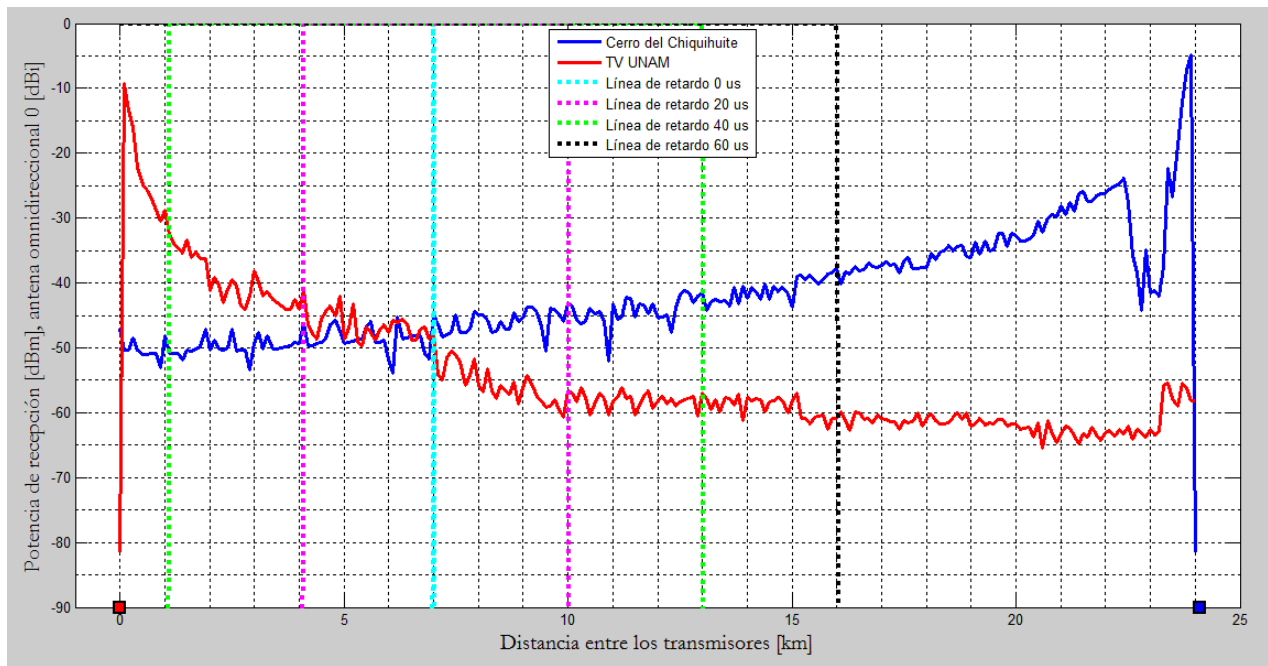


Figura 6.9: Nivel de potencia y tiempos de retardo entre las señales para la ruta que une a los dos transmisores (desde el transmisor TV UNAM al transmisor Cerro del Chiquihuite) y cuando al transmisor TV UNAM se añade un retardo de $33.6 \mu s$ con respecto del otro.

unidades de almacenamiento que conformarán la base de datos.

2. Medición de la señal de RF en los receptores ATSC. En ambiente de laboratorio, cada archivo de la base de datos será evaluado las veces que sean necesarias en cada uno de los receptores ATSC. El tiempo asignado a esta actividad se excluye de la estimación del tiempo requerido para llevar a cabo las pruebas de campo debido a que es la parte correspondiente en primer lugar a una detallada evaluación en los receptores que permite complementar con los obtenidos en campo y, en segundo lugar se enfoca al análisis de resultados.

6.2.1. Requerimientos para antes y después del traslado al sitio de medición

Para garantizar el buen resguardo del sistema de medición a utilizar en las pruebas de campo, se tiene que tener presente que al inicio y al final de un día de pruebas:

- La unidad móvil será equipada con el sistema de medidas. Para facilitar esta actividad, una vez definido el equipo necesario a utilizar se recomienda que éstos se monten en un rack. Esta estructura deberá fijarse en la unidad móvil para garantizar su seguridad en la ruta de traslado al sitio de medición. Una vez fijada la estructura, verificar el correcto encendido de los equipos, la falta de cableado y/o posibles desconexiones entre los equipos.
- Prueba de los transmisores y del funcionamiento del equipamiento de medidas. Una vez que se ha verificado el correcto encendido de los equipos es conveniente realizar una prueba de funcionamiento de los sistemas. Para esto, se define un lugar fijo dentro de la cobertura de la red SFN en el cual se conocen las características de las señales recibidas (niveles de campo y retardo) y, que por su ubicación permitirá que al inicio de un día de pruebas se verifiquen los valores de la señal recibidas de los dos transmisores. Una vez que se ha verificado que estos funcionan bien, se procede con una prueba de captura y reproducción de la señal de RF que garantizará el correcto funcionamiento del equipo de medidas encargado del muestreo de la señal en RF y descrito en la sección 5.5.2. Lo que sigue, es el traslado al sitio de medición.

En caso de que en los valores medidos de la señal de los dos transmisores se presenten discrepancias o que el equipamiento de medidas otorgue una respuesta diferente a la esperada, se procederá a identificar y corregir las fallas de origen. Solucionado el problema, nuevamente se realiza la prueba de los transmisores y del funcionamiento del equipamiento de medidas que fue descrito de manera general en el párrafo anterior.

- Al final del día, la estructura será desmontada de la unidad móvil.

6.2.2. Sitio de medición

De acuerdo con los datos calculados en la sección 5.5.2.1 y considerando los parámetros de las medidas de campo que nos marca la Guía A/74 de ATSC [34] para evaluar el desempeño de los receptores ATSC, se decidió que las medidas estáticas y la grabación de la señal de RF que realizará el equipo USRP X300 se deberá registrar en un lapso de 5 minutos para cada ubicación, ya que este tiempo se considera adecuado para evaluar posteriormente en laboratorio las variaciones de la señal en el tiempo.

Una vez que la unidad móvil se encuentra en el sitio de medición, se procederá a ejecutar la medición planeada en este lugar. Se calcula que el tiempo en que se permanecerá en el sitio de medición desde la llegada hasta la conclusión de las mediciones sea de 20 minutos, tiempo que se destinará a: la verificación de las conexiones entre los equipos de medición, registro de las características visuales y de las coordenadas geográficas del lugar de medición, registro de anomalías o condiciones favorables para llevar a cabo la medición (seguridad del sitio para llevar a cabo las medidas, tráfico, etc.), realización de la medición y anotación de las anomalías presentadas durante ésta y, finalmente la preparación del equipamiento para el traslado al siguiente sitio de medición.

6.2.3. Número estimado de mediciones y duración aproximada de la campaña de pruebas

Para definir el número de sitios de medición en donde se llevará a cabo la obtención de las muestras de la señal se siguieron dos directrices. La primera, fueron las recomendaciones del Informe ITU-R BT-2035-2 [41] que indica que para obtener una muestra estadísticamente significativa de los puntos de medición se deben tomar muestras que incluyan un gran número de mediciones, y que las consideraciones prácticas indican que el número de emplazamientos o sitios de medición sean de 30 a 100, aunque recomienda que sea un número de emplazamientos mayor. La segunda 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 y utilizando la configuración de Transmisores Distribuidos (DTxTs)³ [30], esta prueba indica que se realizaron mediciones en 132 sitios, de los cuales 109 sitios fueron para mediciones estáticas en exteriores y los restantes 23 para mediciones en interiores, este número de sitios cumplen con lo que recomienda el Informe ITU-R BT-2035-2 (sección 5.2.1 de la presente tesis), 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 un número mayor de emplazamientos que los realizados en la Ciudad de Nueva York (el despliegue de la red se describe en la sección 3.2.1), en concreto para la planeación de las pruebas de campo en la Ciudad de México se definen 178 sitios en modo estático, de los cuales 148 serán destinados para realizar mediciones en exteriores y 30 para interiores.

Entonces, conociendo el número de sitios de medición se estima el tiempo aproximado para realizar la campaña de pruebas. Para cuando la red SFN ATSC esté operativa, el tiempo para realizar una sola medición

³La misma configuración que será implementada en la red SFN para estas pruebas de campo.

se estima en 20 minutos, para un sólo día de mediciones y considerando los traslados entre un punto y otro punto de medición y de factores tales como el tráfico, se calcula que el tiempo aproximado para realizar completamente una sola medición sea de 40 min, por lo que si consideramos 6 horas diarias de trabajo, estaremos realizando 9 sitios de medición por día. No se incluye el tiempo para realizar la prueba de los transmisores ni del funcionamiento del equipo de medidas, pues es una actividad cuyo resultado condiciona el que se realicen las mediciones o no para un determinado día de medición. En una semana hábil se realizarían 45 mediciones. Para los sitios definidos en la campaña de pruebas, el tiempo de medición requerido es de 4 semanas (1 mes).

6.2.3.1. Fases de las pruebas de campo

Antes de la realización de las medidas que se han planificado se deben realizar acciones que harán posible que las pruebas de campo se lleven a cabo. En la parte de los transmisores, las acciones son las que forman parte de su instalación y ajuste dentro la red de transmisión: instalación de los transmisores, el despliegue del enlace que interconectará a cada uno de los sitios de transmisión con el estudio, la sincronización en tiempo y frecuencia de los dos transmisores, y finalmente la comprobación de que la señal que será transmitida por cada uno de los transmisores cumple con la máscara espectral que se ha definido en la documentación del estándar ATSC [14].

En lo concerniente a la parte de recepción, se tiene contemplado en primer lugar el equipamiento de la unidad móvil que será utilizada para las mediciones. Con el objetivo de caracterizar el ruido externo al equipo de medición⁴ se realizará una medida con los dos transmisores inactivos en algunos puntos de medición sintonizando el equipo de medición en el canal de frecuencia que se utilizará para las pruebas, el canal 20 digital. Después de caracterizar en ruido, para el número total de medidas que se han planeado en las pruebas de campo éstas se realizarán en tres fases: la primera fase corresponde a realizar mediciones cuando el transmisor TV UNAM se encuentra encendido y el transmisor Cerro del Chiquihuite se encuentra apagado, este modo de operación se definió en la sección 4.6.2.1; la segunda fase corresponde cuando los dos transmisores están sincronizados; en la tercer fase, se realizan mediciones cuando se ajusta el retardo de transmisión en la señal del transmisor TV UNAM con respecto del otro transmisor. Por lo anterior, se estima que sólo para llevar a cabo la realización de las últimas tres fases de medición se destine un tiempo aproximado de 3 meses.

La duración total de las pruebas de campo de esta planificación se considera adecuada y dentro de los límites de presupuesto del proyecto REFUTV asignados a esta tarea.

6.3. Distribución de las medidas dentro de la red de transmisión

La planificación de los sitios para las medidas se hizo para ambientes de exteriores e interiores y siguió los siguientes aspectos:

1. Tomando en cuenta que los tiempos de retardo y los niveles de campo eléctrico entre las dos señales definen situaciones de pre-eco y post-eco, las medidas se agrupan entorno a las líneas de retardo que se definen a partir del tiempo de llegada entre las dos señales y que se muestran en la Figura 6.6.
2. Comercialmente el socio radiodifusor desea conocer la cobertura alcanzada, por lo que se incluyen sitios de medición dentro y fuera de la red SFN ATSC, es decir, zonas donde se tiene la recepción de la señal que proviene de un sólo transmisor.
3. Entornos urbanos y sitios característicos que se pueden encontrar en la Ciudad de México. Los sitios se definen entorno a las líneas de retardo con el objeto de estudiar señales que presentan el mismo retardo

⁴Ruido natural y/o artificial presente en el punto de medidas.

Retardo entre señales [μs]	SFN	Sólo un transmisor
Eco casi nulo	E10, E19, E27, E32, E36,	E4
Eco leve $\leq 20 \mu s$	E3, E9, E11, E18, E20, E26, E28, E31, E35, E37	E33
Eco moderado $\leq 40 \mu s$	E5, E8, E12, E17, E21, E25, E29, E30,	E34
Eco fuerte $> 40 \mu s$	E1, E2, E6, E7, E13, E14, E15, E16, E23, E24	E22

Cuadro 6.1: Características del eco y de la cobertura para los puntos de medición en exteriores.

entre ellas pero que debido a su distribución dentro de la ciudad presentarán características de intensidad influenciadas directamente por el entorno de recepción. Un ejemplo de sitio característico es el aeropuerto de la Ciudad de México, estudiar las condiciones de recepción en zonas cerca de este emplazamiento permitirá evaluar señales en recepción con efecto Doppler y una adición de retardo (aparte del que ya presentan las señales debido a su propagación) producto de obstáculos en un entorno real ya que tendremos señales que serán reflejadas por aviones que despegan y/o aterrizan, es de mencionar que la guía ATSC A/74 simula estas condiciones en laboratorio para evaluar el desempeño de los receptores [34].

4. Estructura de rejilla entre los puntos de medición. Esta distribución es ideal para comparar la intensidad de campo estimado con el valor real ante la presencia de obstrucciones naturales y/o causadas por el hombre y que influyen en las características de las señales que se reciben (número de señales, amplitud, fase, dispersión en frecuencia y tiempo, etc.) y que a través del análisis de los resultados permiten caracterizar el canal de propagación en estas ubicaciones [30, 33]. Además, una estructura similar fue utilizada para distribuir los sitios de medición realizados en la Ciudad de Nueva York donde se utilizó la configuración SFN de Transmisores Distribuidos (DTxTs) y se propuso que para pruebas de campo que se lleven a cabo en ambientes similares y/o urbanos, esta forma de distribuir los puntos es ideal para evaluar los efectos que el entorno tiene sobre las señales recibidas [30].

En la Figura 6.10 se muestra la distribución propuesta de las medidas estáticas dentro de la zona de cobertura del escenario SFN ATSC 2. Los puntos de medición para exteriores se representan en color morado, y en color rojo para interiores. Las líneas de retardo mostradas están definidas para cuando los transmisores están sincronizados en su transmisión.

Un sitio de medición en color **morado** de la Figura 6.10 representa un conjunto de 4 puntos que se ubican cercanos aproximadamente de entre 50 y 100 metros, se representa con la letra E y un número, en concreto estos puntos se ubican en el cruce de dos calles y en donde es factible que se permita estacionar la unidad móvil de medidas, en la Figura 6.11 se puede observar uno de estos conjuntos (E33) y que se encuentra situado cerca del aeropuerto de la Ciudad de México y entorno a la línea de retardo de $20 \mu s$.

La Tabla 6.1 muestra las características de los conjuntos de puntos donde se realizarán mediciones estáticas en exteriores, cada conjunto consta de 4 sitios de medición, en total se definieron 37 conjuntos. Del total de conjuntos de puntos para medidas estáticas de exteriores, 33 se encuentran dentro de la cobertura de los dos sitios transmisores, es decir, dentro de la red SFN y 4 dentro de la cobertura de un sólo transmisor.

También representados en color rojo en la Figura 6.10 se muestran 10 conjuntos de medición que serán considerados para mediciones de la señal en interiores, están representados solamente con una letra del abecedario, estos conjuntos son ubicados en edificios que se ubican dentro de la cobertura de la red SFN ATSC, debido a que

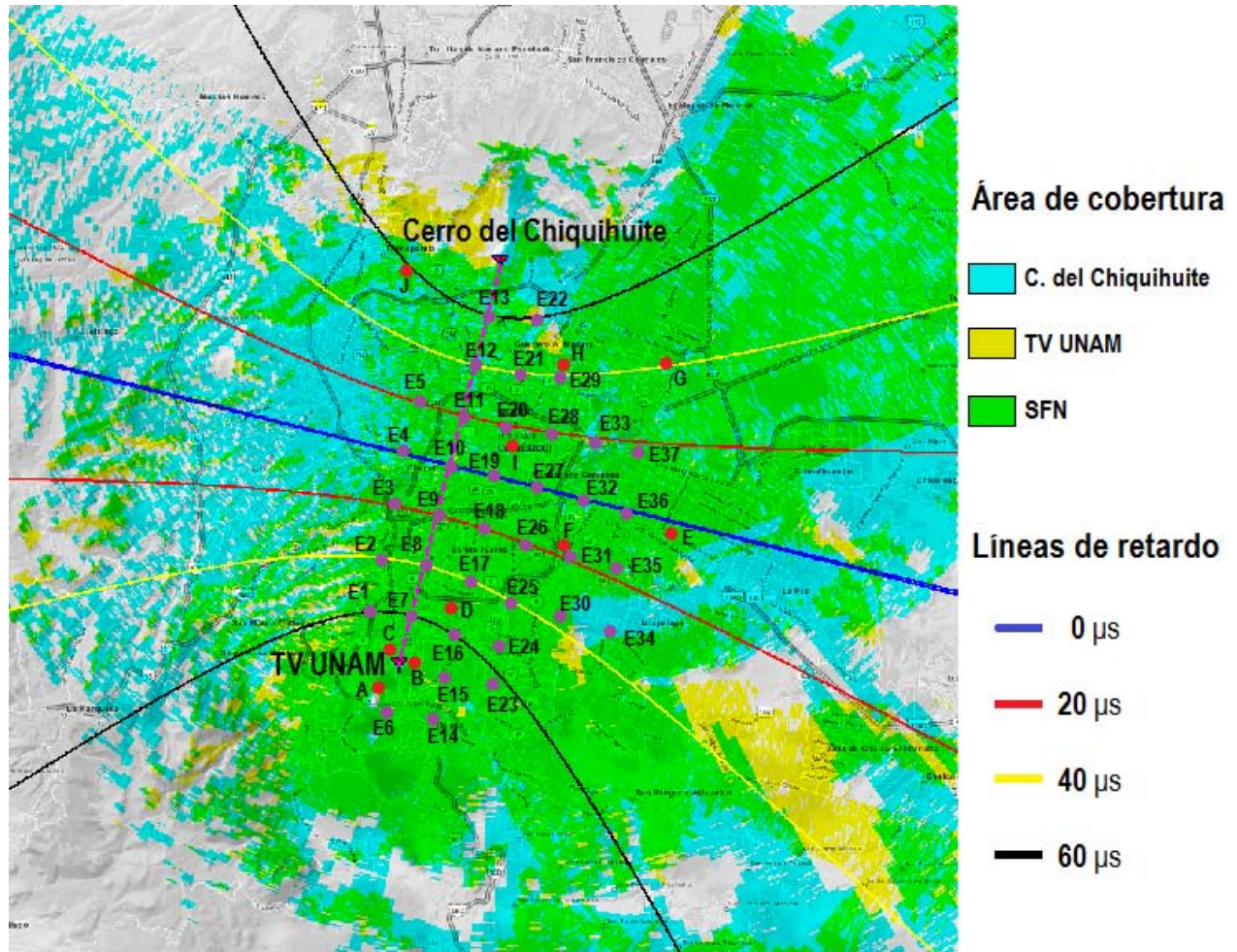


Figura 6.10: Ubicación de los puntos de medición estáticos para exteriores (morado) e interiores (rojo), los transmisores están sincronizados en la transmisión de su señal.

Retardo entre señales [μs]	SFN
Eco casi nulo	E
Eco leve $\leq 20 \mu s$	I, F
Eco moderado $\leq 40 \mu s$	
Eco fuerte $> 40 \mu s$	A, B, C, D, G, H, J

Cuadro 6.2: Características del eco en la cobertura de la red SFN para los puntos de medición en interiores.

se debe solicitar un permiso para poder realizar este tipo de mediciones, es factible que se realicen dentro de las instalaciones de la UNAM y que tiene distribuidas en la ciudad, entre ellos se encuentran museos e instituciones de educación media superior y superior, etc. Debido al tipo de material y diseño de construcción del edificio, se prevé realizarán medidas en diferentes niveles del mismo tales como su planta baja, piso medio y último nivel, y para cada una de estos niveles verticales, los puntos de medición en interiores se ubicarán en lugares puntuales como pueden ser cerca de ventanas, de ser posible en línea de vista a alguno de los transmisores. Se calcula que en cada conjunto se lleven a cabo 3 puntos de mediciones. La Tabla 6.2 especifica las características de estos sitios.

6.4. Consideraciones adicionales de las medidas en campo

El criterio principal que se debe seguir para la elección de un punto de medición es que el desarrollo de esta actividad sea segura. La unidad móvil debe poder estacionarse en un lugar adecuado respetando las condiciones de tránsito del lugar, además deberán evitarse zonas de la ciudad que cuenten con terrenos accidentados; o aquellas zonas en donde las condiciones de seguridad ciudadana pueden amenazar la seguridad del personal y del equipamiento de medidas.

En referencia a los sitios de medición, el personal que operará el equipo de medición debe estar entrenado y conocer el procedimiento de medidas. Cuando en su caso, se produzcan resultados inesperados, es decir, cuando se tenga en algún lugar de medición medidas o presencia de interferencias que se producen de manera esporádica y sin esperarse y, que no son proporcionales a las que se estimaron para ese punto, se debe investigar el efecto posible de los mismos.

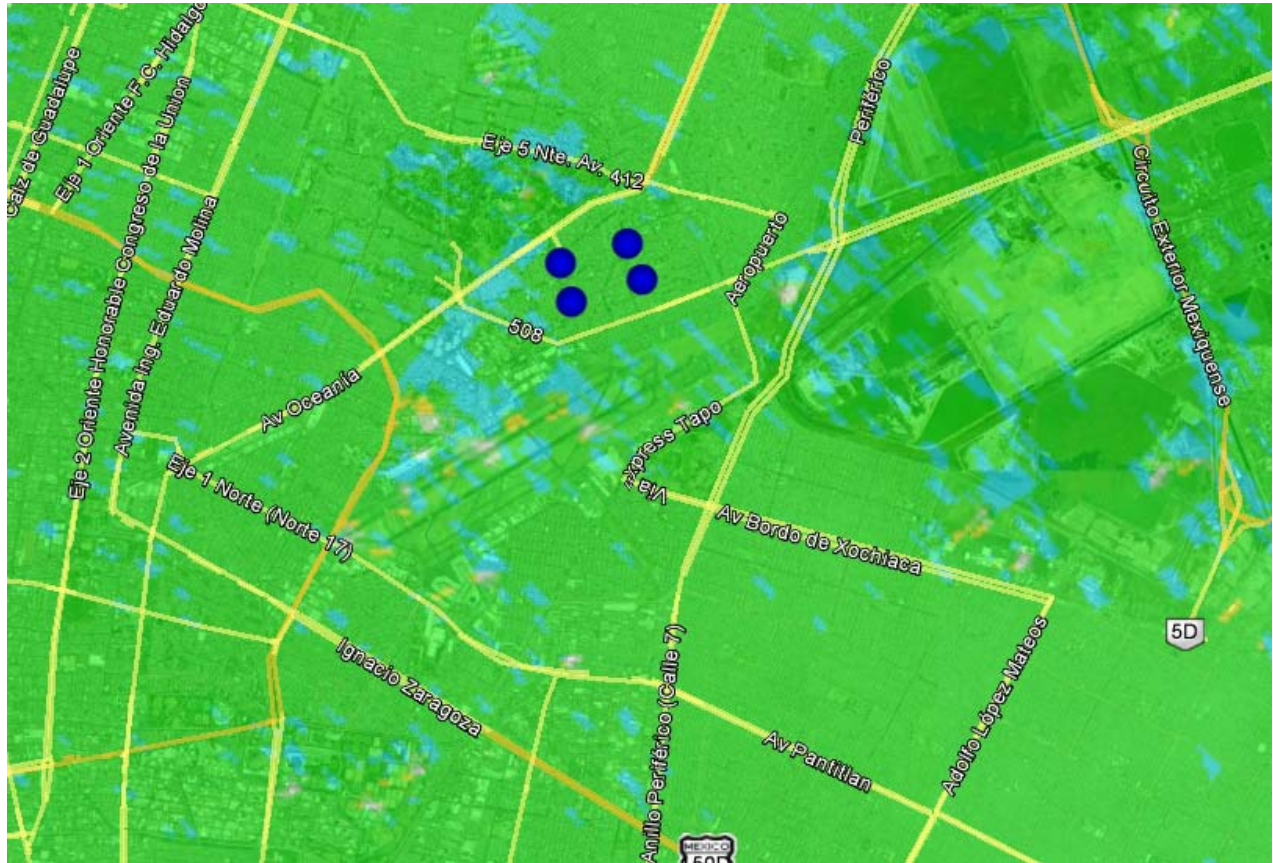


Figura 6.11: Ubicación de 4 sitios de medición que forman el conjunto de medición E33 para medidas en exteriores, el emplazamiento se encuentra dentro de la cobertura de la red SFN y se ubica en las inmediaciones del aeropuerto de la Ciudad de México

Capítulo 7

Conclusiones

En la presente tesis se ha planificado una campaña de pruebas de campo para televisión digital ATSC (estándar fijo) operando bajo la configuración de redes SFN. La campaña de pruebas permitirá estudiar el desempeño de una muestra representativa de receptores ATSC que están a la venta en México y que actualmente se están utilizando. La razón de evaluar estos receptores es por que su diseño delimita que pueden recibir correctamente o no en entornos SFN. Esta planificación establece parámetros de funcionamiento que se deben implementar en los transmisores de la red que será desplegada en la Ciudad de México y que garantizan una zona de cobertura lo suficientemente grande para llevar a cabo el estudio.

El alcance de esta planificación es la definición de las condiciones y características de cobertura, la potencia de transmisión de la red, la metodología y distribución de los sitios de medición en campo requeridos para que se pueda lograr el objetivo de evaluar el desempeño de los receptores en ambientes SFN.

Las características generales de la pruebas de campo son:

- La planificación de la medidas se ha realizado para la Ciudad de México.
- La red SFN ATSC está conformada por dos transmisores, cada sitio transmisor se encuentra ubicado en los emplazamientos en donde actualmente ya se provee de servicios de radiodifusión de TV. El despliegue de la red estará a cargo del socio radiodifusor TV UNAM y se utilizará el canal 20 digital, canal que actualmente tiene operativo esta estación de TV.
- La configuración propuesta para el despliegue de la red SFN es la configuración de Transmisores Distribuidos y seguirá los lineamientos establecidos en ATSC A/110 y ATSC A/111, documentación que describe las configuraciones en las cuales es posible la implementación de redes SFN con el estándar ATSC. La configuración de Transmisores Distribuidos es muy flexible en cuanto a la definición de parámetros de operación de la red.
- Puesto que el estándar ATSC ni los receptores están optimizados para movilidad, la medición de la señal ATSC se realizará en modo estático para exteriores e interiores. Se utilizarán dos antenas en recepción: una omnidireccional y la otra direccional; con la primera antena se permitirá considerar todas la señales multitrayecto que llegan al receptor y, con la segunda se logrará modificar la relación de potencias que se reciben de los transmisores. De tal manera que se pueden proponer parámetros de funcionamiento en la red SFN cuando en la recepción se usa cualquier tipo de estas dos antenas.
- El sistema de medidas se definió a partir de los parámetros que se desean medir en las pruebas de campo. Para optimizar los recursos disponibles (costos y tiempos) se implementará un sistema que permite recibir,

muestrear y guardar la señal de RF que se recibe de la red SFN ATSC. Este sistema permitirá repetir la medida en el laboratorio con cada receptor evitando el traslado de cada uno de ellos al lugar de medición, además permite analizar el desempeño de los receptores las veces que sean necesarias.

La cobertura de la red en la planificación de las pruebas de campo se realizó en base a la predicción de campo eléctrico con el software Radio Mobile v11.5.8, el cual está basado en el modelo de propagación Longley-Rice. Este software usa el método que pide la IFT para estimar la cobertura de una estación transmisora de TV. Se utilizó el umbral de campo eléctrico de $48 [dB \mu/V]$ definido por el gobierno mexicano para los canales 14 al 51 en la política para la transición digital de TV.

Las condiciones de cobertura de la red SFN se definieron en base al desempeño del receptor ATSC y que recomienda ATSC A/74 para que tenga buena recepción, se buscó que las condiciones contaran con todos los entornos posibles que se pueden encontrar dentro de una red SFN y retardos entre las señales nulos, moderados y fuertes. La distancia entre los transmisores es de 24.079 km y se definió una mayor potencia de transmisión en el transmisor del Cerro del Chiquihuite, éste al ubicarse a una mayor altura sobre el nivel promedio de la ciudad puede proporcionar una mayor cobertura, el transmisor TV UNAM tiene menor potencia por encontrarse al nivel de la ciudad y la cobertura de su señal define la red SFN sobre la del transmisor Cerro del Chiquihuite.

El tiempo para realizar la medición en recepción estática de la señal de RF se realizará por un periodo de 5 minutos en sitios definidos. Se definieron 178 sitios de medición, 148 para mediciones en exteriores y 30 para interiores, este número de puntos cumple con lo recomendado por la ITU para la evaluación de la cobertura de DTV. El principal parámetro de medición de la señal que nos permitirá definir si los receptores reciben bien o no, es el umbral de visibilidad (TOV), este umbral de visibilidad define que un receptor tiene mala recepción cuando en un periodo de un minuto se observan dos errores. El otro parámetro de medición será el campo eléctrico en recepción, para encontrar el umbral de campo eléctrico en donde se tiene buena recepción, este valor se cotejará con el valor de campo eléctrico que se obtiene al evaluar el TOV. Otros parámetros de medición involucran medir la dispersión temporal y espacial de la señal: definir la respuesta impulsional del canal inalámbrico permite conocer cómo es el canal de propagación ya que proporciona datos sobre el comportamiento de las señales en el entorno y puede ayudar a definir parámetros para delimitar las zonas donde el funcionamiento del receptor es bueno. Se recomienda que todas las pruebas, mediciones y recopilaciones de datos se realicen de acuerdo a los principios y procedimientos descritos en la planificación, a fin de que el análisis y las conclusiones que se deriven de dichas pruebas sean coherentes y comprensibles.

Los resultados de las pruebas de campo se espera que confirmen la viabilidad de implementar redes SFN bajo el estándar fijo de ATSC, además de permitir que instituciones reguladoras como el IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones) tengan resultados realizados en el país y le ayuden a fijar una postura sobre este tipo de redes.

Se espera que la planificación de las pruebas de campo y los resultados a los que se lleguen sirvan de guía para el diseño y despliegue de redes similares (configuración SFN de Transmisores Distribuidos). El funcionamiento de la red depende de las configuraciones de diseño y de un gran número de factores que se pueden encontrar presentes para diferentes entornos urbanos, por ello se recomienda estudiar la ubicación y variabilidad temporal de la señal recibida para poder extender los resultados a áreas urbanas similares y/o más grandes.

Bibliografía

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones. *Métodos de corrección de errores, de configuración de trama de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal*. Recomendación ITU-R BT.1306-6 (12/11), 2011.
- [2] Diario Oficial de la Federación. *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*. Art. 4 y 5, 2 de julio, 2004.
- [3] Advanced Television Systems Committee. *ATSC A/110:2011: Standard for Transmitter Synchronization*. Part 1, Washington, D.C., 8 de abril, 2011.
- [4] Advanced Television Systems Committee. *ATSC A/111:2009: ATSC Recommended Practice: Design Of Multiple Transmitter Networks*. Part 1, Washington, D.C., 18 de septiembre, 2009.
- [5] S.M. Weiss. Reception considerations for distributed transmission in atsc systems. In *Consumer Electronics, 2005. ICCE. 2005 Digest of Technical Papers. International Conference on*, pages 477–478, Jan 2005.
- [6] Diario Oficial de la Federación. *Política para la transición digital terrestre*. Art. IV 11 de septiembre, 2014.
- [7] Digital Video Broadcasting. *Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)*, ETSI. ETS 300744, 1997.
- [8] <http://www.arib.or.jp/english/>. Marzo de, 2015.
- [9] ARIB STD-B31. *Transmission system for digital terrestrial television broadcasting*. Versión 1.6.
- [10] ARIB STD-B32. *Video coding, audio coding, and multiplexing specifications for digital broadcasting*. Versión 2.1.
- [11] ABNT NBR 15601 NORMA BRASILEÑA (traducción al español). *Televisión digital terrestre — Sistema de transmisión*. 2007.
- [12] 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, 2007.
- [13] G. Sgrignoli. History of atsc digital television transmission system. In *Consumer Electronics, 2007. ICCE 2007. Digest of Technical Papers. International Conference on*, pages 1–2, Jan 2007.
- [14] Advanced Television Systems Committee. *ATSC A/53: ATSC Digital Television Standard*. Part 1-6, Washington, D.C., Jan, 2007.

- [15] <http://atsc.org/>. Marzo de, 2015.
- [16] Advanced Television Systems Committee. *ATSC A/54A:Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1*. Part 1, Washington, D.C., 4 December, 2006.
- [17] A. Mattsson. Single frequency networks in dtv. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 51(4):413–422, Dec 2005.
- [18] G. Burel. Transmitters separation for single frequency networks. In *Signal Processing Advances in Wireless Communications, 1999. SPAWC '99. 1999 2nd IEEE Workshop on*, pages 341–344, 1999.
- [19] S.M. Weiss. Reception considerations for distributed transmission in atsc systems. In *Consumer Electronics, 2005. ICCE. 2005 Digest of Technical Papers. International Conference on*, pages 477–478, Jan 2005.
- [20] W. Bretl, W.R. Meintel, G. Sgrignoli, Xianbin Wang, S.M. Weiss, and K. Salehian. Atsc rf, modulation, and transmission. *Proceedings of the IEEE*, 94(1):44–59, Jan 2006.
- [21] Yong-Tae Lee, Sung Ik Park, Ho min Eum, Jae Hyun Seo, Heung Mook Kim, Seung Won Kim, and Jong Soo Seo. A design of equalization digital on-channel repeater for single frequency network atsc system. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 53(1):23–37, March 2007.
- [22] Advanced Television Systems Committee. *ATSC A/153: ATSC Mobile DTV Standard*. Part 1-10, Washington, D.C., 2013.
- [23] Yiyuan Wu, P. Bouchard, B. Caron, D. Tyrie, and R. Trenholm. Canadian digital terrestrial television system technical parameters. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 45(4):355–364, Dec 1999.
- [24] Chai-Chin Lin, Chih-Ming Chen, Jenn-Hwan Tarng, Hsueh-Ming Hang, and Hsiao-Cheng Yu. Analysis of atsc field test results in taiwan. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 48(1):38–43, Mar 2002.
- [25] Federal Communications Commission. *DTV Report on COFDM and 8-VSB Performance*. Technical Report, VSB/COFDM Project, Dec., 2000.
- [26] Chi-Fang Huang, Theñan Chang, and Hsu Chau-Yun. *Field evaluations in Taiwan of the DVB-T COFDM and ATSC 8-VSB digital tv systems*. Technical report, Graduate Institute of Communication Engineering, Tatung University, Taiwan, Jul., 2003.
- [27] Leonardo Ramos. *Pruebas comparativas de recepción ATSC/DVB/ISDB*. Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión, Nov., 2001.
- [28] Yiyuan Wu, E. Pliszka, B. Caron, P. Bouchard, and G. Chouinard. Comparison of terrestrial dtv transmission systems: the atsc 8-vsb, the dvt-t cofdm, and the isdb-t bst-ofdm. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 46(2):101–113, Jun 2000.
- [29] Yiyuan Wu, Xianbin Wang, R. Citta, B. Ledoux, S. Lafleche, and B. Caron. An atsc dtv receiver with improved robustness to multipath and distributed transmission environments. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 50(1):32–41, March 2004.
- [30] 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, Jun, 2008.

- [31] K. Salehian, M. Guillet, B. Caron, and A. Kennedy. On-channel repeater for digital television broadcasting service. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 48(2):97–102, Jun 2002.
- [32] K. Salehian, B. Caron, and M. Guillet. Using on-channel repeater to improve reception in dtv broadcasting service area. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 49(3):309–313, Sept 2003.
- [33] K. Salehian, Y. Wu, and B. Caron. Design procedures and field test results of a distributed-translator network, and a case study for an application of distributed-transmission. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 52(3):281–289, Sept 2006.
- [34] Advanced Television Systems Committee. *ATSC A/74: Receiver Performance Guidelines*. Washington, D.C., April, 2010.
- [35] 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.
- [36] J. M. Matías. *Estudio de la radiodifusión local en 26 MHz utilizando el estándar DRM (Digital Radio Mondiale)*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco. Bilbao. Noviembre, 2008.
- [37] F. Maier. *Results of the DRM Field trial in Sri Lanka*. DRM, ITU-R document 6A/503-E. 2 de Mayo, 2011.
- [38] Nota Técnica. *Medições de Campo do Sistema DRM+ (Digital Radio Mondiale) em Baixa Potência na Faixa de FM em Xerém, Duque de Caxias/RJ*. Ditel, 2012.
- [39] G.A. Hufford, A.G. Longley, and W. A. Kissick. *A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. NTIA REPORT 82-100. Apr., 1982.
- [40] Comisión Federal de Telecomunicaciones. *Informe al Pleno del Estado de la Televisión Digital Terrestre (TDT) en México*. Junio, 2013.
- [41] 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.
- [42] J. Morgade, P. Angueira, A. Arrinda, R. Pfeffer, V. Steinmann, J. Frank, and R. Brugger. Sfn-iso and sfn-miso gain performance analysis for dvb-t2 network planning. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 60(2):272–286, June 2014.
- [43] I. Eizmendi, G. Prieto, G. Berjon-Eriz, I. Landa, and M. Velez. Empirical dvb-t2 thresholds for fixed reception. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 59(2):306–316, June 2013.
- [44] M.V. Guerra, C.V.R. Ron, and L. da Silva Mello. Experimental characterization of a sfn digital broadcast channel. In *Communications (LATINCOM), 2012 IEEE Latin-America Conference on*, pages 1–4, Nov 2012.
- [45] Rohde & Schwarz. http://www.rohde-schwarz.com/en/product/etl-options_63490-9255.html. Abril de, 2015.
- [46] Rohde & Schwarz. http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/7bm75/7BM75_1E.pdf. Abril de, 2015.
- [47] Revista del Consumidor. <http://revistadelconsumidor.gob.mx/?p=40645>. Abril de, 2015.

-
- [48] Ettus Research. <http://www.ettus.com/product/details/X300> – *KIT*. Abril de, 2015.
- [49] Ettus Research. <http://www.ettus.com/product/details/WBX>. Abril de, 2015.
- [50] Donghoon Kang, Hyobae Park, Sung Ik Park, Heung Mook Kim, and Wangrok Oh. Additional data transmission scheme using txid signal for atsc system. In *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1–3, March 2010.
