



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**CANALES DE PROPAGACIÓN PARA
REDES SFN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

DANIEL ESQUIVEL TRUJILLO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI



CIUDAD UNIVERSITARIA 16 /03/ 2016



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.

Designación de sinodales de Examen Profesional

Presidente: M.I. Jesús Reyes García

Vocal: Dr. José María Matías Maruri

Secretario: Dr. Víctor Rangel Licea

1er. Suplente: M.I. Juventino Cuellar González

2do. Suplente: Dr. Víctor García Garduño

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

Agradecimientos

Dedico este trabajo a mi familia. Gracias a mi padre, mi maestro y mi compañero en tantos momentos importantes, tu ingenio y perseverancia impactarán siempre en la manera como enfrento mi vida, te agradezco todas tus palabras de aliento y el ejemplo que me has dado para salir adelante en etapas difíciles. A mi madre, el pilar de mis días, gracias por tu entrega, tu compromiso, tu paciencia y tu inmensurable cariño, no existen las palabras para agradecerte lo que has hecho por mí. Para Tany y Mari, mis grandes ejemplos a seguir, gracias por todas las risas, los regaños, los consejos, con dos guías como ustedes, era imposible perder el camino.

Quiero agradecerle a la UNAM, por los casi 8 años que pasé en sus aulas, la mejor época en lo que va de mi vida y sin duda, la mejor universidad en la que pude haber estado. Me enseñó a querer a mi país, a valorar mis raíces y alimentar el hambre de lucha por un mejor futuro no solo para mí, sino para la sociedad en la que crecí.

También quiero darles las gracias a todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería por todo su esfuerzo y dedicación. En especial, me gustaría agradecer todo el apoyo, confianza y compromiso que tuvo conmigo el Dr. José María Matías, sus conocimientos, su experiencia y consejos me ayudaron mucho para la realización de este trabajo y en el inicio de mi vida laboral.

Asimismo, agradezco mucho al Proyecto Conacyt-CDTI N°189235 "Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC", por darme la oportunidad de usar el equipo de su laboratorio y por todo el apoyo y conocimientos de los compañeros que participan en el proyecto.

Resumen

La Televisión Digital Terrestre brinda la oportunidad de usar tecnologías de transmisión como las redes SFN (Single Frequency Network), las cuales permiten brindar cobertura a áreas de servicio en donde existen zonas de sombra usando solo un canal de radiofrecuencia. Este hecho es aprovechado por los órganos reguladores del sector de las telecomunicaciones para concesionar una menor cantidad de canales y así, poder asignar más espectro radioeléctrico en las bandas VHF y UHF para otro tipo de servicios, como las redes de banda ancha móvil. Sin embargo, dentro de una red SFN, los canales de propagación que deben enfrentar los receptores son mucho más desafiantes, por lo que su uso exige un conocimiento más profundo acerca de cómo se comportan los canales de propagación para poder establecer parámetros de diseño que permitan el correcto funcionamiento de la red de transmisión y de los receptores.

En este trabajo se hace una investigación detallada de los canales de propagación que se han definido hasta la fecha para simular las condiciones de propagación de señales de TDT tanto en redes MFN como en redes SFN. Además, se definen 2 nuevos canales de propagación con base en mediciones de campo realizadas en dos de las primeras redes SFN instaladas en México usando el estándar ATSC.

Todos los canales de propagación aquí presentados, tienen el fin de representar las condiciones de propagación que un receptor puede enfrentar en la realidad y brindan la oportunidad de simularlas para evaluar el desempeño de los receptores en un laboratorio.

ÍNDICE

Resumen	v
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Contribuciones.....	4
1.5 Estructura de la tesis.....	5
2 EL CANAL DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE RADIO	7
2.1 Definición y Fundamentos	7
2.2 Propagación de ondas de radio en las bandas VHF y UHF.....	8
2.2.1 Caracterización de la potencia recibida en un canal de propagación	9
2.2.2 La movilidad y el efecto Doppler	15
2.2.3 Canales de propagación dispersivos en tiempo y frecuencia.....	17
2.2.3.1 Dispersión en el tiempo.....	17
2.2.3.2 Dispersión en frecuencia	19
2.2.3.3 Respuesta impulsional del canal de propagación	22
3 LAS REDES MFN Y SFN	27
4 MODELOS DE CANAL DEFINIDOS PARA TDT	33
4.1 Proyecto AC318 Motivate (Mobile Television & Innovative Receivers)	36
4.2 Canales de Propagación Brasil A, B, C, D y E	41
4.3 Canales de propagación para redes SFN en terreno montañoso	49
4.4 Proyecto CELTIC Wing-TV	59
5 INSTALACIÓN DE UNA RED SFN	71
5.1 Redes SFN Puebla-Tlaxcala.....	72
5.2 Planeación de la red SFN para el canal 24 en la banda UHF	79
6 MEDICIONES DE CAMPO EN LA RED SFN PUEBLA-TLAXCALA	87
6.1 Equipo utilizado y procedimiento de medida	87
6.2 Mediciones	89
6.3 Análisis de resultados	100
7 NUEVOS CANALES DE PROPAGACIÓN PARA TDT EN RECEPCIÓN FIJA	109
7.1 Definición	109

7.1.1	Perfil con pre-eco para recepción fija en una zona sub-urbana.....	112
7.1.2	Perfil con post-eco para recepción fija en una zona sub-urbana	113
7.1.3	Consideraciones acerca de los canales de propagación definidos	114
7.2	Simulación de los nuevos canales de propagación	117
8	CONCLUSIÓN	121
	BIBLIOGRAFÍA	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Acercamiento al fenómeno de fading rápido [PARSONS, 2000].	11
Figura 2.2 Variación de la potencia media recibida con línea de vista directa [R&S, 2001].	11
Figura 2.3 Variación de la potencia medida recibida sin línea de vista directa [R&S, 2001].	12
Figura 2.4 Canal Rice [FISHER, 2009].	14
Figura 2.5 Canal Rayleigh [FISHER, 2009].	15
Figura 2.6 Recepción Móvil con efecto Doppler [FISHER, 2009].	15
Figura 2.7 Recepción móvil con efecto Doppler y multitrayecto [FISHER, 2009].	16
Figura 2.8 Cálculo del diferencial de frecuencia causado por el efecto Doppler [GÓMEZ, 2014].	17
Figura 2.9 Ilustración de la selectividad en frecuencia en el espectro de la señal recibida [M&H, 2011].	19
Figura 2.10 Reflexiones arribando a un receptor móvil.	22
Figura 2.11 Respuesta impulsional del canal para un escenario de tres trayectorias.	23
Figura 2.12 Representación de ecos lejanos y cercanos [S&P, 2014].	24
Figura 2.13 Acercamiento a un eco de la respuesta impulsional del canal [S&P, 2014].	24
Figura 2.14 Evolución de la respuesta impulsional del canal en el tiempo [S&V&A,2003].	25
Figura 2.15 Power Delay Profile. [S&V&A, 2003].	25
Figura 3.1 Operación de una red MFN. Cada transmisor cercano ocupa un canal distinto.	28
Figura 3.2 Operación de una red SFN. Todos los transmisores transmiten en el canal f_1 .	29
Figura 3.3 Esquema general de la distribución de la señal a transmitir en una red SFN.	31
Figura 4.1 Canal de Propagación RA6 COST 207.	38
Figura 4.2 Canal de propagación TU6 COST 207.	39
Figura 4.3 Canal de propagación para una red SFN AC318 Motivate.	40
Figura 4.4 Canal de propagación Brasil A.	42
Figura 4.5 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo A [ABERT/SET, 2000].	43
Figura 4.6 Canal de Propagación Brasil B.	44
Figura 4.7 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo B [ABERT/SET, 2000].	44
Figura 4.8 Canal de propagación Brasil C.	45
Figura 4.9 Canal de propagación Brasil D.	46
Figura 4.10 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo D [ABERT/SET, 2000].	47
Figura 4.11 Canal de Propagación Brasil E.	48
Figura 4.12 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo E [ABERT/SET, 2000].	48
Figura 4.13 Mapa de las ciudades de Zhengzhou y Kaifeng, Henan, China.	50
Figura 4.14 Acercamiento a la zona entre las ciudades de Zhengzhou y Kaifeng.	50
Figura 4.15 Canal de propagación Zhengzhou-Kaifeng.	52
Figura 4.16 Sitios de transmisión de la red SFN y puntos de prueba de la campaña de medida realizada por los investigadores brasileños [G&R&D, 2013].	53
Figura 4.17 Orografía de la zona de cobertura de la red SFN en Río de Janeiro [G&R&D, 2013].	54
Figura 4.18 Sitio Sumaré en Río de Janeiro, Brasil.	54
Figura 4.19 Perfil de retardo en el punto de prueba 6 en Río de Janeiro [G&R&D, 2013].	55
Figura 4.20 Perfil de retardo en el punto de prueba 16 en Río de Janeiro [G&R&D, 2013].	55
Figura 4.21 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -10 dB.	56
Figura 4.22 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -15 dB.	57
Figura 4.23 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -20 dB.	58
Figura 4.24 Perfil de potencia al retardo de las pruebas realizadas en una carretera de Oulu a 100 km/h (1 transmisor y 1 repetidor) [NOVEL, 2006].	63
Figura 4.25 Perfil de potencia al retardo de las pruebas realizadas en recepción portátil peatonal en interiores a 3 km/h (PI) en Turku (2 transmisores) [NOVEL, 2006].	64
Figura 4.26 Perfil de potencia al retardo de las pruebas realizadas en recepción móvil vehicular urbano a 30 km/h en Helsinki (3 transmisores y varios repetidores) [NOVEL, 2006].	64
Figura 4.27 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en interiores a 3 km/h.	66
Figura 4.28 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en exteriores a 3 km/h.	67
Figura 4.29 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular urbano a 30 km/h.	68
Figura 4.30 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular rural a 100 km/h.	69
Figura 5.1 Posición de los sitios de transmisión de TV Azteca.	72

Figura 5.2 Diagrama de las redes SFN instaladas.....	74
Figura 5.3 Patrón de radiación horizontal aproximado de la antena de Puebla.	79
Figura 5.4 Patrón de radiación horizontal aproximado de la antena de Tlaxcala.....	80
Figura 5.5 Cobertura del sitio transmisor de Puebla en el canal 24.	81
Figura 5.6 Cobertura del sitio de transmisión de Puebla en la ciudad de Tlaxcala.	82
Figura 5.7 Cobertura del sitio transmisor de Tlaxcala en el canal 24.	82
Figura 5.8 Zona de recepción crítica para la red SFN.	85
Figura 5.9 Posición de las regiones pobladas de los municipios de Zacatelco y Xicohtzinco.	86
Figura 6.1 Diagrama de interconexión del equipo usado en las pruebas de campo.....	88
Figura 6.2 Distribución de los puntos donde se llevaron a cabo las mediciones.	89
Figura 6.3 Patrón de eco en el punto 1.....	91
Figura 6.4 Espectro de la señal en el punto 1.....	91
Figura 6.5 Patrón de eco en el punto 2.....	92
Figura 6.6 Espectro de la señal en el punto 2.....	92
Figura 6.7 Patrón de eco en el punto 3.....	93
Figura 6.8 Espectro de la señal en el punto 3.....	93
Figura 6.9 Patrón de eco en el punto 4.....	94
Figura 6.10 Espectro de la señal en el punto 4.	94
Figura 6.11 Patrón de eco en el punto 5.	95
Figura 6.12 Espectro de la señal en el punto 5.	95
Figura 6.13 Patrón de eco en el punto 6.	96
Figura 6.14 Espectro de la señal en el punto 6.	96
Figura 6.15 Patrón de eco en el punto 7.	97
Figura 6.16 Espectro de la señal en el punto 7.	97
Figura 6.17 Patrón de eco en el punto 8.	98
Figura 6.18 Espectro de la señal en el punto 8.	98
Figura 6.19 Patrón de eco en el punto 9.	99
Figura 6.20 Espectro de la señal en el punto 9.	99
Figura 6.21 Posición del punto de medida en la población de Nativitas, Puebla.	103
Figura 6.22 Patrón de eco en Nativitas con antena receptora omnidireccional.....	103
Figura 6.23 Patrón de eco en Nativitas con antena receptora direccional.	104
Figura 6.24 Gráfico del M.E.R.....	105
Figura 6.25 Gráfico de Potencia Recibida.....	106
Figura 7.1 Definición de umbral de discriminación para el canal de propagación con pre-eco.	110
Figura 7.2 Definición de umbral de discriminación para el canal de propagación con post-eco.....	110
Figura 7.3 Perfil con pre-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.....	112
Figura 7.4 Perfil con post-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.	113
Figura 7.5 Canal de Propagación en una red SFN de 2 transmisores usando como base el Canal Brasil A.	115
Figura 7.6 Diagrama de conexiones del equipo utilizado en las simulaciones.	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Canales asignados para la transmisión de señales de televisión terrestre.....	8
Tabla 4.1 Canal de Propagación RA6 COST 207.....	38
Tabla 4.2 Canal de propagación TU6 COST 207.....	38
Tabla 4.3 Canal de Propagación para una red SFN AC318 Motivate.....	39
Tabla 4.4 Canal de Propagación Brasil A.....	42
Tabla 4.5 Canal de Propagación Brasil B.....	43
Tabla 4.6 Canal de Propagación Brasil C.....	45
Tabla 4.7 Canal de Propagación Brasil D.....	46
Tabla 4.8 Canal de Propagación Brasil E.....	47
Tabla 4.9 Canal de propagación Zhengzhou-Kaifeng.....	51
Tabla 4.10 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -10 dB.....	56
Tabla 4.11 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -15 dB.....	57
Tabla 4.12 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -20 dB.....	58
Tabla 4.13 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en interiores a 3 km/h.....	66
Tabla 4.14 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en exteriores a 3 km/h.....	67
Tabla 4.15 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular urbano a 30 km/h.....	68
Tabla 4.16 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular rural a 100 km/h.....	69
Tabla 5.1 Descripción del equipo de las redes SFN Puebla-Tlaxcala.....	76
Tabla 5.2 Descripción de las señales de las redes SFN Puebla-Tlaxcala.....	78
Tabla 5.3 Definición de intensidades de campo eléctrico en las zonas de servicio para TDT.....	80
Tabla 5.4 Comportamiento de los receptores recomendado por ATSC ante ecos estáticos.....	84
Tabla 6.1 Mediciones en el punto 1.....	91
Tabla 6.2 Mediciones en el punto 2.....	92
Tabla 6.3 Mediciones en el punto 3.....	93
Tabla 6.4 Mediciones en el punto 4.....	94
Tabla 6.5 Mediciones en el punto 5.....	95
Tabla 6.6 Mediciones en el punto 6.....	96
Tabla 6.7 Mediciones en el punto 7.....	97
Tabla 6.8 Mediciones en el punto 8.....	98
Tabla 6.9 Mediciones en el punto 9.....	99
Tabla 7.1 Perfil con pre-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.....	112
Tabla 7.2 Perfil con post-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.....	113
Tabla 7.3 Canal de Propagación en una red SFN de 2 transmisores usando como base el Canal Brasil A.....	115
Tabla 7.4 Umbrales de recepción para el perfil con pre-eco definido en la tabla 7.1.....	119
Tabla 7.5 Umbrales de recepción para el perfil con post-eco definido en la tabla 7.2.....	119

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Hoy en día, las redes en frecuencia única (SFN) se utilizan en varios países del mundo como una alternativa para implementar redes de transmisión para radiodifusión haciendo un uso eficiente del espectro radioeléctrico. En la actualidad, esto es de suma importancia ya que el segmento del espectro ocupado por los canales de televisión terrestre en la banda UHF, es muy deseado por los operadores de redes móviles, sector de la industria de telecomunicaciones que está teniendo un crecimiento exponencial. Entre menos canales de televisión se utilicen, es posible liberar más frecuencias en esta valiosa banda.

Las redes SFN (*Single Frequency Network*), son una tecnología de transmisión usada en los sistemas de radiodifusión digital que consiste en utilizar varios transmisores compartiendo el mismo canal de radiofrecuencia para dar servicio a un área en común [ATSC, 2011]. Cada transmisor emite la misma señal de información y todas las señales transmitidas, o algunas de ellas, son captadas por los receptores casi al mismo tiempo, por lo que parecen ecos que han sido producidos de forma natural cuando una señal original viaja por un canal de propagación con multitrayecto.

Las redes MFN (*Multiple Frequency Network*) son la contraparte de las redes SFN y consisten en dar servicio al área de cobertura usando tantos canales de radiofrecuencia como sean necesarios. Este tipo de redes son utilizadas en la radiodifusión analógica y se pretende que su uso en radiodifusión digital sea mínimo.

Dependiendo de las posiciones geográficas de los sitios de transmisión, las potencias de los transmisores y los patrones de radiación de las antenas transmisoras, es muy común que aparezcan zonas de sombra. Usando redes SFN, se le da servicio a cada zona de sombra con el mismo canal de RF usado para cubrir el resto de la zona de cobertura autorizada, mientras que con redes MFN es necesario utilizar canales de RF distintos por cada una de las zonas de sombra a las que se le quiere dar servicio, por lo

que un radiodifusor puede poseer varios canales de radiofrecuencia para brindarle cobertura a una sola región.

Para poder hacer posible la demodulación y decodificación de la señal en los receptores que trabajan dentro de la cobertura de una red SFN, es necesario controlar varios aspectos técnicos en cada uno de los sitios de transmisión que pertenecen a la red, siendo el más importante el instante en el que cada símbolo de información es transmitido al aire. Como es necesario establecer un sistema de sincronía entre todos los transmisores de la red, los sistemas de radiodifusión analógica no pueden hacer uso de las redes SFN, ya que su plataforma tecnológica no lo permite.

Con el fin de mejorar la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico en las bandas VHF y UHF, resulta muy apremiante terminar con las transmisiones analógicas de señales de radio y televisión y dar paso a los sistemas de radiodifusión digital, permitiendo así el uso de tecnologías como la multiprogramación y las redes SFN, lo cual ayudará a responder en el futuro a la creciente demanda de servicios de telecomunicaciones móviles de banda ancha.

1.2 Definición del problema

La implementación de redes SFN genera entornos de propagación con multitrayecto que producen señales que arriban a los receptores como ecos con niveles de potencia y variaciones en tiempo y frecuencia que dificultan el accionar de los receptores. El problema crece en complejidad cuando la recepción es móvil o portátil, puesto que se deben considerar los efectos debidos al desplazamiento Doppler.

Asimismo, algunos de los aspectos que más influyen en la complejidad de los canales de propagación es la orografía y la existencia de obstáculos debidos al urbanismo en las zonas en donde se implementan las redes SFN. La dificultad que representa demodular y decodificar una señal de televisión digital terrestre en una zona rural llana, sin montañas ni edificios y donde solo opera un transmisor en el canal de RF sintonizado, no se puede comparar con el reto que representa el correcto

funcionamiento de los receptores que operan en el área de cobertura de una red SFN en una zona montañosa y con urbanismo denso.

Los fabricantes de receptores se apegan a las especificaciones técnicas generadas por las organizaciones que diseñaron los estándares de transmisión de señales televisivas con el fin de asegurar que sus receptores serán capaces de recuperar el audio y el video ante los entornos de propagación más comunes. Sin embargo, es necesario recurrir a canales de propagación definidos para evaluar el desempeño de los receptores ante condiciones que han sido observadas en la realidad. Estos canales de propagación pueden ser simulados en un laboratorio haciendo uso de equipo especializado y dan la oportunidad de mejorar la robustez del receptor haciendo notar las debilidades y fortalezas del diseño del fabricante. Naturalmente, la calidad de un receptor es directamente proporcional a la complejidad de los canales de propagación en los que es capaz de funcionar adecuadamente.

Por tal motivo, entre mayor sea la variedad de canales de propagación que permitan representar condiciones reales, las posibilidades de evaluar el desempeño de los receptores ante diversas condiciones crecen, logrando identificar mejoras potenciales en los receptores y brindándole información muy valiosa a los diseñadores de las redes SFN que permite reconocer los entornos de propagación que deben evitarse dentro del área de cobertura de sus redes. A medida que los receptores mejoren su tecnología de recepción y los radiodifusores elijan los parámetros técnicos de transmisión adecuadamente para generar las mejores condiciones de recepción posibles dentro de sus áreas de cobertura, será más fácil la implementación de las redes SFN y su desempeño será mejor.

Esta es la razón por la que muchas organizaciones del mundo han trabajado en la obtención de los parámetros que caracterizan a los canales de propagación reales ante diversas condiciones. Este trabajo de tesis, se suma a estos esfuerzos y contribuye al catálogo de canales de propagación definidos hasta ahora para la simulación de entornos que se presentan en redes de transmisión SFN y MFN.

1.3 Objetivos

Definir los parámetros que caractericen al menos un nuevo canal de propagación para la recepción de señales de televisión digital en un punto fijo que tendría que enfrentar un receptor que opera dentro de la cobertura de una red de transmisión SFN.

1.4 Contribuciones

En este trabajo se presentan dos nuevos canales de propagación que representan las condiciones que puede enfrentar un receptor en recepción fija dentro del área de cobertura de una red SFN real, en una zona suburbana y con orografía llana. El medio para obtener ambos canales, fueron mediciones de campo llevadas a cabo para evaluar el desempeño de dos de las primeras redes SFN operando satisfactoriamente en México utilizando el estándar ATSC.

También se documenta la instalación de ambas redes SFN, se describe el proceso de diseño, el equipo utilizado y los criterios de configuración seguidos de acuerdo a los estudios de cobertura obtenidos con software especializado. Además, se describe la campaña de pruebas de campo y se presentan los resultados, así como el análisis de los mismos.

Este precedente es muy importante, ya que la mayor cantidad de redes SFN que operan en el mundo usan los estándares basados en OFDM como DVB-T, ISDB-T o DTMB y actualmente, muchos radiodifusores piensan que nos es posible implementar redes SFN usando el estándar ATSC.

Esta tesis, forma parte de los trabajos que se han realizado en el Proyecto Conacyt-CDTI N°189235 "Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC" y pretende ser una referencia para poder realizar informes técnicos sobre el impacto de la introducción de la tecnología SFN con ATSC en México, que es uno de los objetivos de este proyecto.

1.5 Estructura de la tesis

La tesis está organizada de la siguiente manera:

- **Capítulo 1.** Provee una introducción general al tema, la descripción del problema, los objetivos y las contribuciones de este trabajo.
- **Capítulo 2.** Brinda al lector los aspectos teóricos fundamentales para entender qué es un canal de propagación, sus principales características y los elementos que le complican el accionar a los receptores. Como la forma en la que se propagan las ondas de radio cambian con la frecuencia, la información presentada en este capítulo se acota, en su mayoría, a los fenómenos presentados en las bandas VHF y UHF.
- **Capítulo 3.** En este capítulo se hace un análisis de las características, operación, ventajas y desventajas de las redes de transmisión SFN y MFN.
- **Capítulo 4.** Se presentan diversos canales de propagación obtenidos por varias organizaciones de todo el mundo que tienen como objetivo simular las condiciones que un receptor debe enfrentar dentro de las zonas de cobertura tanto en redes MFN como en redes SFN, en recepción fija, móvil o portátil y en zonas llanas, montañosas, rurales, urbanas o suburbanas. En esta sección es posible identificar cómo afectan a la complejidad de los canales de propagación en redes MFN y SFN factores como la recepción en interiores o en exteriores, la orografía del lugar y el nivel de urbanismo.
- **Capítulo 5.** Describe el contexto y el proceso que se siguió para la instalación de dos redes SFN usando el estándar ATSC para brindar cobertura a las ciudades de Puebla, Tlaxcala y localidades vecinas.
- **Capítulo 6.** En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de campo que se llevaron a cabo para evaluar el desempeño de una de las redes SFN instalada para brindar cobertura a las ciudades de Puebla, Tlaxcala y localidades vecinas. Se describe el equipo usado para llevar a cabo las mediciones, así como el procedimiento que se siguió para la obtención de medidas como el patrón de eco en cada punto de medida, la potencia recibida,

el M.E.R., el espectrograma de la señal y la calidad del audio y del video recibido.

- **Capítulo 7.** En esta sección se definen dos nuevos canales de propagación para representar las condiciones de recepción que puede enfrentar un receptor dentro de la zona de cobertura de una red SFN con base en las medidas obtenidas en las pruebas de campo descritas en el capítulo 6. Además, se usan los dos nuevos canales de propagación definidos para evaluar el desempeño de dos receptores comerciales ante las condiciones que intentan representar ambos canales, para ello, se hizo uso de las instalaciones del laboratorio del Proyecto Conacyt-CDTI N°189235 "Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC" en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Capítulo 8.** Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo y se destacan algunas posibles mejoras en la política de regulación de redes SFN en México, para motivar su uso y reducir la resistencia que existe por parte de los radiodifusores a utilizar esta tecnología.

2 EL CANAL DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE RADIO

2.1 Definición y Fundamentos

Los sistemas de telecomunicaciones emplean diversos medios de transmisión para cumplir el objetivo de transmitir información de un lugar a otro. Hoy en día, los medios de transmisión cableados hacen uso de varias técnicas de blindaje para proteger las señales que transportan, sin embargo, existe una creciente demanda de servicios de telecomunicaciones inalámbricos por parte de los usuarios, por lo que nos vemos en la necesidad de usar al espacio libre como medio de transmisión, donde la protección de las señales ante diversos agentes que deterioran su calidad, se hace mucho más complicada.

El canal de propagación es el espacio en el cual las ondas electromagnéticas se desplazan desde el transmisor hasta el receptor, tomando en cuenta los efectos que cambian la naturaleza de la señal conforme ésta se propaga en el espacio como:

- Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN)
- Fuentes de interferencias de diversos tipos.
- Difracción y dispersión de ondas.
- Atenuación.
- Multitrayectorias.
- Efecto Doppler.

Los efectos mencionados afectan en mayor o menor grado dependiendo de las características de cada sistema de radiocomunicación, siendo la más importante la frecuencia de transmisión [FISHER, 2009]. Las características de propagación en la banda VLF (3 kHz – 30 kHz) son muy diferentes a lo que ocurre con las señales en la banda SHF (3 GHz – 30 GHz).

Los canales asignados para la radiodifusión de televisión terrestre se encuentran en la banda VHF y UHF dentro de 5 sub-bandas. El primer dividendo digital ha dejado como resultado que solo se concesionen frecuencias hasta el canal 51 para liberar la

banda de los 700 MHz, quedando la asignación de frecuencias como se resume en la tabla 2.1.

Banda	Sub-banda	Canales
VHF	I (54 – 72 MHz)	2 - 4
	II (76 – 88 MHz)	5 y 6
	III (174 – 216 MHz)	7 – 13
UHF	IV (470 – 632 MHz)	14 – 40
	V (632 – 698 MHz)	41 - 51

Tabla 2.1 Canales asignados para la transmisión de señales de televisión terrestre.

Además de los servicios de radiodifusión, las bandas VHF y UHF son las más valoradas para la implementación de comunicaciones inalámbricas móviles, por tal motivo, es importante conocer más a fondo las características de propagación en estas dos bandas y tener las bases para comprender los diferentes modelos de estimación de canal en sistemas de televisión para recepción fija y móvil.

2.2 Propagación de ondas de radio en las bandas VHF y UHF

En las bandas VHF (30 MHz – 300 MHz) y UHF (300 MHz – 3000 MHz), la principal forma de propagación de las ondas electromagnéticas es a través de línea de vista directa, en algunos casos, el alcance de la señal se extiende más allá del horizonte óptico debido al efecto de desviación de las ondas electromagnéticas a causa del cambio del coeficiente de refracción de la tropósfera, el cuál varía con la altura respecto a la superficie terrestre [PARSONS, 2000]. Por otro lado, la atenuación es considerable en estas bandas de frecuencia, forzando a que las áreas de cobertura puedan tener radios de hasta algunas decenas de kilómetros. Estas características hacen posible que se puedan ofrecer servicios de radiocomunicaciones usando las mismas frecuencias en localidades relativamente cercanas, lo que permite usar el espectro radioeléctrico eficientemente.

La capacidad que tienen las ondas para penetrar estructuras sólidas, el buen compromiso que existe entre capacidad de transmisión y alcance, así como la posibilidad de usar antenas con dimensiones adecuadas y ganancias relativamente buenas, hacen de este par de bandas el mejor fragmento del espectro radioeléctrico para la implementación de una gran cantidad de servicios inalámbricos.

2.2.1 Caracterización de la potencia recibida en un canal de propagación

El espacio libre es un medio de transmisión dinámico, la variabilidad de su comportamiento es su principal característica. Las vicisitudes que enfrentan las señales que viajan por el espacio libre en un instante dado, pueden ser completamente diferentes algunos milisegundos después. Por esta razón, cualquier diseño de un sistema de radiocomunicaciones debe tomar en cuenta el dinamismo del medio de transmisión para asegurar que el servicio estará operando la mayor parte del tiempo, venciendo todas las dificultades que conlleva la transmisión de información en el espacio libre.

Uno de los principales elementos que buscamos conocer cuando hablamos de un canal de propagación, es la potencia de la señal que arriba al receptor a una distancia determinada medida desde el sitio de transmisión. Para lograr predecir qué tan potente será la señal cuando llegue al receptor, se hace uso de métodos teóricos y empíricos, ya que no se ha logrado tener un modelo matemático que sea aplicable para todos los casos. Por ejemplo, *la ecuación de Friis* (ec. 1.1), nos da la oportunidad de predecir, de una manera teórica, la potencia recibida a una distancia d medida desde el transmisor hasta la posición del receptor. Esta ecuación se usa para señales que se propagan en el espacio libre [PARSONS, 2000].

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (1.1)$$

Donde:

- P_R es la potencia recibida en W.
- P_T es la potencia del transmisor en W.

- G_T es la ganancia de la antena transmisora.
- G_R es la ganancia de la antena receptora.
- c es la velocidad de luz en el espacio libre en m/s.
- f es la frecuencia de la portadora en Hz.
- d es la distancia en metros medida desde el sitio de transmisión.

La *ecuación de Friis* puede ayudarnos para hacer presupuestos de enlaces satelitales, pero no funciona del todo para enlaces terrestres, donde el receptor puede estar en zonas de sombra o recibir la señal desde distintas trayectorias. En zonas urbanas, la atenuación de las señales es mucho más rápida que en zonas rurales con pocos obstáculos de gran tamaño; esta es la razón por la que existen muchos modelos empíricos que tratan de modelar de una mejor manera la variación de la potencia con respecto a la distancia, tomando como base el entorno en el que se desempeña el sistema de radiocomunicación. Sin embargo, aun encontrando un modelo que proporcione resultados cercanos a lo que ocurre en la realidad, la potencia de la señal varía de forma aleatoria alrededor de valores promedio, debido al fenómeno del multitrayecto.

Podemos hablar de dos tipos de fluctuaciones que motivan la aleatoriedad de la potencia de las señales que reciben los receptores: El fading lento y el fading rápido. Estas fluctuaciones aparecen porque la señal que capta el receptor en realidad es la superposición de varias réplicas de la señal original con diferentes fases y amplitudes arribando desde varios ángulos [PARSONS, 2000].

El fading rápido se puede observar cuando tomamos mediciones de la potencia de la señal con pasos de media longitud de onda. Esta distancia es suficiente para notar desvanecimientos en la envolvente de la señal recibida, los cuales pueden llegar a tener profundidades de más de 30 dB. La causa de este tipo de fading son todos los objetos que a menudo se encuentran en la periferia del receptor, como paredes o muebles. En la figura 2.1 se pueden observar los desvanecimientos en la envolvente de una señal debido al fading rápido.

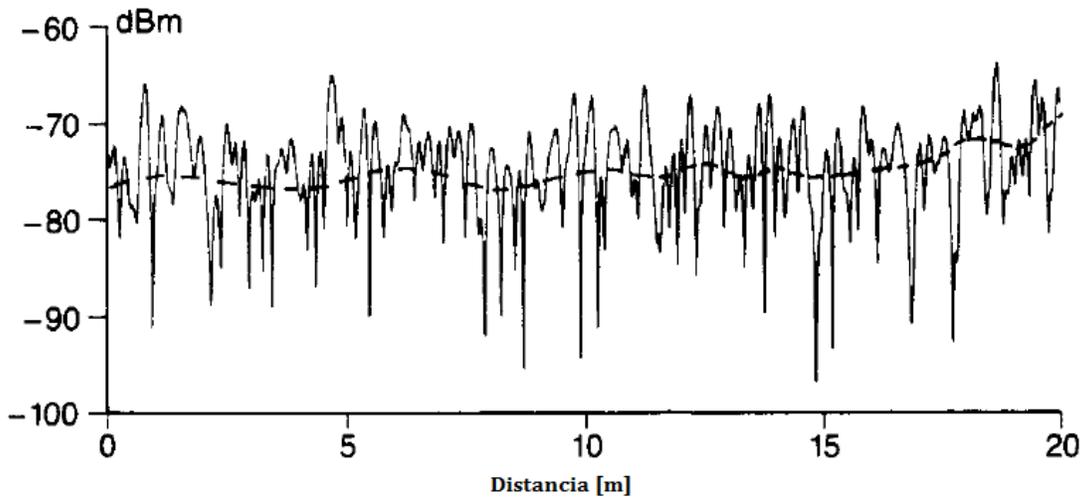


Figura 2.1 Acercamiento al fenómeno de fading rápido [PARSONS, 2000].

Cuando el receptor no tiene línea de vista directa hacia el transmisor, los desvanecimientos producidos por el fading rápido, suelen ser más profundos. En las figuras 2.2 y 2.3 se presentan ejemplos de la potencia media captada por un receptor en movimiento, se puede observar cómo va variando la potencia de la señal con el tiempo.

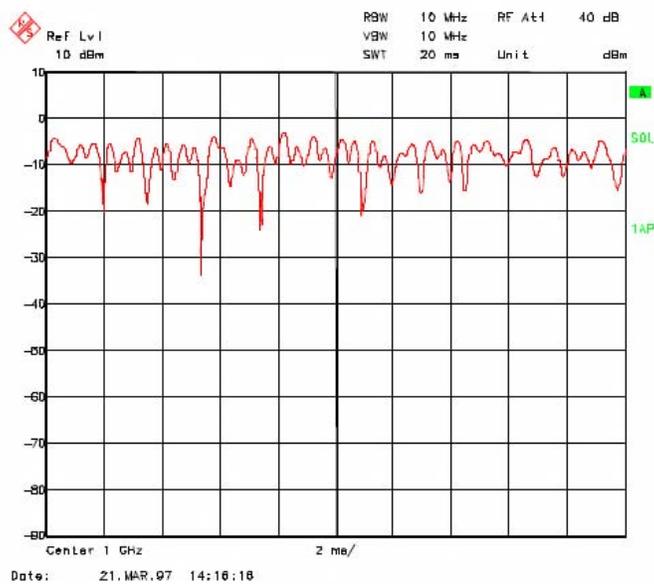


Figura 2.2 Variación de la potencia media recibida con línea de vista directa [R&S, 2001].

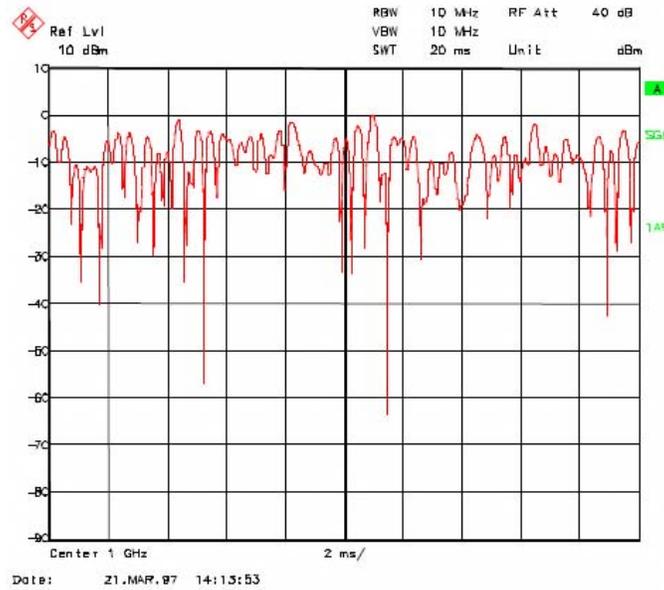


Figura 2.3 Variación de la potencia medida recibida sin línea de vista directa [R&S, 2001].

Por otro lado, el fading lento es más difícil de detectar en distancias cortas y solo es percibido cuando se toman muestras de la potencia de la señal a intervalos de gran distancia (del orden de kilómetros), su principal causa es el multirayecto ocasionado por grandes obstáculos como montañas o edificios [PARSONS, 2000].

Ni el fading rápido ni el fading lento, pueden predecirse de forma determinística, una alternativa para diseñar correctamente los sistemas de radiocomunicaciones, es considerar que la potencia recibida es el resultado de un proceso estocástico representado por funciones de probabilidad [UIT-R P.1057-1, 2001]. En cada punto dentro de la zona de cobertura de un sistema de radiocomunicaciones, la potencia recibida estará determinada por tres factores [GÓMEZ, 2014]:

- La variación inversa de la potencia recibida respecto a la distancia.
- Las fluctuaciones debidas al fading lento.
- Las fluctuaciones debidas al fading rápido.

Como ya se mencionó, para predecir la variación inversa de la potencia recibida respecto a la distancia, se utilizan métodos teóricos, empíricos o combinados, dependiendo de la zona en la que trabajará el sistema inalámbrico.

En el caso del fading, existen varias funciones de densidad de probabilidad que se usan para el modelado de las variaciones debidas tanto a las fluctuaciones lentas como rápidas, sin embargo, todas ellas toman como base tres funciones, las cuales son: *la distribución normal o Gaussiana*, *la distribución Rice* y *la distribución Rayleigh* [FISHER, 2009]. Las funciones de densidad de probabilidad de estas distribuciones nos ayudan a estimar la probabilidad de que en una localidad la potencia recibida de la señal de interés esté dentro de un determinado rango, el cual se elige de acuerdo a los requerimientos técnicos del sistema.

La distribución de probabilidad que se usa para estimar el efecto del fading lento es la función log-normal, basada en la distribución Gaussiana. Esta distribución se centra en el valor promedio de la envolvente y suele tener una desviación estándar σ de entre 6 y 10 dB [GÓMEZ, 2014]. La ecuación 1.2 es la función de densidad de probabilidad para la distribución log-normal [UIT-R P.1057-1, 2001].

$$p_r(r) = \frac{1}{r\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(r)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.2)$$

Donde:

- r es la variable aleatoria que representa el valor de la amplitud de la envolvente que resulta de la superposición de todas las señales que arriban al receptor.
- σ es la desviación estándar.
- μ la media de la amplitud de la envolvente.

Cuando hablamos de fading rápido existen dos enfoques. El primero de ellos considera que entre el transmisor y el receptor existe una trayectoria directa, es decir, hay línea de vista. A este canal se le conoce como *canal Rice* (fig. 2.4), la ecuación 1.3 es la función de densidad de probabilidad que modela la variación de la potencia recibida en este tipo de canales [UIT-R P.1057-1, 2001]:

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+r_s^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{r r_s}{\sigma^2}\right) \quad (1.3)$$

Donde:

- r es la variable aleatoria que representa el valor de la amplitud de la envolvente que resulta de la superposición de todas las señales que arriban al receptor incluyendo la señal que siguió la trayectoria de línea de vista directa.
- r_s es la amplitud de la envolvente de la señal que arribó vía la trayectoria de línea de vista directa.
- σ es la desviación estándar.
- $I_0(\cdot)$ es la función de Bessel modificada de clase 1 y orden 0.

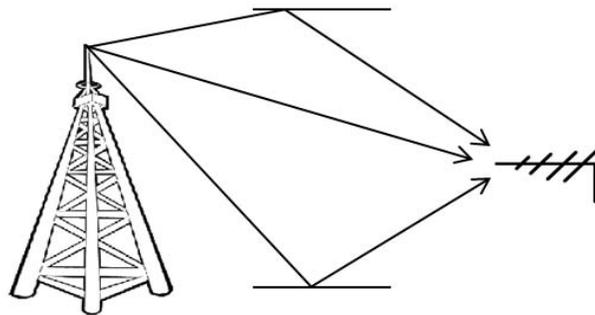


Figura 2.4 Canal Rice [FISHER, 2009].

El segundo enfoque, establece la idea de que no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor, por lo que la única forma de que la señal arribe al receptor es mediante reflexión, refracción, difracción y dispersión de la señal (scattering). El nombre del canal con estas características es el *canal Rayleigh* (fig. 2.5) y como su nombre lo indica, la función de densidad de probabilidad que caracteriza la variación de la potencia de la señal recibida después de viajar por un canal de propagación de este tipo, es la función de densidad de probabilidad Rayleigh (ec. 1.4) [UIT-R P.1057-1, 2001].

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4)$$

Donde:

- r es la variable aleatoria que representa el valor de la amplitud de la envolvente que resulta de la superposición de todas las señales que arriban al receptor.
- σ es la desviación estándar.

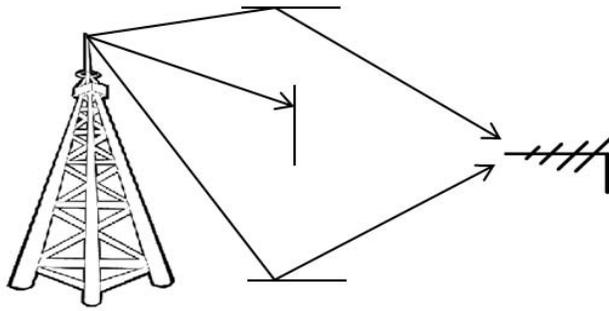


Figura 2.5 Canal Rayleigh [FISHER, 2009]

La distribución Rayleigh es la más común para sistemas de radiodifusión, ya que en macrocelulas, generalmente es complicado tener línea de vista directa entre el transmisor y el receptor.

2.2.2 La movilidad y el efecto Doppler

Ahora bien, si el receptor se está moviendo a una cierta velocidad alejándose del transmisor o acercándose a él, ocurrirá un cambio en la frecuencia negativo o positivo Δf debido al *efecto Doppler* (Fig. 2.6). El desplazamiento en frecuencia depende de la velocidad del movimiento, su dirección y la longitud de onda de la señal del sistema.

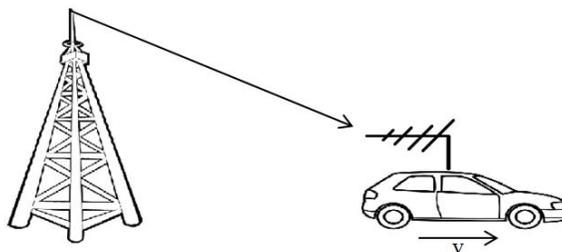


Figura 2.6 Recepción Móvil con efecto Doppler [FISHER, 2009].

¿Qué pasaría si además del desplazamiento Doppler, existen distintas trayectorias por las cuales está arribando la señal al receptor? Lo que sucede es que cada objeto en donde están rebotando las señales que llegan al receptor, pueden ser tomados como diversas fuentes de transmisión. El móvil que transporta al receptor, se estará moviendo en diferentes ángulos con respecto a cada fuente; para algunas de ellas, el receptor se alejará y para otras se estará acercando. El resultado es que dentro de la banda sintonizada por el receptor habrá una superposición de espectros. Cada espectro pertenece a la misma señal, pero con desplazamientos Doppler distintos, por lo que el receptor debe hacer uso de avanzadas técnicas de estimación de canal, para poder demodular la señal correctamente.

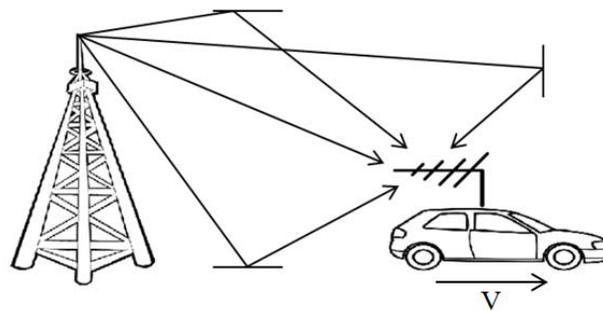


Figura 2.7 Recepción móvil con efecto Doppler y multitrayecto [FISHER, 2009].

El efecto Doppler causa problemas más graves conforme la frecuencia y la velocidad relativa entre el receptor y el transmisor aumentan. El efecto Doppler que experimenta un celular en las manos de un peatón es despreciable, pero el que sufre un receptor que viaja dentro de un tren que alcanza velocidades de 300 km/h no lo es y genera muchos problemas. La ecuación 1.5 muestra cómo calcular el desplazamiento en frecuencia causado por este efecto de acuerdo con los parámetros mostrados en la figura 2.8.

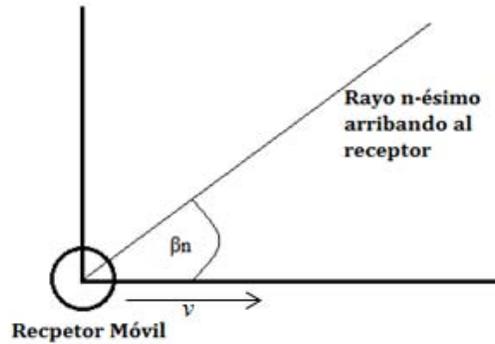


Figura 2.8 Cálculo del diferencial de frecuencia causado por el efecto Doppler [GÓMEZ, 2014].

$$\Delta f_n = \frac{v}{\lambda} * \cos(\beta_n) \quad (1.5)$$

Donde λ es la longitud de onda de la portadora. Otra manera de escribir la ecuación 1.5 es la ecuación 1.6:

$$\Delta f_n = \frac{f_c * v}{C_0} * \cos(\beta_n) \quad (1.6)$$

Donde f_c es la frecuencia de la portadora y C_0 la velocidad de la luz en el espacio libre.

2.2.3 Canales de propagación dispersivos en tiempo y frecuencia

2.2.3.1 Dispersión en el tiempo

Como ya se ha visto en las secciones anteriores, la señal que recibe el receptor es una superposición de muchas copias de la señal original que llegan en diferentes instantes debido a la existencia de muchos objetos como edificios, automóviles, colinas, entre otros, que reflejan, refractan, dispersan y difractan las ondas electromagnéticas. Es importante mencionar que el medio de transmisión no es físicamente dispersivo en el sentido de que ondas de diferentes frecuencias se transmiten prácticamente a las mismas velocidades, sin embargo, sí es un medio temporalmente dispersivo.

Si consideramos una señal $s(t)$ que viaja a través de un canal de propagación estático (el receptor, transmisor y cualquier objeto donde se pueda reflejar la señal no

están en movimiento) compuesto por dos trayectorias diferentes, la señal en el receptor está dada por [M&H, 2011]:

$$r(t) = h_1 * s(t - \tau_1) + h_2 * s(t - \tau_2) \quad (1.7)$$

Donde h_1 y h_2 son factores de atenuación complejos (tienen magnitud y fase), mientras que τ_1 y τ_2 son los tiempos que tardó la señal original $s(t)$ para llegar del transmisor al receptor.

El espectro de la señal recibida, evidentemente no puede ser simplemente $|S(f)|$. Como resultado de la existencia de los factores de atenuación, los diferentes tiempos de propagación de cada camino, así como la diferencia de fase implícita ($\varphi_1 - \varphi_2$), hacen que el espectro se vea modificado como se muestra en la ecuación 1.8 [M&H, 2011].

$$|R(f)| = |S(f)| * \sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2| * \cos(2\pi(\tau_1 - \tau_2)f - (\varphi_1 - \varphi_2))} \quad (1.8)$$

La ecuación 1.8 muestra cómo sería el módulo del espectro de la señal recibida para el caso ideal donde solo existieran 2 caminos por los que la señal original arriba al receptor. Como la función coseno que se encuentra dentro de la raíz cuadrada está en función de la frecuencia, el resultado será que el canal sea selectivo en frecuencia, es decir, algunas frecuencias se atenúan más que otras.

En la figura 2.9, la línea delgada muestra el espectro de la señal original antes de viajar por el medio de transmisión y, en cada inciso, se ilustra el espectro resultante de la señal en el receptor después de haber viajado por canales de propagación con características distintas [M&H, 2011]:

- a) Diferencia $|\tau_1 - \tau_2|$ pequeña y $|h_1| \gg |h_2|$
- b) Diferencia $|\tau_1 - \tau_2|$ grande y $|h_1| \gg |h_2|$
- c) Diferencia $|\tau_1 - \tau_2|$ pequeña y $|h_1| \approx |h_2|$
- d) Diferencia $|\tau_1 - \tau_2|$ grande y $|h_1| \approx |h_2|$

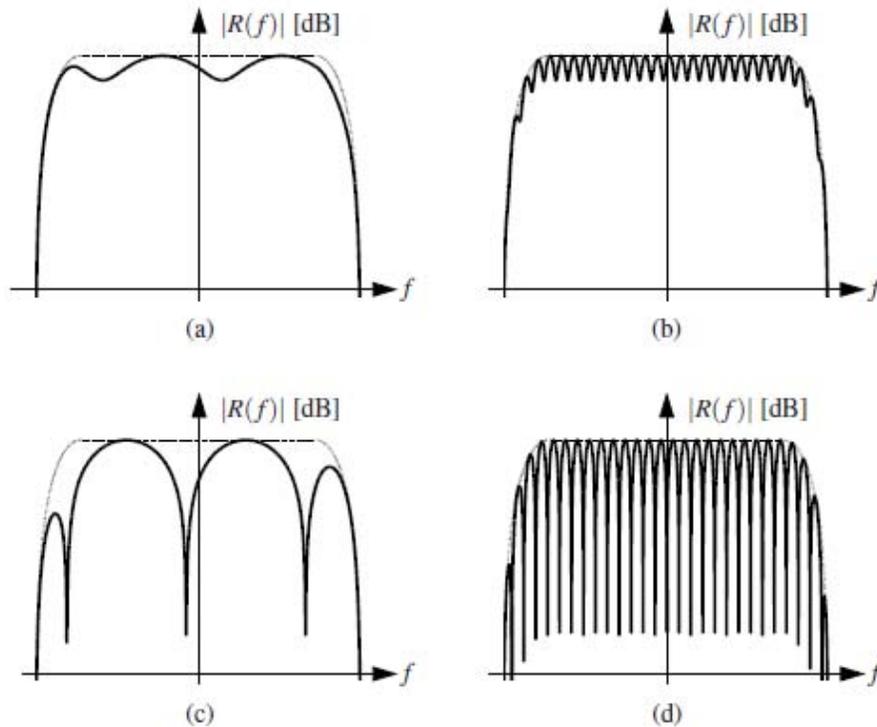


Figura 2.9 Ilustración de la selectividad en frecuencia en el espectro de la señal recibida [M&H, 2011].

La selectividad en frecuencia se hace más severa cuando la diferencia en los tiempos de propagación de cada camino es mayor y la atenuación que sufre la señal en cada camino es muy similar.

2.2.3.2 Dispersión en frecuencia

En la sección 2.2.2 se habló del efecto Doppler, revisamos que cuando existe movilidad en el sistema de comunicación aparecen desplazamientos en frecuencia. Si el móvil se aleja de un transmisor fijo, el receptor percibe una frecuencia menor a la que recibiría en una posición fija y si el móvil se va acercando al transmisor se percibirá una frecuencia mayor con respecto a la frecuencia percibida en una posición fija.

En un sistema de comunicación inalámbrico móvil, si se transmite una señal $s(t)$ con una transformada de Fourier $S(f)$, suponiendo que el receptor se aleja del

transmisor, la señal recibida $r(t)$, tendrá una transformada de Fourier expresada por la ecuación 1.9 [M&H, 2011].

$$R(f) = h * S(\alpha f) \quad (1.9)$$

Nuevamente el factor complejo h representa la atenuación de la señal y el factor α determina el desplazamiento en frecuencia debido al efecto Doppler, el cual estaría dado por la ecuación 1.10 [M&H, 2011].

$$\alpha = 1 - \frac{v * \cos(\theta)}{C_0} \quad (1.10)$$

Donde v es la magnitud de la velocidad a la que se mueve el receptor, θ es el ángulo que se forma entre la dirección de la velocidad del móvil y la dirección en la que arriba la señal al receptor y C_0 es la velocidad de la luz en el espacio libre.

Si calculamos la transformada de Fourier inversa de la ecuación 1.9, vamos a obtener la señal recibida en el dominio del tiempo $r(t)$.

$$r(t) = \frac{h}{\alpha} * s\left(\frac{t}{\alpha}\right) \quad (1.11)$$

En entornos reales, los desplazamientos en frecuencia cambian dinámicamente, por lo que la señal que recibe el receptor experimenta diversos cambios de amplitud y frecuencia.

Las ecuaciones 1.9, 1.10 y 1.11 se utilizan para caracterizar las consecuencias del efecto Doppler en una señal senoidal, es decir, de una sola componente espectral. Como en la práctica las señales transmitidas tienen un determinado ancho de banda, las señales se componen por un gran número de componentes senoidales de acuerdo a la teoría de Fourier, cada una con una frecuencia y amplitud específica. Por esta razón, cada componente espectral con una longitud de onda λ puede sufrir un desplazamiento en frecuencia distinto debido al efecto Doppler. Las ecuaciones 1.9, 1.10 y 1.11 pueden utilizarse para analizar señales de banda ancha, pero hay que tener en cuenta que los resultados serán más exactos conforme el valor de la relación B/f_c (ancho de banda / frecuencia de la portadora) disminuye [M&H, 2011]. A continuación, se enlistan las

ecuaciones generales que se utilizan para caracterizar el desplazamiento Doppler para señales de banda ancha.

$$R(f) = h * S(f - v) \quad (1.12)$$

$$r(t) = h * s(t) e^{j2\pi vt} \quad (1.13)$$

$$v = \frac{v * \cos(\theta)}{C_0} * f_c \quad (1.14)$$

En estas ecuaciones, v representa el desplazamiento en frecuencia debido al efecto Doppler, el cual es proporcional a la velocidad v y a la frecuencia de la portadora f_c .

Al combinar el multitrayecto con los desplazamientos en frecuencia, cada eco es afectado por un desplazamiento en frecuencia diferente. Por lo que el receptor recibe una señal esparcida en el dominio de la frecuencia y el tiempo.

Supongamos que tenemos dos caminos por donde se propaga una señal, el tiempo de propagación es el mismo para ambos caminos, pero las señales sufren una atenuación h_1 y h_2 , así como dos desplazamientos en frecuencia distintos v_1 y v_2 [M&H, 2011]. El espectro de la señal recibida puede ser expresado como:

$$R(f) = h_1 S(f - v_1) + h_2 S(f - v_2) \quad (1.15)$$

Al obtener la transformada inversa de Fourier, el módulo de la señal en el dominio del tiempo estaría dado por [M&H, 2011]:

$$|r(t)| = |s(t - \tau_0)| \sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2| \cos(2\pi(v_1 - v_2)(t - \tau_0) + (\varphi_1 - \varphi_2))} \quad (1.16)$$

La ecuación 1.16 muestra que el efecto Doppler provoca que la señal sufra modificaciones en su amplitud que van variando en función del tiempo t . Esta es la razón por la que los canales de propagación que involucran movilidad y, por tanto, desplazamientos en frecuencia debido al efecto Doppler, se conocen como selectivos en el tiempo.

Los fenómenos de dispersión temporal y dispersión en frecuencia, tradicionalmente se han visto como un grave problema para la implementación de

sistemas inalámbricos. Sin embargo, hoy en día, los sistemas de antenas MIMO (Multiple Input Multiple Output) se benefician de este fenómeno e incluso, entre mayor sea la falta de correlación entre los distintos caminos por los que se propagan las señales, siendo mayor la dispersión temporal y en frecuencia, el desempeño del sistema es mejor. Algunos de los sistemas que hoy en día ya utilizan con éxito los sistemas MIMO son aquellos basados en el estándar 802.11n de la IEEE y la tecnología de telefonía móvil LTE del 3GPP [GEßNER, 2013].

2.2.3.3 Respuesta impulsional del canal de propagación

En las secciones anteriores, se dedujo que los canales de propagación son sistemas lineales, los cuales tienen una señal de entrada y una señal de salida, por lo cual, una manera común de representar el comportamiento de un canal de propagación para algún servicio de comunicación es a través de su respuesta al impulso.

En la figura 2.10 se ilustra un escenario bastante común, varias señales están arribando por distintos caminos a un receptor, la respuesta impulsional del canal ilustrado se expresa en la ecuación 1.17 [S&P, 2014].

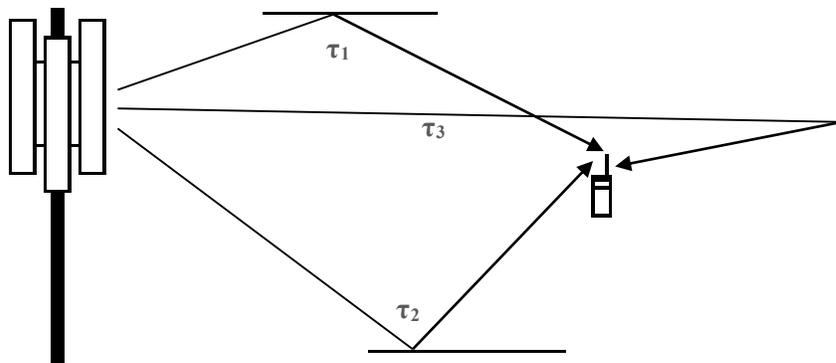


Figura 2.10 Reflexiones arribando a un receptor móvil.

$$h(\tau) = \beta_1 * \delta(\tau - \tau_1) + \beta_2 * \delta(\tau - \tau_2) + \beta_3 * \delta(\tau - \tau_3) \quad (1.17)$$

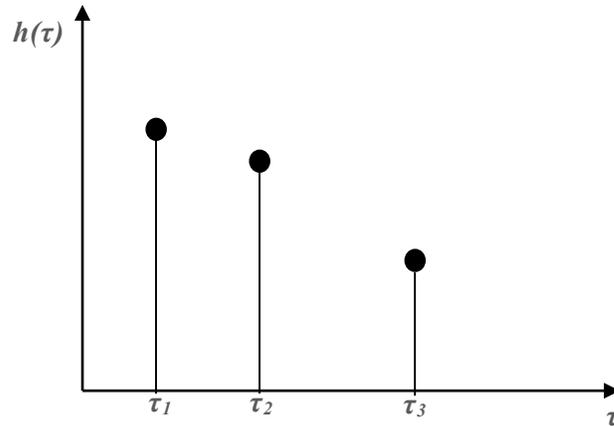


Figura 2.11 Respuesta impulsional del canal para un escenario de tres trayectorias.

Los tiempos de retardo están dados por $\tau_{1...3}$ mientras que los elementos $\beta_{1...3}$ son factores complejos de atenuación, es decir, toman en cuenta el cambio de amplitud y fase de la señal original al pasar por el i -ésimo camino de propagación.

Sin embargo, de acuerdo a las conclusiones a las que se llegaron en las secciones anteriores, sabemos que el canal de propagación puede ser variante en el tiempo. Por lo que, de forma general, un canal de propagación puede caracterizarse a través de una respuesta impulsional con dependencia temporal como se presenta en la ecuación 1.18, en la cual, n representa el número de señales que arriban al receptor [S&P, 2014].

$$h(\tau, t) = \sum_{k=1}^n \beta_k(t) * \delta(\tau - \tau_k(t)) \quad (1.18)$$

Existen dos tipos de ecos, los lejanos y los cercanos. Los ecos lejanos se producen por el rebote de la señal en objetos como edificios o colinas, mientras que los ecos cercanos se producen por los múltiples rebotes de la señal en los obstáculos que se encuentran en la periferia del receptor, como automóviles, paredes, muebles etc. Cada eco lejano, cuando se encuentra muy cerca del receptor se subdivide en ecos cercanos. Todos los ecos cercanos arriban al receptor con tiempos de retardo muy similares al del eco lejano que los produjo, por lo que podemos agrupar todos los ecos cercanos y solo tomar en cuenta los ecos lejanos. Sin embargo, como cada eco cercano puede sufrir cambios de amplitud, cambios de fase y diferentes desplazamientos Doppler, sí afectan

en el comportamiento global del eco que se toma en cuenta en la respuesta impulsional del canal y estas fluctuaciones, a menudo son variantes en el tiempo. Las variaciones de cada eco con tiempo de retardo τ_k pueden ser modeladas estadísticamente con una distribución Rice o Rayleigh, dependiendo de si llega por una trayectoria de línea de vista directa con el transmisor o no.

En la figura 2.12 los rayos $\tau_{i,j}$ representan a los ecos cercanos, mientras que los rayos τ_i representan a los ecos lejanos. En la figura 2.13 se muestra un acercamiento a uno de los ecos que sí se está tomando en cuenta en la respuesta impulsional del canal, pero que a su vez está compuesto por varios ecos cercanos.

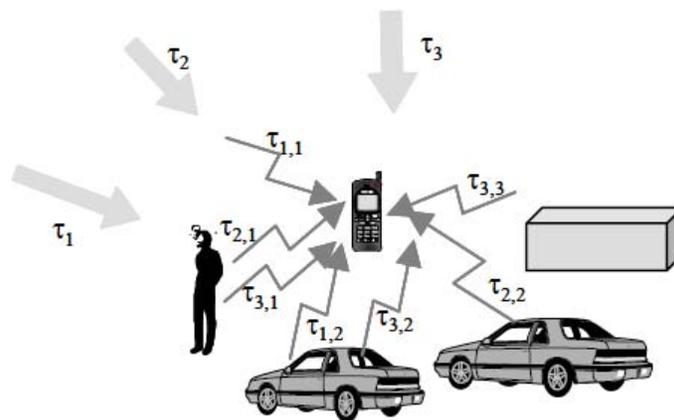


Figura 2.12 Representación de ecos lejanos y cercanos [S&P, 2014].

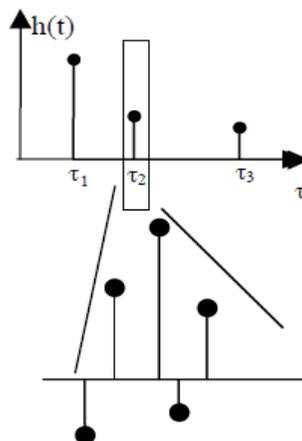


Figura 2.13 Acercamiento a un eco de la respuesta impulsional del canal [S&P, 2014].

La figura 2.14 muestra un ejemplo de cómo es la variación temporal de la respuesta impulsional del canal en recepción móvil.

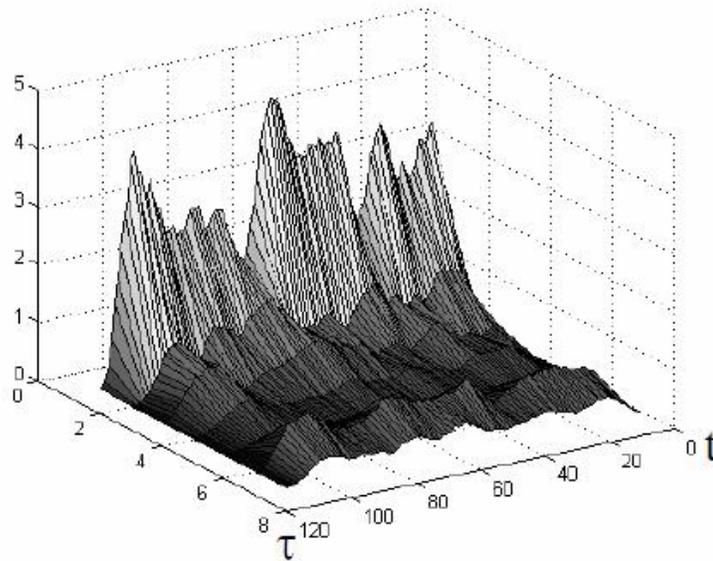


Figura 2.14 Evolución de la respuesta impulsional del canal en el tiempo [S&V&A,2003].

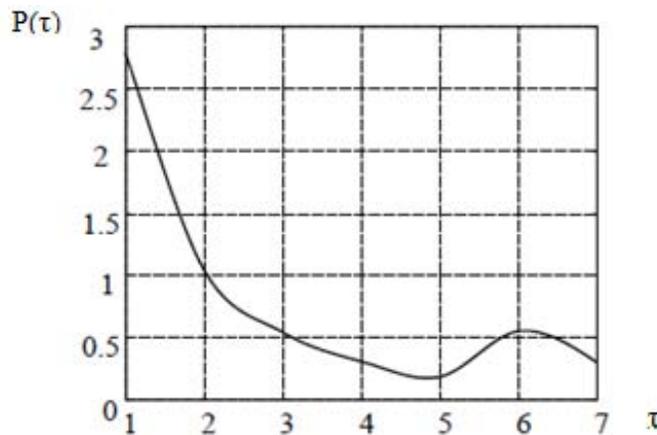


Figura 2.15 Power Delay Profile. [S&V&A, 2003]

Como la respuesta impulsional del canal es variante con el tiempo, se utiliza el promedio de las respuestas impulsionales obtenidas para una posición y se obtiene una respuesta impulsional promedio denominada *Power Delay Profile* o Perfil de Potencia al Retardo. Por ejemplo, para la figura 2.14 el *Power Delay Profile* se muestra en la figura

2.15. La definición del Perfil de Potencia al retardo se expresa en la ecuación 1.19 [S&V&A, 2003].

$$P(\tau) = E_t\{|h(\tau, t)|^2\} \quad (1.19)$$

Otra manera de representar la respuesta impulsional del canal es usando el *modelo de taps*, el cual se obtiene a partir del Perfil de Potencia al Retardo y consiste en representar cada señal que arriba al receptor como un impulso caracterizado por un retardo y una atenuación; el retardo puede estar en función de la primera señal que arriba al receptor o al momento en el cual llegó la señal más potente, mientras que la atenuación suele ser relativa a la potencia de la señal más potente. Esta manera de representar a un canal de propagación es la más utilizada, puesto que los simuladores de fading se basan en este modelo para representar las condiciones de propagación de un determinado canal.

El fenómeno de multitrayecto existe prácticamente en cualquier sistema de radiocomunicación terrestre y el buen desempeño de estos sistemas, depende de la capacidad de los receptores y de la ayuda que brinden los sistemas de transmisión para lograr vencer las dificultades inherentes a las transmisiones usando el espectro radioeléctrico.

La información que se presentó en este capítulo, tiene como objetivo proveer los fundamentos teóricos para entender el comportamiento variante de los canales de propagación y permitirá comprender por qué las redes SFN representan un reto tecnológico para los receptores.

3 LAS REDES MFN Y SFN

Cualquier radiodifusor interesado en que su señal sea vista por la mayor cantidad de personas posibles, busca colocar sus sitios de transmisión en los lugares más adecuados para alcanzar a cubrir las localidades que se encuentran dentro de sus áreas de servicio. Sin embargo, existen lugares con orografías muy complicadas o áreas muy extensas, que provocan la aparición de zonas de sombra.

Para solucionar este problema, durante la operación de los sistemas de radiodifusión análogos, los operadores solicitaban canales de transmisión en frecuencias distintas a las que inicialmente tenían asignadas, colocaban transmisores de menor potencia (transmisores complementarios) con antenas cuyo patrón de radiación cubriera las zonas de sombra y de esta manera se solucionaba el problema. La gente que estaba dentro de las zonas de sombra simplemente sintonizaba el contenido del radiodifusor en un canal distinto al que la mayoría de la gente lo hacía y todo funcionaba sin mayor contratiempo. Cada transmisor complementario funcionaba en una frecuencia distinta y no había ninguna interferencia.

El detalle con la solución que se utilizaba con el uso de los sistemas análogos, es que, en aras de cubrir su zona de servicio con una señal de calidad, un radiodifusor podía tener varios canales asignados para dar servicio solo a una población, ya sea rural o urbana, lo cual hacía poco eficiente la repartición del espectro radioeléctrico.

Con la introducción de los sistemas de radiodifusión digital, se abrió la posibilidad de utilizar una nueva manera de enfrentar el problema de las zonas de sombra utilizando varios transmisores complementarios, pero todos funcionando en un solo canal de radiofrecuencia, lo que representa una ventaja muy importante cuando hablamos de uso eficiente del espectro radioeléctrico.

En las redes MFN (*Multiple Frequency Network*) cada transmisor perteneciente a la red usa una frecuencia diferente y puede transmitir el mismo programa de televisión u otro distinto. Es posible reutilizar canales en la misma frecuencia siempre y cuando la distancia entre los sitios transmisores sea considerable para evitar interferencias

perjudiciales. Por otro lado, en una red SFN (*Single Frequency Network*) todos los transmisores deben transmitir la misma programación en la misma frecuencia.

Características de las redes MFN

- Las redes MFN no necesitan sincronizar cada uno de sus nodos de transmisión. Este hecho reduce la complejidad del despliegue de la red de forma importante.
- Este tipo de redes permiten la transmisión de contenidos distintos en cada nodo, pudiendo dividir regionalmente los contenidos.
- Dependiendo del nivel de protección que requiera la red, las distancias a las cuales se permite el reuso de frecuencias son mayores o menores. Esta situación va en contra de la explotación adecuada del espectro radioeléctrico, porque un mismo operador necesita la concesión de varios de los canales asignados para la radiodifusión de señales de televisión terrestre para cubrir las áreas de servicio que tiene autorizadas.

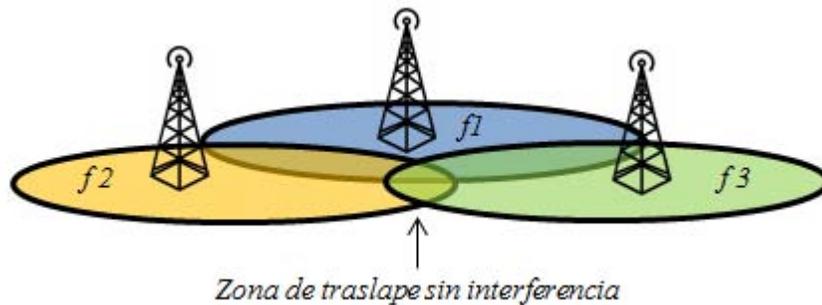


Figura 3.1 Operación de una red MFN. Cada transmisor cercano ocupa un canal distinto.

Características de las redes SFN

- La principal ventaja de este tipo de redes es la eficiencia espectral. El hecho de que se puedan cubrir extensas zonas geográficas utilizando solo un canal de radiofrecuencia permite el uso eficiente del espectro radioeléctrico.

- Como los transmisores funcionan de manera aditiva, es posible obtener potencias de recepción mayores a las obtenidas con un solo transmisor de alta potencia usando varios transmisores de menor potencia.
- Un receptor que se encuentra dentro de la zona de cobertura de una red SFN, ve las señales que provienen de los diferentes transmisores como ecos de la señal que arriba a él con mayor fuerza. La amplitud, diferencia de fase y dispersión en el tiempo de estos ecos son las variables que determinan una buena o mala recepción. Por lo que, para asegurar un funcionamiento adecuado, además de un cuidadoso diseño de la red (distancia entre los transmisores e instantes de transmisión de cada uno de ellos), es necesario usar técnicas de modulación que faciliten el manejo de estos ecos en el receptor, aunado al uso de tecnologías avanzadas para la estimación de canal en los receptores.

Los instantes en que se transmiten los símbolos en cada uno de los transmisores de una red SFN, así como la casi exacta sincronización en frecuencia, son factores muy importantes ya que una pequeña desviación en la frecuencia de la portadora de alguno de los transmisores participantes y/o la transmisión de un símbolo en un momento inadecuado, pueden provocar que el desempeño de la red se vea seriamente afectado. Existen diversas maneras de sincronizar el instante de transmisión y la frecuencia de los osciladores locales de los transmisores, sin embargo, actualmente la más utilizada es una señal de 1 pulso por segundo proveniente de los satélites del sistema americano GPS [FISHER, 2009].

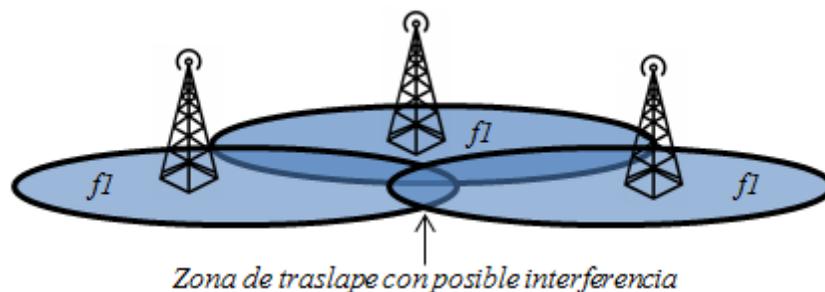


Figura 3.2 Operación de una red SFN. Todos los transmisores transmiten en el canal $f1$.

La distancia entre cada transmisor es una variable muy importante, la cual, está asociada con el tiempo de propagación de la señal entre el sitio de transmisión y la zona de cobertura. En estándares de TDT como DVB-T o ISDB-T, el empleo de técnicas de modulación y multiplexaje como COFDM (Code Orthogonal Frequency Division Multiplex), consideran un tiempo de guarda entre un símbolo y otro, por lo que el retardo más grande posible dentro de la zona de cobertura de la red SFN no debe rebasar el tiempo de guarda del sistema para evitar la interferencia intersimbólica. En estándares como ATSC donde no hay tiempo de guarda entre los símbolos, los receptores son los que determinan qué dispersión en tiempo y qué tan potentes deben ser los ecos para que el demodulador del receptor tenga la capacidad de corregir los efectos del canal de propagación y demodular la señal de forma satisfactoria.

Hoy en día, el contenido de audio y video codificado que se desea transmitir a través de los sistemas de TDT se distribuye a todos los sitios de transmisión que forman parte de la red a través de enlaces satelitales, enlaces de microonda o redes de datos (generalmente construidas con fibra óptica). Cada ruta desde los estudios de televisión hasta los sitios de transmisión es diferente y, por tanto, el tiempo que tarda en llegar la información varía de un lugar a otro. Como es importante tener control absoluto sobre el instante de transmisión en cada sitio, es necesario introducirle al flujo de transporte una señal que le permite al transmisor deducir el tiempo que tardó la información en llegar a él, así como el retardo máximo que hay en la red de distribución. Esta información se transmite en paquetes conocidos como MIPs (Megafame Initializing Packets) aproximadamente cada medio segundo [FISHER, 2009]. Esta información es recibida en cada transmisor por un módulo conocido como adaptador SFN, el cual almacena los paquetes de carga útil que van arribando al transmisor y los manda al modulador en el momento exacto para lograr el comportamiento adecuado de la red SFN. Con la información de los MIPs, todos los transmisores pueden transmitir el mismo símbolo al mismo tiempo, sin embargo, cuando es necesario tener retardos adicionales para optimizar la red, éstos pueden hacerse de forma manual en cada transmisor, hasta que el canal de propagación tenga la respuesta al impulso deseada en la zona de

cobertura de la red. La figura 3.3 resume el procedimiento de distribución de señales en una red SFN.

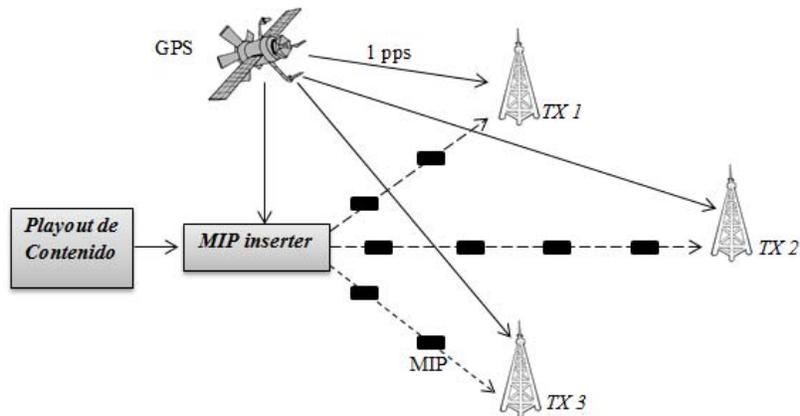


Figura 3.3 Esquema general de la distribución de la señal a transmitir en una red SFN.

Si alguno de los transmisores de la red SFN pierde la sincronía con la señal de reloj del GPS o no está recibiendo los MIPs, la mejor opción es que salga del aire, porque ya no contribuye al funcionamiento de la red y solo producirá interferencias negativas.

4 MODELOS DE CANAL DEFINIDOS PARA TDT

Actualmente, existen varios estándares para la radiodifusión terrestre de señales digitales de televisión, tales como ATSC, DVB-T, DVB-T2, ISDB-T o DTMB, así como algunas variantes de estos mismos estándares para la transmisión de señales de televisión que permiten la recepción en movimiento como ATSC M/H o DVB-H. Todos los estándares antes mencionados fueron desarrollados con el fin de brindarle a la población señales de audio y video de alta calidad y aprovechar las nuevas tecnologías para hacer más eficiente el uso del ancho de banda. Además de la posibilidad de montar redes SFN, la televisión digital nos da la oportunidad de transmitirle a la población varios programas usando el mismo ancho de banda que la televisión analógica utilizaba para transmitir solo un programa. Sin lugar a dudas, la televisión digital es un avance que impacta positivamente tanto en la cantidad de contenidos que puede recibir la sociedad como en la explotación del espectro radioeléctrico.

Desafortunadamente, no todo puede ser positivo. La implementación de redes de transmisión digital terrestre también representa un reto importante. Anteriormente, si nuestro televisor se encontraba en una zona donde la recepción de la señal no era del todo buena, nos conformábamos con ver en la pantalla algunos fantasmas en movimiento siguiendo el audio de los locutores. Si nosotros compramos una televisión con receptor digital, la conectamos a la misma antena que nuestra antigua televisión análoga y no le damos mejores condiciones de recepción, seguramente habrá una gran desilusión, puesto que en los sistemas de televisión digital, si se está por debajo del umbral de buena recepción, no aparecen fantasmas en la pantalla, simplemente ni se escucha ni se ve nada.

Cuando una televisión digital es capaz de demodular y decodificar el contenido del canal que está sintonizando de forma satisfactoria, es el resultado de un trabajo en equipo entre el sistema de transmisión y la tecnología de recepción. Es así que las organizaciones que diseñaron los estándares de televisión digital, publican las características con las que deben cumplir tanto los transmisores como los receptores para lograr que el sistema funcione adecuadamente.

No todos los estándares son iguales, aunque solo hay dos tecnologías de modulación en las cuales se basan. Por un lado, está la modulación 8VSB (base de ATSC) y, por el otro, está OFDM (base de DVB-T, ISDB-T y DTMB). Cada uno de estos estándares ha sido diseñado con el fin de satisfacer las necesidades de las regiones del mundo en las que surgieron. Por ejemplo, Europa occidental cuenta con ciudades en zonas muy montañosas, por lo que tenían que diseñar un sistema que permitiera la convivencia con patrones de ecos de señal bastante complejos. En una muy buena decisión, cuando diseñaban el estándar DVB-T, los diseñadores eligieron utilizar la modulación COFDM, que permitía introducir tiempos de guarda entre los símbolos, haciendo mucho más fácil el manejo de los ecos en el receptor. Tiempo más tarde DVB-T se convirtió en el estándar de televisión digital más utilizado en el mundo, por su robustez y gran capacidad de adaptación a las condiciones de propagación de los lugares en los que se implementa.

Por otro lado, en Estados Unidos, donde los asentamientos de población se encuentran generalmente en grandes planicies, los diseñadores tuvieron la oportunidad de crear un estándar menos robusto en comparación con los basados en OFDM pero que cumplía con los objetivos que en aquel momento se habían planteado. Así fue como nace ATSC con una modulación digital en 8 niveles de amplitud, toda la información sobre una sola portadora y con un filtrado vestigial de la banda lateral inferior, lo que se conoce como 8VSB.

Fue bastante tiempo el que tomó encontrar los parámetros óptimos para el funcionamiento de los estándares de televisión digital y se necesitaron muchas pruebas y experimentos para deducir cómo mejorar las tecnologías de transmisión. Después vino la etapa de definir las características mínimas con las que debían contar los receptores para que pudieran demodular y decodificar la señal. Para ello se requirió probar varias arquitecturas tecnológicas y nuevamente pruebas en entornos reales y simulados para calificar el desempeño de los receptores.

Adicionalmente, como los sistemas de radiodifusión digital dan la posibilidad de usar redes de transmisión SFN, también era y es necesario investigar el

comportamiento de los receptores ante los fenómenos de propagación que se dan en este tipo de redes de transmisión.

Es así que los fabricantes de receptores deben recurrir a simulaciones de entornos de propagación reales para asegurar que su producto va a poder trabajar correctamente, ya sea con redes de transmisión MFN o SFN en ambientes urbanos, urbanos montañosos, suburbanos, rurales, etc.

Diversos son los grupos de investigación que han trabajado en obtener las condiciones reales de los canales de propagación de una manera que sea posible reproducirlas en un ambiente controlado. La mejor manera de hacerlo es a través de los perfiles de retardo, basados en la respuesta impulsional del canal de propagación, ya que existen generadores de fading capaces de simular entornos con una señal principal y varios pre-ecos (ecos que arriban al receptor antes de la señal más potente) y post-ecos (ecos que arriban al receptor después de la señal más potente) según sea la situación que se quiere simular. Estos equipos, permiten configurar el tipo de distribución de probabilidad con la que varía la potencia de cada eco, es decir, Rice, Rayleigh, etc., así como definir si los ecos son estáticos o dinámicos, entendiendo como dinámicos aquellos que sufren un desplazamiento en frecuencia debido al efecto Doppler y que suelen usarse para la simulación de canales de propagación en recepción móvil.

Es importante hacer notar que no es posible definir perfiles de retardo que funcionen para representar los canales de propagación de cualquier ciudad o cualquier zona rural. Cada lugar presenta características específicas en cuanto a la dispersión temporal y en frecuencia de los ecos. Sin embargo, la idea es definir la mayor cantidad de canales de propagación posibles para representar los diversos entornos, como puede ser la propagación en una ciudad en terreno montañoso, una zona rural en una planicie, una ciudad con grandes edificios, etc.

En las siguientes secciones, se presentan diversos perfiles de retardo que se usan para simular los canales de propagación en las transmisiones de televisión digital terrestre. La mayoría de los perfiles presentados se han obtenido gracias a campañas

de pruebas de campo en redes de transmisión MFN y SFN. En cada caso, se presenta el contexto que nos indica para qué tipo de entorno podemos usar el perfil de retardo en cuestión y se da una explicación de cómo fueron obtenidos.

Obviamente no es lo mismo recibir una señal digital de manera estacionaria que en movimiento, por lo que los diferentes perfiles de retardo se clasifican de acuerdo al tipo de recepción que se quiere simular, ya que de esto dependerán muchos factores que afectan directamente en las condiciones de propagación. Las categorías más comunes son:

- Recepción fija: Recepción con antenas omnidireccionales o direccionales instaladas en una posición fija.
- Recepción portátil: Recepción en movimiento a bajas velocidades (3 km/h máximo) usando antenas de varilla o antenas de microtira como las usadas por los celulares.
- Recepción móvil: Recepción con antena de varilla o antenas de microtira en automóviles, autobuses o trenes en movimiento a una velocidad mayor a 3 km/h.

De igual manera, cada uno de los perfiles definidos contiene un número de señales que arriban al receptor (*taps*), su respectivo tiempo de retardo relativo a la primera señal recibida, la potencia de cada eco en decibeles respecto a la señal más fuerte y a veces la distribución de probabilidad que mejor modela la variación de la potencia de cada eco.

4.1 Proyecto AC318 Motivate (Mobile Television & Innovative Receivers)

El proyecto AC318 Motivate lanzado por la comisión europea del programa ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) tuvo como objetivo investigar los límites teóricos y prácticos del estándar DVB-T para recepción móvil tanto en redes de multifrecuencia (MFN) como en redes de isofrecuencia (SFN).

Fueron tres los perfiles utilizados en el laboratorio para el estudio del desempeño de diferentes tipos de receptores de DVB-T en recepción móvil, de los cuales los primeros dos fueron tomados de los resultados del proyecto COST 207, el cual inició en marzo de 1984 como parte del desarrollo de GSM-900 y su objetivo fue coordinar varios esfuerzos de diferentes centros de investigación europeos para generar una guía a seguir que le permitiera a los fabricantes de teléfonos que operarían con GSM, comprobar si sus equipos trabajarían o no correctamente al enfrentarse con los inconvenientes de la transmisión de señales digitales usando radio enlaces.

Las actividades de investigación del COST 207, se centraron en tres áreas: propagación, procesamiento de banda base y modulación. La investigación en el área de propagación, dio como resultado 14 perfiles de retardo que representaban los canales de propagación para señales de GSM, cuyo ancho de banda va de los 10 MHz a los 20 MHz en la banda de los 900 MHz. Los 14 perfiles se agruparon en cuatro clases que son [COST207, 1989]:

- Área Rural (RA): Cuenta con 2 perfiles definidos.
- Área Urbana Típica (TU): Cuenta con 4 perfiles definidos.
- Área Urbana Mala (BU): Cuenta con 4 perfiles definidos.
- Terreno Montañoso (HT): Cuenta con 4 perfiles definidos.

Los socios que participaban en el proyecto AC318 Motivate eligieron 2 de los 14 canales de propagación definidos en el COST 207 para llevar a cabo sus pruebas, el RA6 para áreas rurales no montañosas y el TU6 para áreas urbanas típicas no montañosas. Ambos canales de propagación sirven para simular los entornos de propagación dentro de una red de transmisión de múltiples frecuencias y recepción móvil. Durante las simulaciones, es recomendable definir a los ecos como dinámicos e ir incrementando las velocidades del móvil que transporta al receptor [MOTIVATE, 2000].

RA6

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)	Fading rápido	Desplazamiento Doppler (Hz)
1	0.0	0	Rice	Variable
2	0.1	-4	Rayleigh	Variable
3	0.2	-8	Rayleigh	Variable
4	0.3	-12	Rayleigh	Variable
5	0.4	-16	Rayleigh	Variable
6	0.5	-20	Rayleigh	Variable

Tabla 4.1 Canal de Propagación RA6 COST 207.

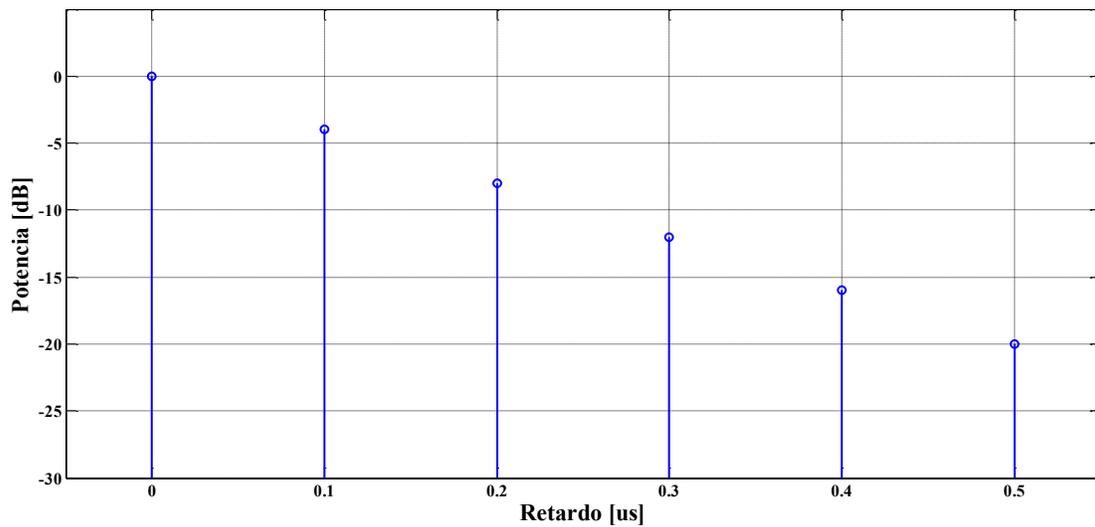


Figura 4.1 Canal de Propagación RA6 COST 207.

TU6

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)	Fading rápido	Desplazamiento Doppler (Hz)
1	0.0	-3	Rayleigh	Variable
2	0.2	0	Rayleigh	Variable
3	0.5	-2	Rayleigh	Variable
4	1.6	-6	Rayleigh	Variable
5	2.3	-8	Rayleigh	Variable
6	5.0	-10	Rayleigh	Variable

Tabla 4.2 Canal de propagación TU6 COST 207.

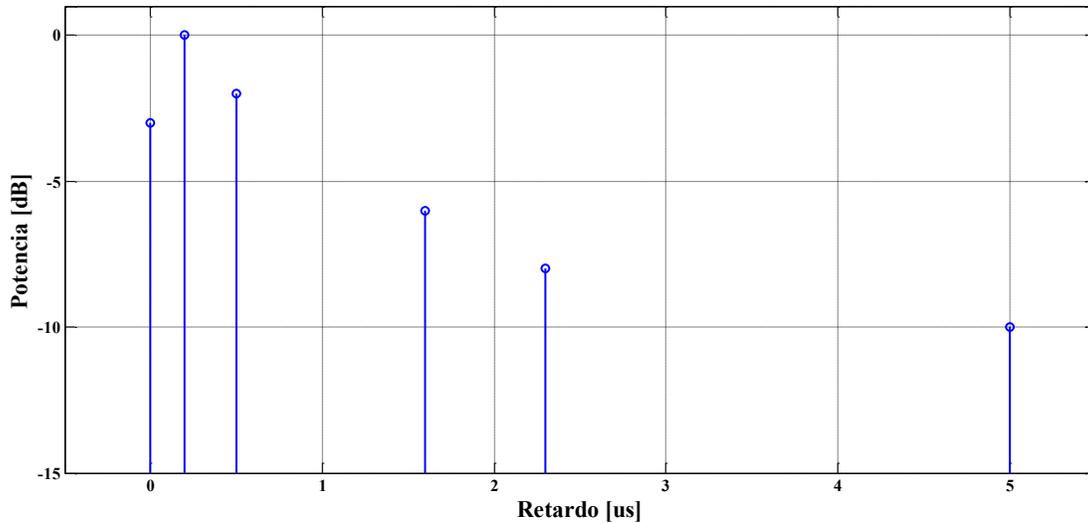


Figura 4.2 Canal de propagación TU6 COST 207.

El tercer perfil de retardo utilizado en el proyecto AC318 Motivate fue definido por los socios de este proyecto y tuvo como finalidad simular la recepción en una red SFN de dos transmisores con el receptor en movimiento. La definición de este perfil está en función del tiempo de guarda del sistema de transmisión DVB-T, ya que su finalidad fue probar el comportamiento del receptor ante posibles interferencias entre las distintas portadoras del espectro debidas al desplazamiento Doppler, así como la sensibilidad a sufrir interferencia intersimbólica por el arribo de ecos. El perfil consiste de solo 2 taps que tienen la misma potencia, separados en tiempo por la mitad del tiempo de guarda.

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)	Factor de desplazamiento en frecuencia	Desplazamiento Doppler (Hz)
1	0	0	-1	Variable
2	½ Tiempo de Guarda	0	1	Variable

Tabla 4.3 Canal de Propagación para una red SFN AC318 Motivate.

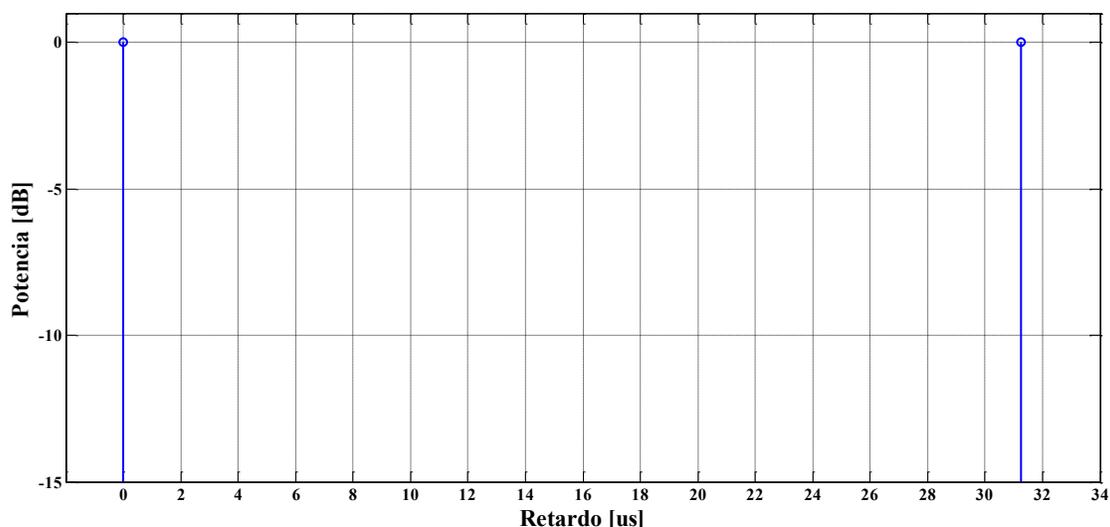


Figura 4.3 Canal de propagación para una red SFN AC318 Motivate.

Hay que tener presente que en el estándar DVB-T hay 2 modos de transmisión. Por un lado, el modo 2k en donde se transmiten 2048 portadoras con símbolos de 250 μ s de longitud. Por el otro lado, el modo 8k en el cual se envían 8192 portadoras, las cuales transportan símbolos de 1 ms de longitud. En ambos casos, el tiempo de guarda puede ser de 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32 del tamaño total del símbolo. La figura 4.3 muestra el perfil de retardo definido en la tabla 4.3 para una señal de modo 2k usando un tiempo de guarda de 1/4 del tamaño del símbolo (Tiempo de guarda = 62.5 μ s).

Este tipo de entornos, donde hay dos señales con la misma intensidad y con un tiempo de retardo que puede ser controlado por el simulador, son bastante buenos para evaluar el desempeño de los receptores. Como se revisó en el capítulo 2, un canal de propagación con multitrayecto causa más daño cuando produce ecos con potencias muy similares y muy dispersos en el tiempo.

El patrón de eco de la tabla 4.3, además de la dispersión temporal y la potencia de cada tap, también considera un factor de desplazamiento en frecuencia. Los simuladores de fading piden este factor y lo combinan con la velocidad con la que el usuario quiere simular la recepción para calcular el desplazamiento Doppler. El factor de desplazamiento en frecuencia puede estar en el rango de -1 a 1 y representa el

resultado de la función coseno en la ecuación 1.5 presentada en la sección 2.2.2 del capítulo 2.

4.2 Canales de Propagación Brasil A, B, C, D y E

En Brasil, el proceso para la selección del estándar que usarían para la transmisión de señales de televisión digital estuvo respaldado por una serie de pruebas del desempeño de los estándares diseñados hasta ese momento. En 1998, la Universidad Presbiteriana Mackenzie que es una de las universidades con más prestigio de Brasil, firmó un acuerdo con ABERT (Brazilian Association of Radio and Television Broadcasting) y con SET (Brazilian Television Engineering Society). El objetivo del acuerdo fue llevar a cabo las pruebas del desempeño de DVB-T y ATSC específicamente para el caso de Brasil tanto en campo como en entornos simulados. Estas pruebas se terminaron en el año 2000. Para ese entonces, como ISDB-T ya estaba en la última fase de su desarrollo, la Universidad Presbiteriana Mackenzie volvió a acordar con ABERT y SET repetir las pruebas, pero ahora con ISDB-T, las cuales se llevaron a cabo hasta el año 2004. En este caso, los receptores solo fueron probados en entornos simulados porque en 2004 no se pudo asignar un canal para la realización de las pruebas de campo con ISDB-T.

La valiosa información recopilada por estas tres instituciones le sirvió mucho a la Agencia Nacional de Telecomunicaciones de Brasil (ANATEL) para tomar la mejor decisión en cuanto qué sistema era el más adecuado para las condiciones de propagación que se presentaban en su país. El sistema que mostró el mejor desempeño, fue el estándar japonés ISDB-T, puesto que soportaba condiciones de multitrayecto bastante fuertes en las simulaciones, en comparación a las soportadas por receptores de DVB-T y ATSC. Finalmente, en 2005, Hélio Costa, en ese momento Ministro de Comunicaciones de Brasil, anunció que el estándar de televisión digital que adoptarían sería el ISDB-T.

En el documento en donde la Universidad Presbiteriana Mackenzie, ABERT y SET hacen la descripción general de las pruebas del laboratorio en las que se basaron para hacer la evaluación de los distintos estándares de televisión [ABERT/SET, 2000], en la

sección 3.3 se definen los 5 tipos de canales con multitrayecto que se simularon para la evaluación del comportamiento de los receptores digitales. A continuación, se presentan las características de dichos canales, los cuales fueron obtenidos con base a la experiencia obtenida durante las pruebas de campo:

Canal Tipo A

El canal tipo A simula las condiciones de recepción fija usando una antena externa en redes MFN que da servicio a una zona llana y con pocos obstáculos grandes en los alrededores, por lo que los ecos están bastante atenuados y los retardos entre éstos son pequeños.

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	0
2	0.15	-13.8
3	2.22	-16.2
4	3.05	-14.9
5	5.86	-13.6
6	5.93	-16.4

Tabla 4.4 Canal de Propagación Brasil A.

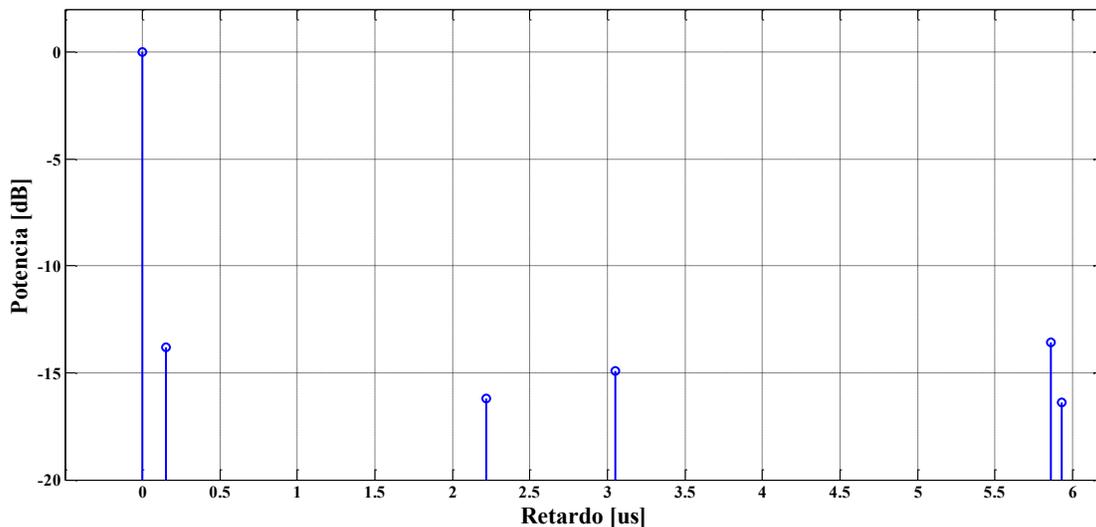


Figura 4.4 Canal de propagación Brasil A.

Al analizar la configuración de los ecos, se puede decir que las condiciones de recepción que simula este canal, deberían ser manejables por cualquier receptor comercial, puesto que es una situación muy común. A continuación, se muestra el espectro de una señal de ATSC después de haber viajado por el canal de propagación representado por el canal Brasil A.

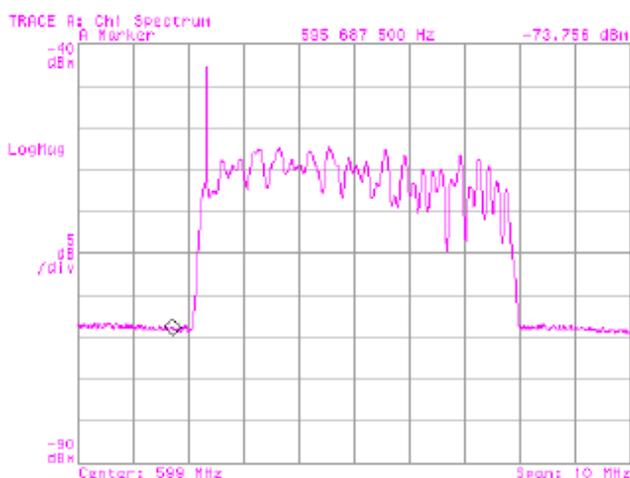


Figura 4.5 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo A [ABERT/SET, 2000].

Canal Tipo B

Este canal funciona para representar entornos de propagación con una antena receptora externa producidos por una red MFN que brinda servicio a una zona con obstáculos de mayor tamaño, como pueden ser edificios o montañas, ya que en este canal hay retardos grandes entre ecos y algunos no están muy atenuados, como el tercero y cuarto tap.

Número de Tap	Retardo (μ s)	Potencia (dB)
1	0.0	0
2	0.30	- 12.0
3	3.50	- 4.0
4	4.40	- 7.0
5	9.50	- 15.0
6	12.70	- 22.0

Tabla 4.5 Canal de Propagación Brasil B.

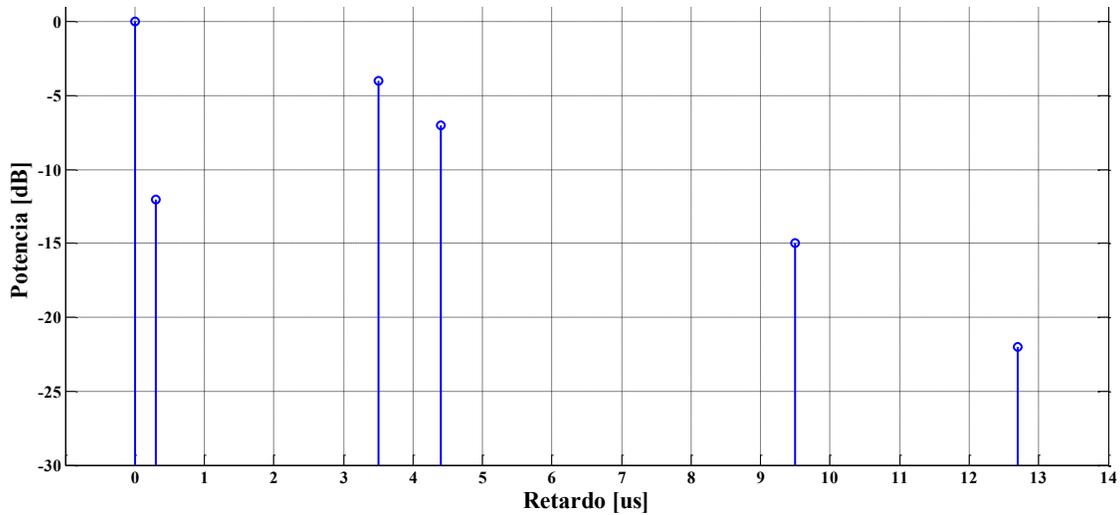


Figura 4.6 Canal de Propagación Brasil B.

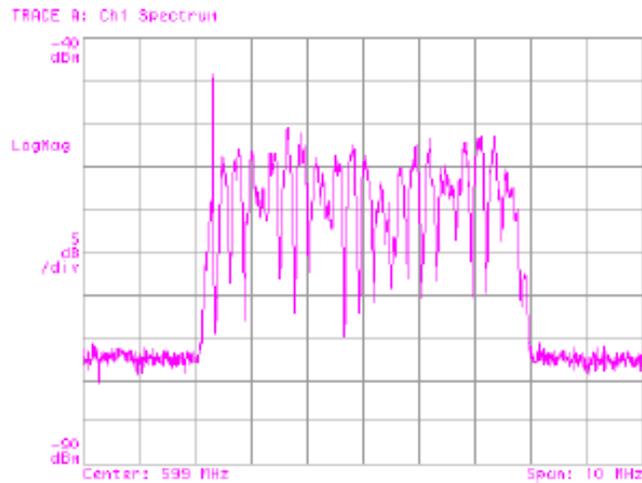


Figura 4.7 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo B [ABERT/SET, 2000].

En la figura 4.7 se puede notar que el espectro de la señal recibida después de viajar a través del canal de propagación Brasil B se ve mucho más afectado en comparación con el espectro de la figura 4.5, puesto que como se ha mencionado, las condiciones de recepción son peores cuando existen ecos con potencias comparables a la de la señal más potente y la dispersión temporal de los ecos es mayor.

Canal Tipo C

También es para recepción fija con antena externa y puede usarse para representar un caso bastante peculiar en el cual existen dos ecos con potencias muy similares. Este tipo de entornos de propagación pueden darse en redes MFN que brindan cobertura a zonas en las que existen obstáculos que casi no absorben la energía de las señales y las rebotan de manera casi íntegra, como montañas o edificios con un alto porcentaje de metal en sus estructuras. Este canal de propagación incluso puede utilizarse para simular el entorno de propagación dentro de una red SFN de dos transmisores en una zona montañosa o urbana densa.

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	- 2.8
2	0.089	0
3	0.419	- 3.8
4	1.506	- 0.1
5	2.322	- 2.5
6	2.799	- 1.3

Tabla 4.6 Canal de Propagación Brasil C

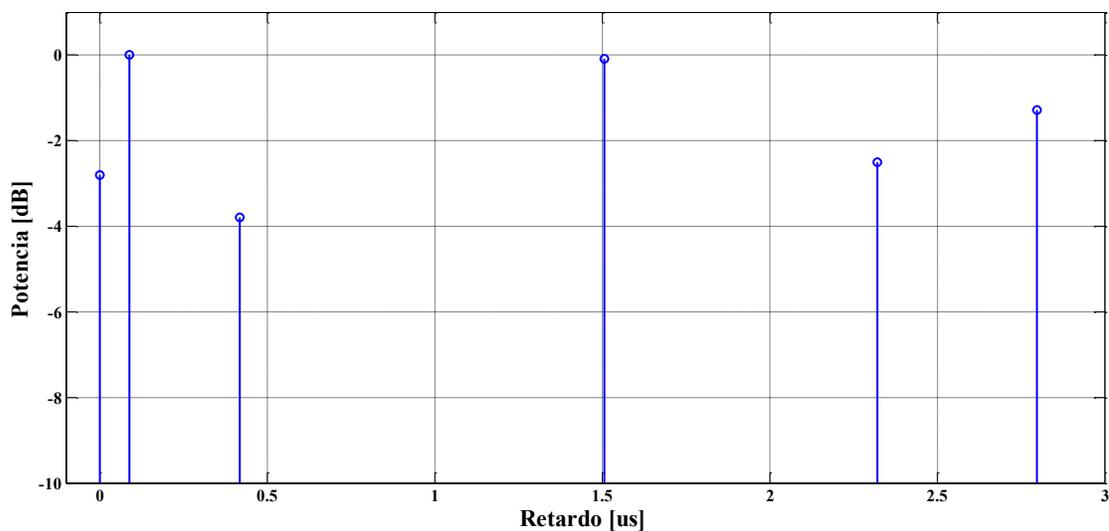


Figura 4.8 Canal de propagación Brasil C.

Canal Tipo D

Este canal representa las condiciones de recepción en interiores para una red MFN.

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.15	- 0.1
2	0.63	- 3.8
3	2.22	- 2.6
4	3.05	- 1.3
5	5.86	0
6	5.93	- 2.8

Tabla 4.7 Canal de Propagación Brasil D

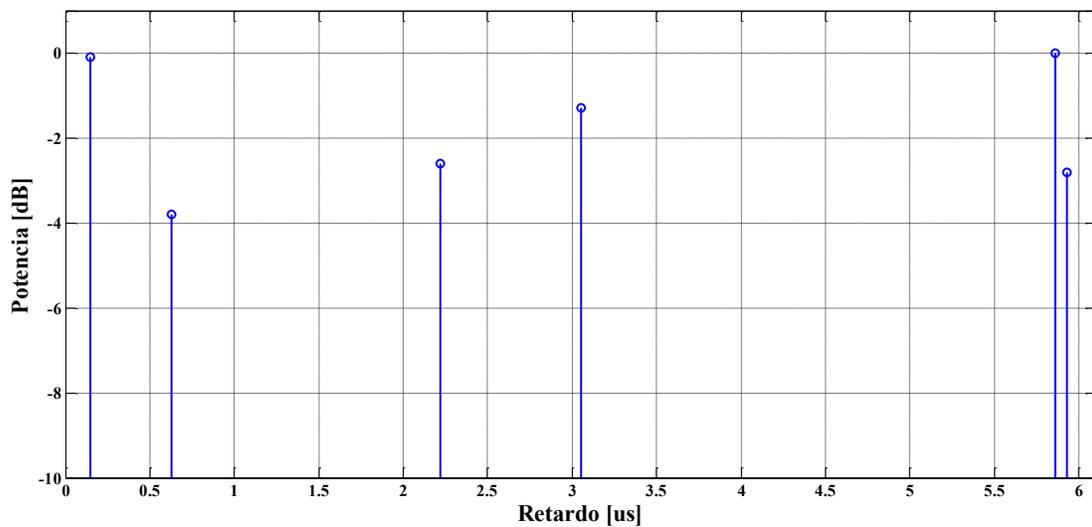


Figura 4.9 Canal de propagación Brasil D

En una recepción con una antena instalada en interiores, es común encontrar este tipo de situaciones, en las cuales las señales sufren varios rebotes antes de alcanzar la antena, por lo que puede haber señales que lleguen primero al receptor, pero más atenuadas que ecos posteriores. Todo depende de la posición de la antena receptora. Es una situación complicada porque los ecos son muy similares en potencia y aunque la

dispersión temporal no es tan grande, un entorno de recepción así, sí puede causar problemas en la demodulación de la señal digital.

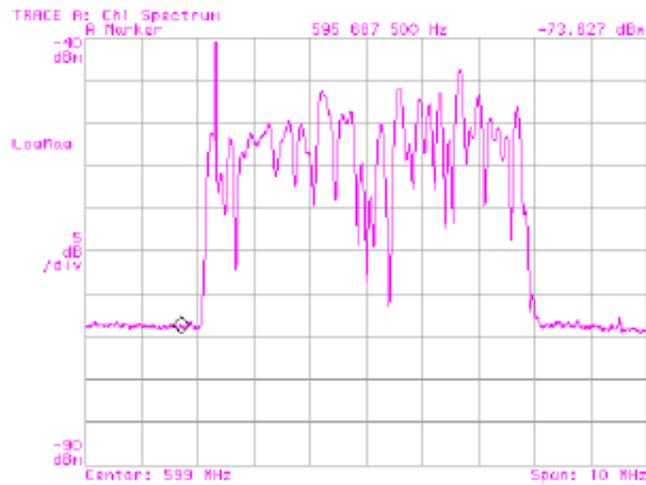


Figura 4.10 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo D [ABERT/SET, 2000].

Canal Tipo E

Este canal es importante porque simula condiciones de recepción en redes SFN. En este caso, el canal fue definido para simular una red SFN con tres transmisores. Al igual que el canal de propagación definido para redes SFN en el proyecto AC318 Motivate, la definición del canal de propagación Brasil E no está basada en mediciones reales, si no que la idea es someter al receptor a prueba a condiciones muy severas para calificar su desempeño.

En la realidad, una situación parecida a la representada por el canal de propagación Brasil E sí puede darse e incluso puede ser aún más complicada, ya que pueden existir un número mayor de ecos arribando al receptor a causa de los objetos que rodean al receptor.

Número de Tap	Retardo (μ s)	Potencia (dB)
1	0	0
2	1	0
3	2	0

Tabla 4.8 Canal de Propagación Brasil E

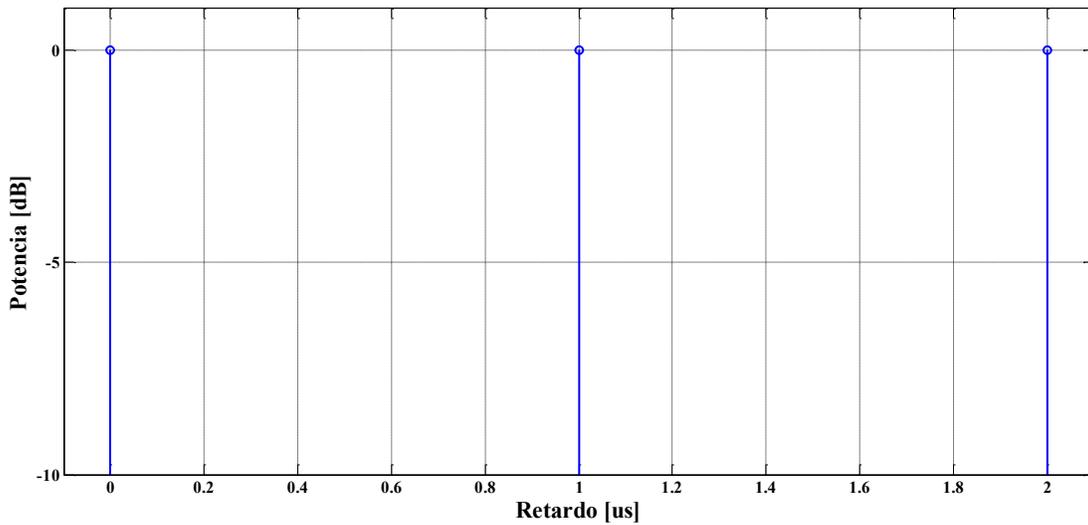


Figura 4.11 Canal de Propagación Brasil E.

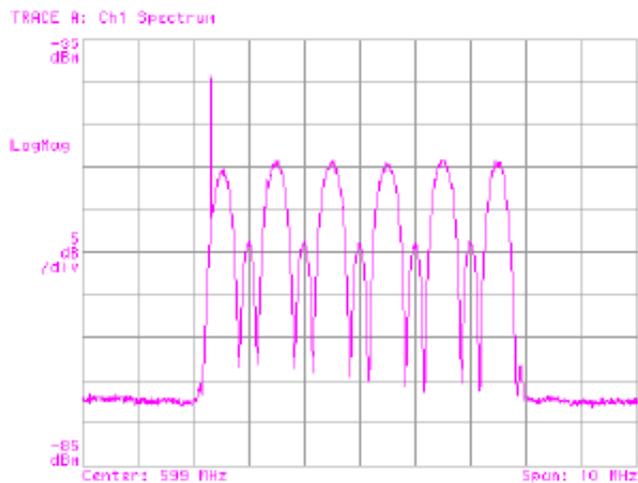


Figura 4.12 Espectro ATSC resultante con las condiciones simuladas en el canal tipo E [ABERT/SET, 2000].

De acuerdo a lo mostrado en la figura 4.12, es muy evidente que el canal tipo E es el más severo de los casos que nos permiten simular los canales definidos por los investigadores brasileños. Un espectro tan afectado verdaderamente desafía a cualquier receptor y dependerá mucho de la capacidad de su ecualizador para saber si la señal podrá ser demodulada o no.

En general, los canales de propagación definidos en el proyecto liderado por la Universidad Presbiteriana Mackenzie, ABERT y SET, tienen como objetivo la evaluación del desempeño de los receptores digitales al trabajar con señales con multitrayecto en recepción fija. Estos 5 canales ilustran casos típicos que podemos encontrar en la realidad con mucha probabilidad.

4.3 Canales de propagación para redes SFN en terreno montañoso

En esta sección, se realiza una interesante comparación entre los resultados de dos campañas de pruebas de campo llevadas a cabo por distintos grupos de investigación. Ambos proyectos definieron sus propios perfiles de retardos que caracterizaban de mejor manera las condiciones de propagación que observaron durante sus mediciones. Estos perfiles son valiosos dado que se obtuvieron a partir de mediciones reales de los entornos de propagación de redes SFN operando.

Lo que hace interesante la comparación de los resultados de ambas campañas, es que una de ellas se llevó a cabo en una zona urbana montañoso y la otra en una zona suburbana llana, lo cual, nos va a permitir observar de manera clara qué tanto afecta que instalemos una red SFN en una zona montañoso.

El primero de estos dos proyectos fue llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tsingua en China. La campaña de pruebas de campo se realizó en una provincia en China central conocida como Henan. Esta provincia está compuesta por ciudades de tamaño mediano, las cuales están conectadas por carreteras. El objetivo era construir una red SFN que cubriera toda la provincia de Henan usando el estándar de televisión digital DTMB, el cual, fue desarrollado también por la Universidad Tsingua. Los investigadores de esta universidad decidieron probar cómo era la recepción de la señal digital en la carretera entre las ciudades de Zhengzhou y Kaifeng.

Para realizar las pruebas, se utilizó el canal 28 definido en China (526 – 534 MHz) y tanto en la ciudad de Zhengzhou como en Kaifeng se instaló un transmisor digital con

moduladores del estándar DTMB. La separación entre ambas ciudades es de 59.5 km y la potencia de los transmisores fue pensada para que la zona de traslape quedara fuera de las ciudades. Sin embargo, a lo largo de la carretera existen pequeños asentamientos de población, por esta razón, las pruebas de campo se llevaron a cabo a lo largo de la carretera en varios puntos de medida para evaluar las condiciones a las que se tendrían que enfrentar los receptores digitales en esa zona [T&P&G&Y, 2006].

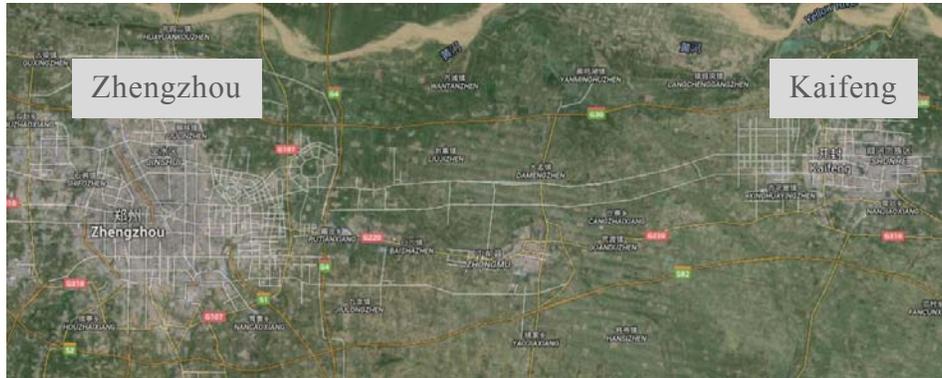


Figura 4.13 Mapa de las ciudades de Zhengzhou y Kaifeng, Henan, China.

Si hacemos un acercamiento a la figura 4.13, veremos que el terreno en esta zona central de China no está muy accidentado. La zona que rodea a la carretera donde fueron tomadas las mediciones, se caracteriza por la existencia de sembradíos y áreas suburbanas. El acercamiento a la figura 4.13, se muestre en la figura 4.14.

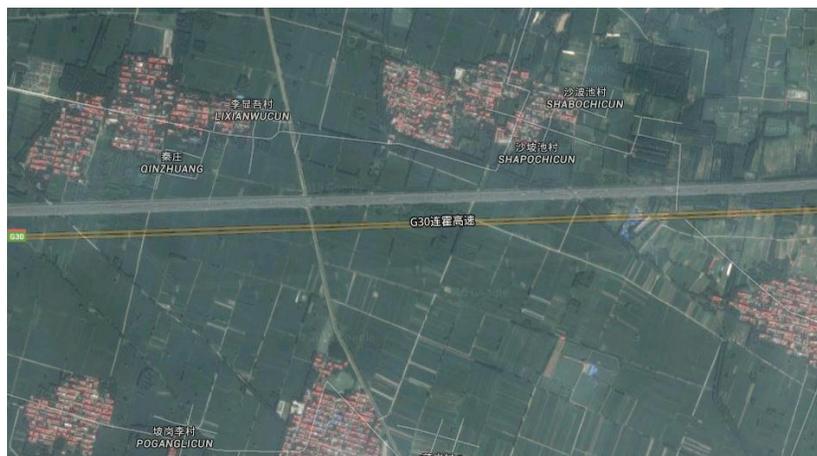


Figura 4.14 Acercamiento a la zona entre las ciudades de Zhengzhou y Kaifeng.

Los transmisores ocuparon como señal digital de entrada un flujo de bits pseudoaleatorio, la señal viajaba por el aire y los investigadores de la Universidad Tsingua usaban un sintonizador y un convertidor ADC para muestrear la señal de radiofrecuencia y guardarla en una PC para su posterior procesamiento. La secuencia pseudoaleatoria que era transmitida estaba sincronizada con una secuencia producida localmente en la posición del receptor, al correlacionar ambas secuencias, se obtenían los perfiles de retardo para cada punto de prueba.

Después de analizar las mediciones obtenidas, los investigadores de la Universidad Tsingua, comandados por Shingang Tang, Changyong Pan, Ke Gong y Zhixing Yang, definieron que para que un tap fuera tomado en cuenta, éste debía tener una amplitud relativa a la señal más potente mayor o igual a -20 dB. Fue así como ellos definieron un canal de propagación que representara la situación más compleja a la cual se tendrían que enfrentar los receptores en esa zona.

En este perfil de retardo, presentado en la tabla 4.9, son muy evidentes dos grupos de ecos, cada uno compuesto por tres taps. El primer grupo comprende los taps 1, 2 y 3, mientras que el segundo grupo se compone de los taps 4, 5 y 6. Si analizamos la dispersión temporal que hay dentro de cada grupo, veremos que es relativamente pequeña. Esto se da de esta manera por la casi nula existencia de obstáculos grandes como pueden ser edificios o montañas que suelen dispersar los ecos. Sin embargo, vemos que entre el primer tap del primer grupo y el primer tap del segundo grupo hay 19.23 μ s y la diferencia en potencia entre estos dos taps es de solo 1.6 dB, lo cual sí puede dificultar de una manera importante que el receptor pueda demodular y decodificar el video de forma correcta.

Número de Tap	Retardo (μ s)	Potencia (dB)
1	0	0
2	0.48	- 7.2
3	3.14	- 2.2
4	19.23	- 1.6
5	20.08	- 13.5
6	22.25	- 6.5

Tabla 4.9 Canal de propagación Zhengzhou-Kaifeng.

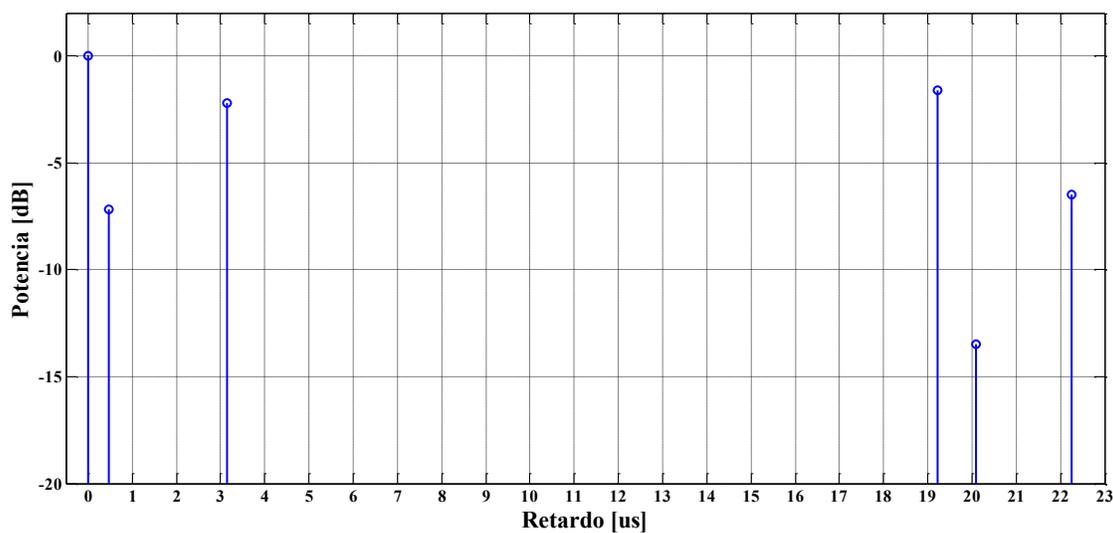


Figura 4.15 Canal de propagación Zhengzhou-Kaifeng.

Del otro lado del mundo, investigadores brasileños hicieron un ejercicio similar, solo que ellos llevaron a cabo las pruebas en la ciudad de Río de Janeiro, también usando dos transmisores sincronizados en una red SFN y en lugar de usar DTMB, ellos utilizaron ISDB-T.

Estas pruebas se realizaron en el año 2013 y estuvieron a cargo de Maurício V. Guerra del Centro Federal de Educación Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, así como de Carlos V. Rodríguez y Luiz de Silva Mello del Centro de Estudios para la Telecomunicación de la Universidad Católica de Río de Janeiro. Se definieron 31 puntos de prueba en la ciudad de Río de Janeiro y usaron una señal ISDB-T de prueba con un ancho de banda de 6 MHz en el canal 29 (560-566 MHz).

Para las mediciones de los perfiles de retardo usaron un analizador de redes marca ANRITSU modelo MS8901A, con la capacidad de medir el patrón de ecos del canal, este equipo se montó en una unidad móvil, la cual, transportaba una antena instalada en lo alto de un mástil a 13.4 metros del nivel del terreno.

Uno de los transmisores de la red SFN se colocó en Sumaré, que es una montaña desde donde se transmiten varios canales de televisión y estaciones de radio para la ciudad de Río de Janeiro y el otro se instaló en la región de Freguesía Jacarepaguá (Sitio

Pena). En la Figura 4.16 se ilustran los lugares donde se instalaron los transmisores de la red SFN, así como los 31 puntos de prueba, los cuales se encuentran en las principales avenidas y carreteras de Río de Janeiro [G&R&D, 2013].

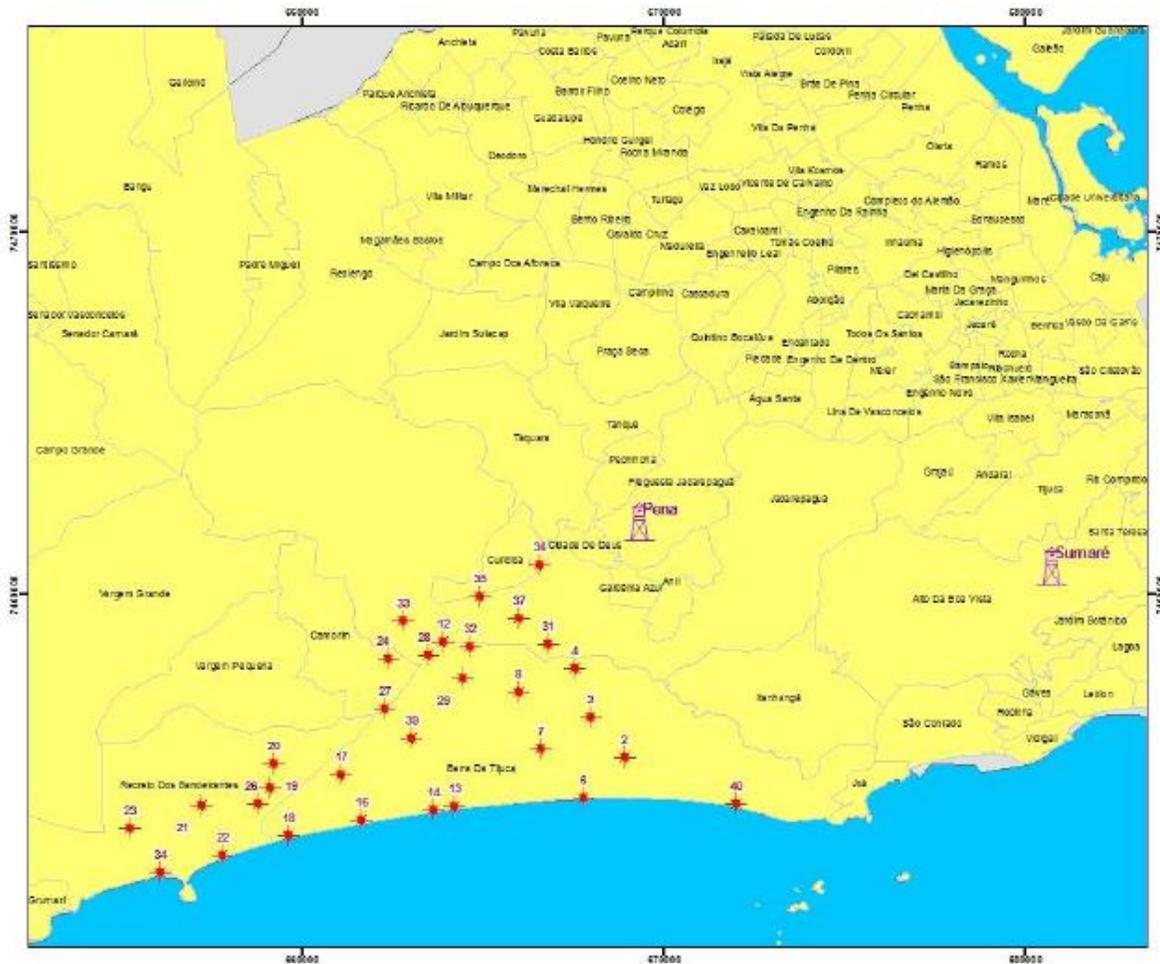


Figura 4.16 Sitios de transmisión de la red SFN y puntos de prueba de la campaña de medida realizada por los investigadores brasileños [G&R&D, 2013].

La zona urbana de Río de Janeiro está situada entre zonas montañosas que se elevan a varios metros sobre el nivel del mar. Normalmente esta situación complica las condiciones que deben enfrentar los receptores debido a la dispersión temporal de los ecos. Si además añadimos las complicaciones inherentes a las redes SFN, podemos predecir que la suma puede producir condiciones de propagación bastante complicadas para los receptores.

En la figura 4.17 se puede ver una imagen en donde se distinguen los lugares donde se instalaron los 2 transmisores de la red SFN, la orografía del lugar y los puntos en donde se hicieron las mediciones.

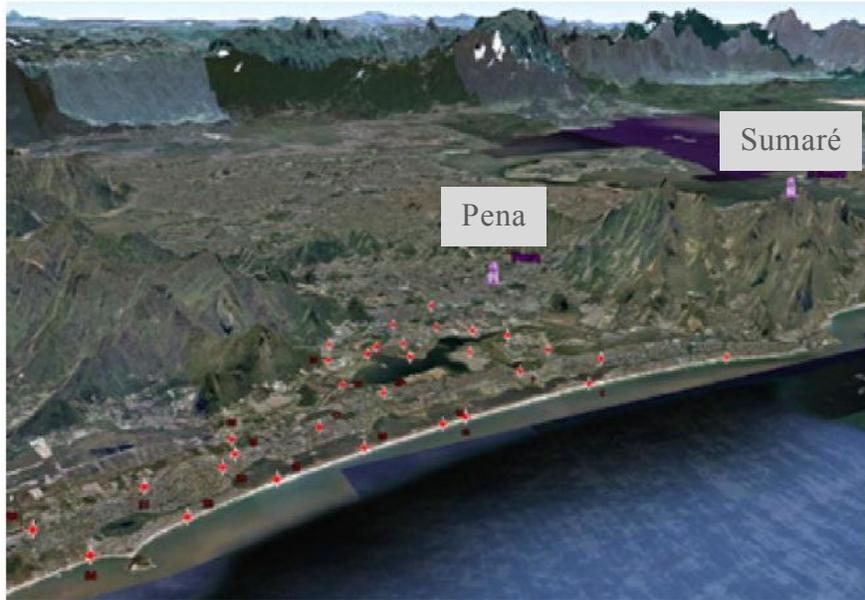


Figura 4.17 Orografía de la zona de cobertura de la red SFN en Río de Janeiro [G&R&D, 2013].

En la figura 4.18 se puede observar el sitio Sumaré. La fotografía nos ayuda a darnos una idea clara de lo accidentado que es el terreno en esta zona de la costa sur de Brasil.



Figura 4.18 Sitio Sumaré en Río de Janeiro, Brasil.

Con fines de ejemplificar cómo cambia un perfil de retardo de un lugar a otro dentro de la misma zona, en las figuras 4.19 y 4.20 se muestran los perfiles de retardo en el punto de prueba 6 y 16 respectivamente. Vale la pena resaltar que, aunque en ambos casos se distinguen dos grupos de ecos, los ecos de cada grupo están separados entre sí por retardos grandes. Este es el efecto que produce la orografía del lugar, a diferencia de lo que sucedió con el perfil definido por los investigadores chinos, donde el máximo retardo entre ecos del mismo grupo era de alrededor de $3\mu\text{s}$.

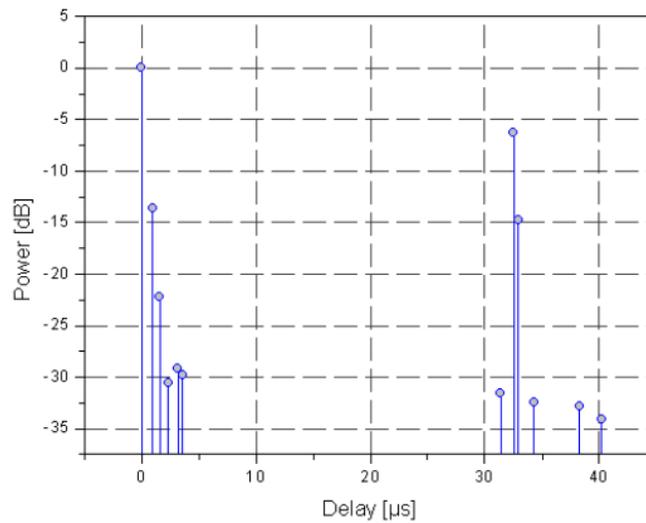


Figura 4.19 Perfil de retardo en el punto de prueba 6 en Río de Janeiro [G&R&D, 2013].

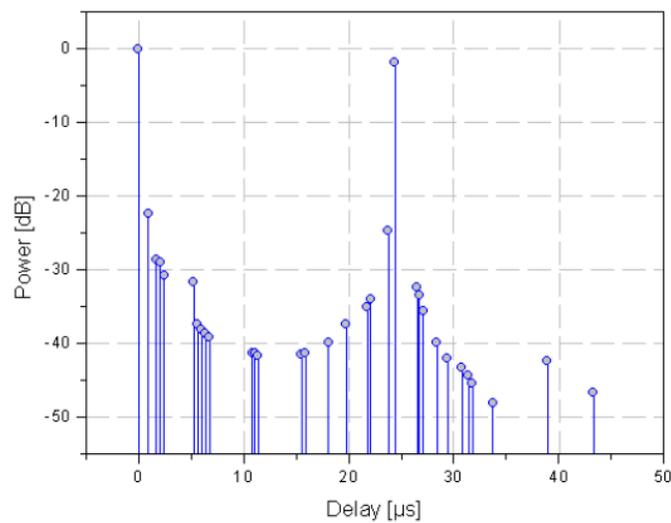


Figura 4.20 Perfil de retardo en el punto de prueba 16 en Río de Janeiro [G&R&D, 2013].

En Brasil se definieron 3 umbrales de potencia relativa a la señal más potente para decidir qué taps iban a ser tomados en cuenta para los perfiles de retardo, éstos fueron -10, -15 y -20 dB. Obviamente conforme el umbral es menor, aparecen más taps en los perfiles de retardo. A continuación, se presentan los perfiles de retardo que se definieron como resultado de la campaña de mediciones en Río de Janeiro:

Umbral en -10 dB		
Número de Tap	Retardo (μ s)	Potencia (dB)
1	0	0
2	19.8	- 4.5
3	20.0	- 5.5
4	20.4	- 9.8
5	24.4	- 6.9
6	32.5	- 6.3

Tabla 4.10 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -10 dB.

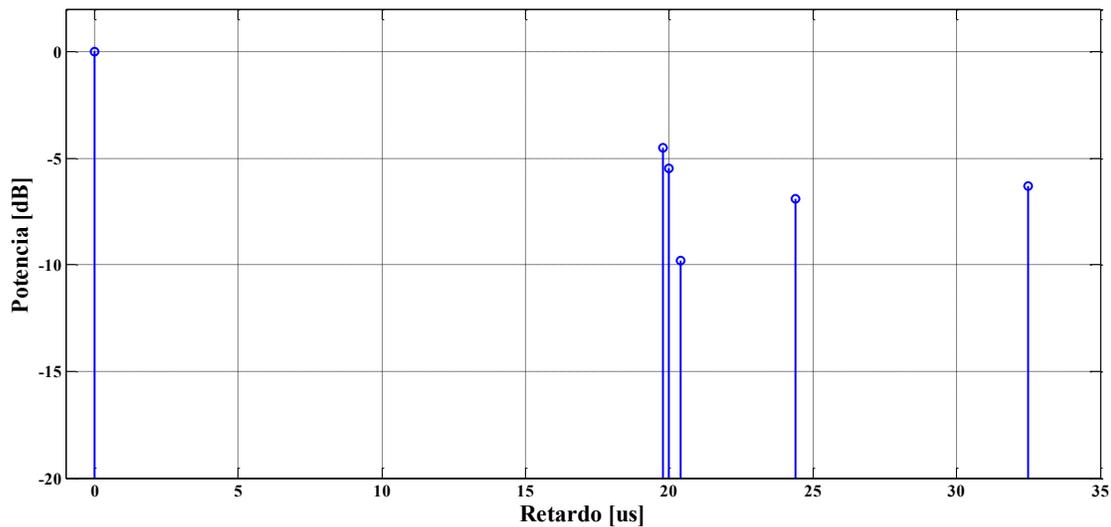


Figura 4.21 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -10 dB.

Umbral en -15 dB		
Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0	0
2	0.48	-13.7
3	0.60	-13.0
4	19.8	-4.5
5	20.0	-5.6
6	20.4	-9.8
7	22.4	-13.2
8	24.4	-6.9
9	32.5	-6.3
10	32.9	-14.7

Tabla 4.11 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -15 dB.

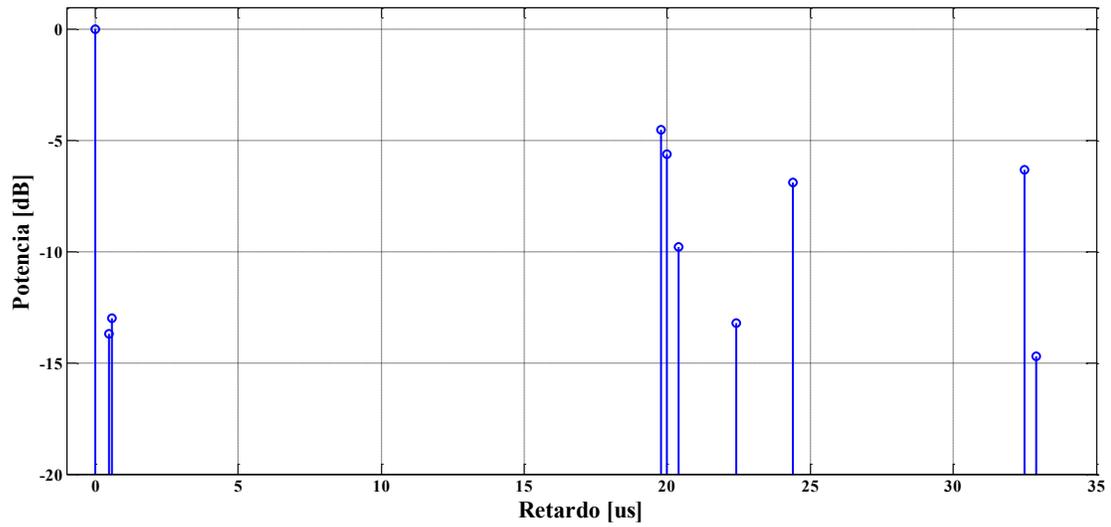


Figura 4.22 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -15 dB.

Umbral en -20 dB		
Número de Tap	Retardo (μ s)	Potencia (dB)
1	0	0
2	0.48	-13.7
3	0.60	-13.0
4	0.72	-16.3
5	0.96	-17.9
6	1.08	-19.1
7	1.68	-16.6
8	19.8	-4.5
9	20.0	-5.6
10	20.2	-15.3
11	20.4	-9.8
12	21.0	-19.2
13	22.4	-13.2
14	24.4	-6.9
15	27.5	-19.9
16	32.5	-6.3
17	32.9	-14.7
18	33.5	-17.2

Tabla 4.12 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -20 dB.

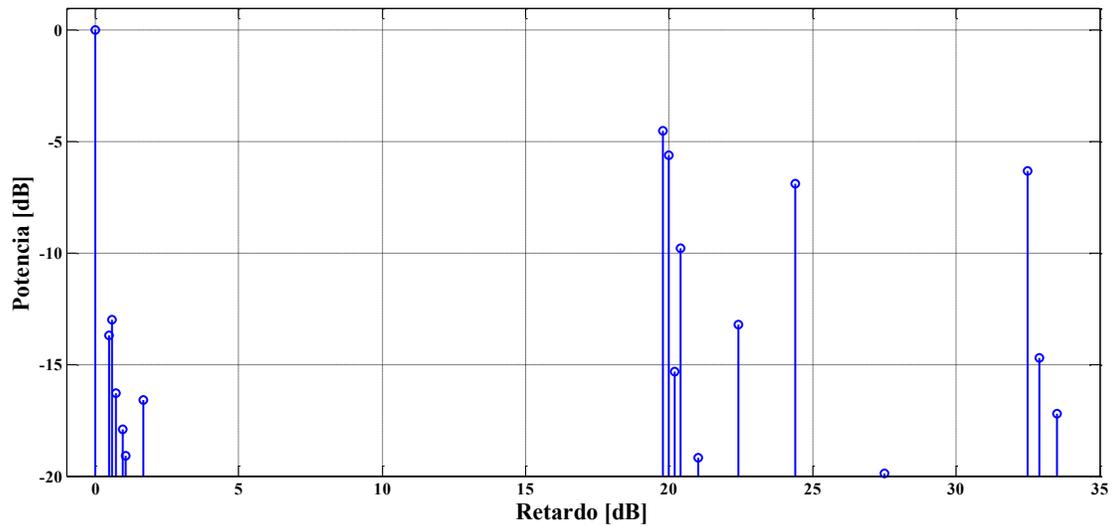


Figura 4.23 Canal de propagación de Río de Janeiro con umbral en -20 dB.

De acuerdo a las figuras 4.15 y 4.23, es evidente que las condiciones de propagación en Río de Janeiro son mucho más complicadas que en la provincia de Henan en China, basta con ver el número de taps que contiene el perfil de retardo con un umbral de -20 dB en el caso de las mediciones en Río de Janeiro para saber que a un receptor le costará mucho más trabajo recuperar el audio y el video en comparación a lo que sucede en China. Un aspecto interesante de las mediciones brasileñas es ver como el segundo grupo de ecos (aquellos que comienzan en 19.8 μ s) presenta una notable dispersión temporal entre cada eco debido al accidentado terreno que rodea la zona de cobertura de la red SFN y al urbanismo.

Los perfiles presentados en esta sección pueden ser utilizados para simulaciones donde se evalúe el comportamiento de receptores digitales en recepción fija. Ambos proyectos merecen atención porque los perfiles definidos sí representan entornos de propagación de redes SFN reales y no solo se considera un tap por cada transmisor que participa en la red SFN, como es común en los perfiles de retardo definidos para simulaciones de redes de isofrecuencia.

4.4 Proyecto CELTIC Wing-TV

Durante los últimos años, el gran éxito que han tenido los dispositivos móviles en la población, ha generado un nuevo nicho de mercado para la radiodifusión pública. Tener la capacidad de ver videos en tiempo real en un celular o en una tableta con alta calidad en audio y video a través de las redes móviles es un servicio que muchos usuarios desean tener, sin embargo, aún no es posible en muchos países del mundo. A pesar del desarrollo de redes como UMTS o LTE que ya permiten tener tasas de enlace de subida y bajada bastante considerables, ser capaces de descargar un programa de audio y video de alta calidad, requeriría contratar servicios bastante caros que el grueso de la población no puede pagar, al menos en países en vías de desarrollo. Por otro lado, en el supuesto caso de que hubiera mucha gente que contratara este tipo de servicios, la única manera de aumentar la capacidad de las redes existentes considerablemente,

es hacer cada vez más pequeñas las celdas celulares, lo cual representa una inversión muy fuerte para los operadores de las redes de banda ancha móvil.

Aquí es donde se revalora la posesión de bandas para la radiodifusión de señales televisivas, puesto que se han desarrollado tecnologías con el objetivo de entregar señales de televisión de forma gratuita, en tiempo real, con alta calidad de audio y video para dispositivos portátiles y móviles como celulares, computadoras, tabletas, etc. Este tipo de tecnologías están basadas en direcciones IP para distribuir contenidos a petición, un conjunto de mejoras en los esquemas de modulación y en los códigos para corrección de errores, además de técnicas de cancelación de ecos mucho más sofisticadas.

Ejemplos de este tipo de tecnologías de transmisión que permiten la movilidad y portabilidad de los receptores son:

- DVB-H
- ATSC M/H
- ISDB-Tmm

El hecho de que los receptores sean portátiles y móviles, implica que no es posible cargar un celular conectado a una antena Yagui como las que se colocan en los techos de las casas y edificios para la recepción fija. En el caso de los celulares, tabletas o computadoras portátiles, en general, están equipadas con antenas muy pequeñas de poca ganancia, por lo que aquel que quiera desplegar una red de transmisión de televisión digital móvil, debe asegurar que el usuario tendrá suficiente intensidad de campo eléctrico para permitir que los receptores recuperen la señal tanto en interiores como en exteriores. Es entonces, donde las redes SFN toman gran importancia.

Las redes de transmisión de televisión móvil, se encuentran en una zona intermedia entre las redes de transmisión de televisión convencional y las redes de telefonía celular. Por un lado, es complicado que con un solo transmisor de alta potencia, se puedan lograr las intensidades de campo adecuadas para asegurar una recepción de calidad en los dispositivos móviles, sobre todo en ciudades de urbanismo denso. Por otro lado, la televisión móvil tiene la ventaja de que distribuye el mismo

contenido a todos los usuarios, por lo que la cantidad de personas que pueden tener acceso al contenido de la red de transmisión no está limitada; así, no es necesario instalar muchas celdas de poca cobertura para incrementar la capacidad de las mismas, solo se necesita el número de celdas necesarias para cubrir un área con señales de buena potencia. El problema es que es poco probable que los órganos reguladores del sector de las telecomunicaciones asignen diferentes canales para cada celda; si el radiodifusor quiere transmitir señales de televisión móvil, deberá instalar redes de isofrecuencia y, para hacerlo, se requiere de un conocimiento especializado de los canales de propagación que generan las redes SFN para elegir los puntos más adecuados en donde se colocarán los transmisores de la red.

Hoy en día, DVB-H se ha establecido como la principal tecnología de televisión móvil en el mundo puesto que es posible transmitir con DVB-T y DVB-H simultáneamente usando modulación jerárquica. Al ser DVB-T el estándar de televisión digital más extendido en el mundo, es natural que DVB-H sea la tecnología que reciba más apoyo hasta ahora. Además, las mejoras en el FEC respecto a DVB-T, hacen de DVB-H la tecnología más robusta para transmitir señales de televisión móvil actualmente. En esta sección se expondrán algunos canales de propagación que se definieron a partir de pruebas de campo realizadas con señales de DVB-H.

Como se dijo en la sección 4.1, uno de los canales de propagación con el que se empezó a evaluar el desempeño de los receptores de DVB-T en recepción móvil fue el TU6, definido en el proyecto COST 207 para representar el entorno de propagación en una zona urbana. Cuando se desarrolló DVB-H, los primeros receptores fabricados por la industria también se apegaron al canal TU6 para tratar de asegurar el correcto desempeño de los mismos una vez que estuvieran operando. Sin embargo, este canal de propagación, aunque sí toma en cuenta la movilidad de los receptores, no considera las condiciones de propagación producidas por las redes SFN. Además, en las primeras pruebas de campo que se realizaron transmitiendo señales con DVB-H, los investigadores se dieron cuenta que el perfil de retardo definido en el canal TU6, exige muy altas relaciones C/N para que los receptores puedan demodular correctamente en

movimiento, lo que puede ser muy exigente para lo que realmente ocurre dentro de una red de transmisión de televisión móvil bien planeada.

La organización CELTIC (Cooperation for a sustained European Leadership in Telecommunications) se dio cuenta de la necesidad de llevar a cabo estudios serios del desempeño de DVB-H en entornos reales y así, los resultados sirvieran como una guía que ayudara a desplegar de la mejor manera las redes de transmisión, así como al desarrollo de los receptores para esta tecnología. Esta organización está compuesta por socios de la industria, universidades e institutos de investigación que trabajan de manera conjunta en proyectos europeos relacionados con la innovación en telecomunicaciones.

El proyecto se llamó CELTIC Wing-TV, fue realizado por los socios finlandeses de CELTIC y consistió en varias campañas de medidas realizadas en el otoño de 2005. El principal objetivo de estas campañas fue la recolección de datos de los canales típicos de propagación que se podían dar en interiores y exteriores con velocidad variante, para poder definir nuevos canales de propagación que representaran de una mejor manera lo que pasa en la realidad y sustituir el uso de los canales del COST 207.

La campaña de pruebas se llevó a cabo en 3 ciudades de Finlandia: Oulu, Turku y Helsinki con redes SFN. En Oulu se instaló 1 transmisor y un repetidor, en Turku se instalaron 2 transmisores y en Helsinki la red estaba compuesta por 3 transmisores y varios repetidores [NOVEL, 2006].

En Oulu, las pruebas se llevaron a cabo en una carretera a una velocidad máxima de 100 km/h y en un ambiente vehicular suburbano en donde las máximas velocidades oscilaban entre 30 y 40 km/h.

En el caso de Turku las mediciones se clasificaron en 4 categorías [WINGTV, 2006]:

- Portátil peatonal en interiores a 3 km/h (PI)
- Portátil peatonal en exteriores a 3 km/h (PO)
- Móvil vehicular urbano a 30 km/h (VU)
- Móvil vehicular rural a 100 km/h (MR)

Las mediciones para las categorías PI y PO se realizaron a pocos cientos de metros de uno de los transmisores de la red SFN y había línea de vista directa. Las mediciones para MR se realizaron en una carretera con pocos obstáculos grandes en los alrededores y la campaña para el VU se llevó a cabo en el centro de la ciudad de Turku.

En la ciudad de Helsinki, solo se tomó en cuenta un ambiente vehicular urbano en el distrito de Kallio, que es una zona caracterizada por la existencia de muchos departamentos construidos con concreto y un terreno muy montañoso.

En todos los casos, se usó un receptor para OFDM fabricado por Elektrobit capaz de almacenar la señal de RF capturada para su posterior procesamiento. Se generaron perfiles de retardo para cada uno de los ambientes evaluados en las tres ciudades tomando como umbral de decisión 30 dB respecto al tap más potente [NOVEL, 2006]. A continuación, se muestran unos ejemplos de los perfiles de potencia al retardo antes de ser definidos los taps para cada perfil. Las imágenes nos ayudan a ver cómo empeora la situación conforme aumenta el número de transmisores y repetidores.

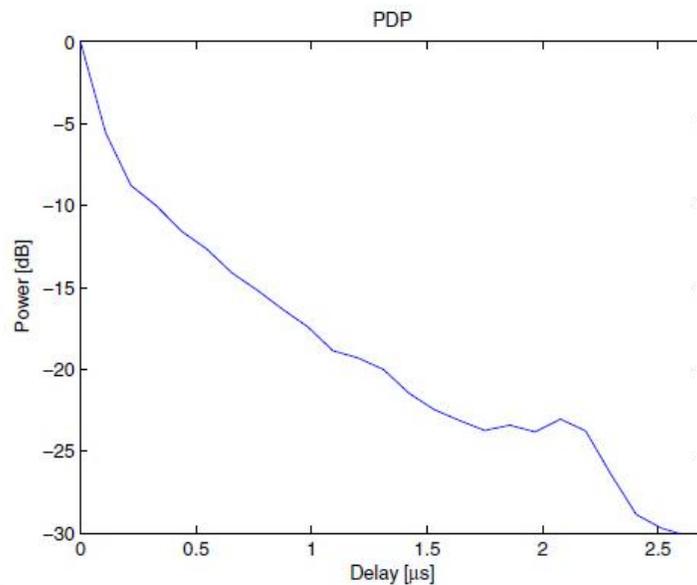


Figura 4.24 Perfil de potencia al retardo de las pruebas realizadas en una carretera de Oulu a 100 km/h (1 transmisor y 1 repetidor) [NOVEL, 2006].

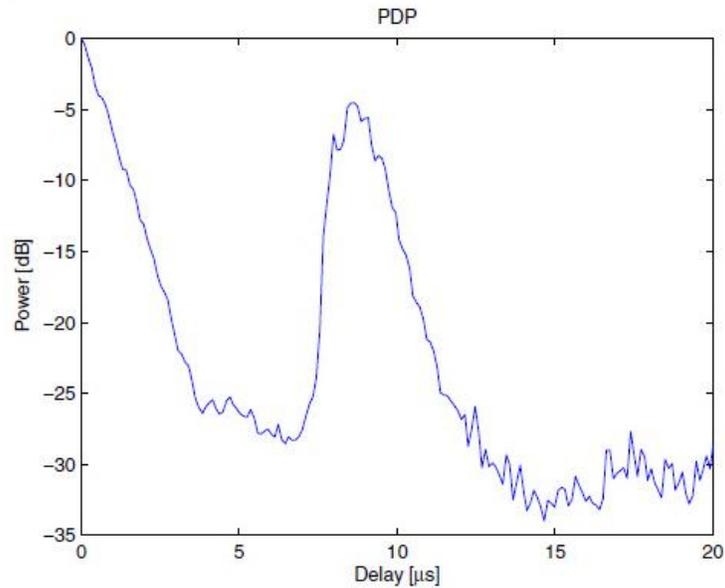


Figura 4.25 Perfil de potencia al retardo de las pruebas realizadas en recepción portátil peatonal en interiores a 3 km/h (PI) en Turku (2 transmisores) [NOVEL, 2006].

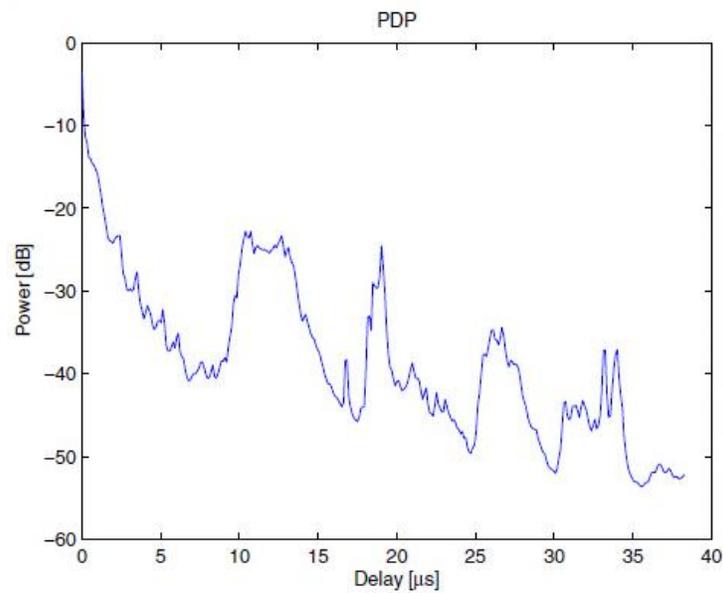


Figura 4.26 Perfil de potencia al retardo de las pruebas realizadas en recepción móvil vehicular urbano a 30 km/h en Helsinki (3 transmisores y varios repetidores) [NOVEL, 2006].

Todos los perfiles de retardo que se obtuvieron, se decidió que fueran de 24 taps con fines de precisión. Obviamente cada uno de los perfiles generados puede

representar con mucha fidelidad lo que pasa en la realidad, el problema es la complejidad para ser simulados.

Como la mayoría de los simuladores de fading que existen actualmente no son capaces de simular canales con muchos ecos, resulta una mejor opción sintetizar los mismos en canales con un menor número de taps sin perder demasiada precisión en el intento de simular las condiciones de propagación que se presentan en los ambientes reales. En este caso, los investigadores del proyecto CELTIC Wing-TV, decidieron sintetizar los canales de propagación generados en perfiles de retardo de 12 taps. La síntesis consistió en dividir el eje temporal en regiones de tamaño variable que dependía de la densidad de ecos existentes y el número de taps que se querían obtener, en este caso 12. Después, los ecos dentro de una misma zona se sumaban para generar un solo tap que después se normalizaba en relación al tap resultante de mayor tamaño.

En el reporte final del proyecto CELTIC Wing-TV publicado en mayo de 2006 [WINGTV, 2006], se presentaron los nuevos canales de propagación que la organización CELTIC sugiere usar para probar las terminales receptoras que pretenden demodular y decodificar las señales de DVB-H, sin embargo, por su naturaleza, pueden ser usados para simular las condiciones de propagación que implica una red de transmisión de televisión móvil bajo cualquier tecnología que use las bandas IV y V de UHF con anchos de banda de 6, 7 u 8 MHz.

Aunque en el proyecto Wing-TV se hicieron mediciones en tres ciudades distintas, el reporte final solo tomó en cuenta aquellas realizadas en Turku por ser la ciudad en donde se hicieron más mediciones, además de que las pruebas se hicieron usando una red SFN compuesta por 2 transmisores, lo cual generó condiciones de propagación intermedias entre la situación de Oulu, en donde solo había un transmisor y un repetidor, y lo que pasaba en Helsinki, donde había tres transmisores y varios repetidores. A continuación, se presentan los 4 canales de propagación definidos para la ciudad de Turku, la cual se encuentra al sur de Finlandia en una zona llana. Es una ciudad pequeña con pocos edificios y construcciones no tan altas.

Portátil peatonal en interiores a 3 km/h (PI)

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	0.0
2	0.1	- 6.4
3	0.2	- 10.4
4	0.4	- 13.0
5	0.6	- 13.3
6	0.8	- 13.7
7	1.0	- 16.2
8	1.6	- 15.2
9	8.1	- 14.9
10	8.8	- 16.2
11	9.0	- 11.1
12	9.2	- 11.2

Tabla 4.13 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en interiores a 3 km/h.

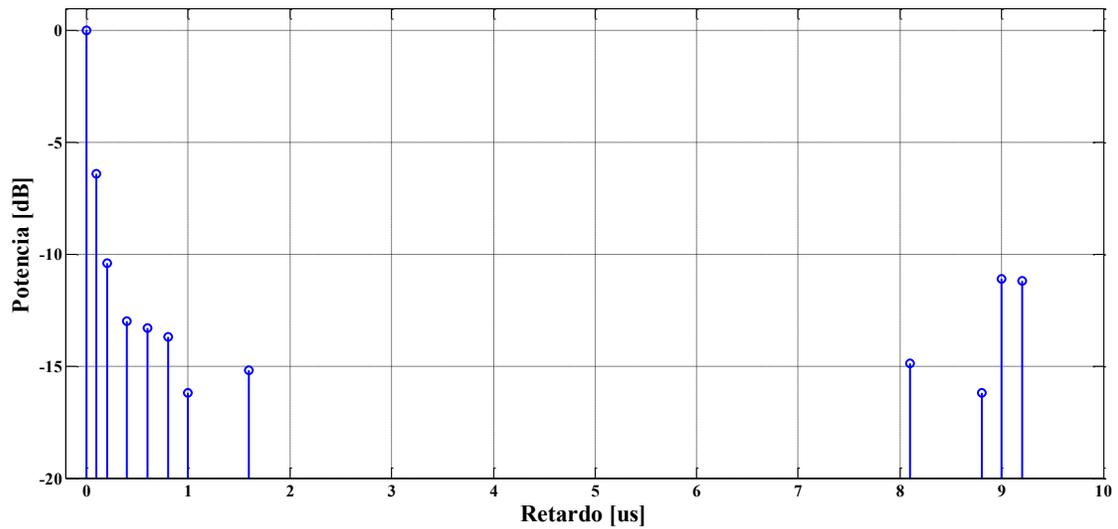


Figura 4.27 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en interiores a 3 km/h.

Portátil peatonal en exteriores a 3 km/h (PO)

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	0.0
2	0.2	- 1.5
3	0.6	- 3.8
4	1.0	- 7.3
5	1.4	- 9.8
6	1.8	- 13.3
7	2.3	- 15.9
8	3.4	- 20.6
9	4.5	- 19.0
10	5.0	- 17.7
11	5.3	- 18.0
12	5.7	- 19.3

Tabla 4.14 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en exteriores a 3 km/h.

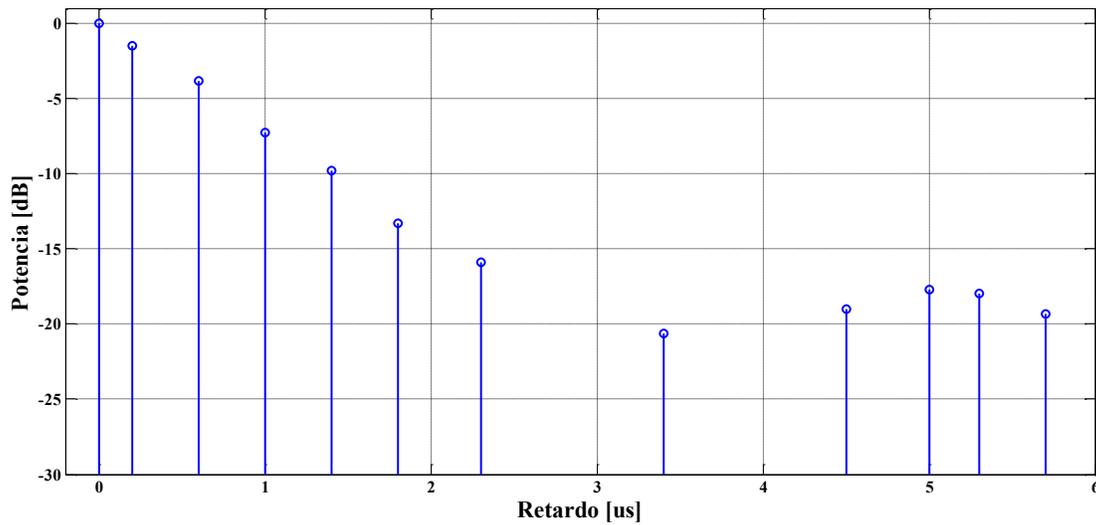


Figura 4.28 Canal de Propagación para recepción portátil peatonal en exteriores a 3 km/h.

Móvil vehicular urbano a 30 km/h (VU)

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	0.0
2	0.3	- 0.5
3	0.8	- 1.0
4	1.6	- 4.1
5	2.6	- 8.8
6	3.3	- 12.6
7	4.8	- 18.6
8	5.8	- 21.6
9	7.2	- 24.6
10	10.8	- 20.7
11	11.8	- 18.2
12	12.6	- 19.4

Tabla 4.15 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular urbano a 30 km/h.

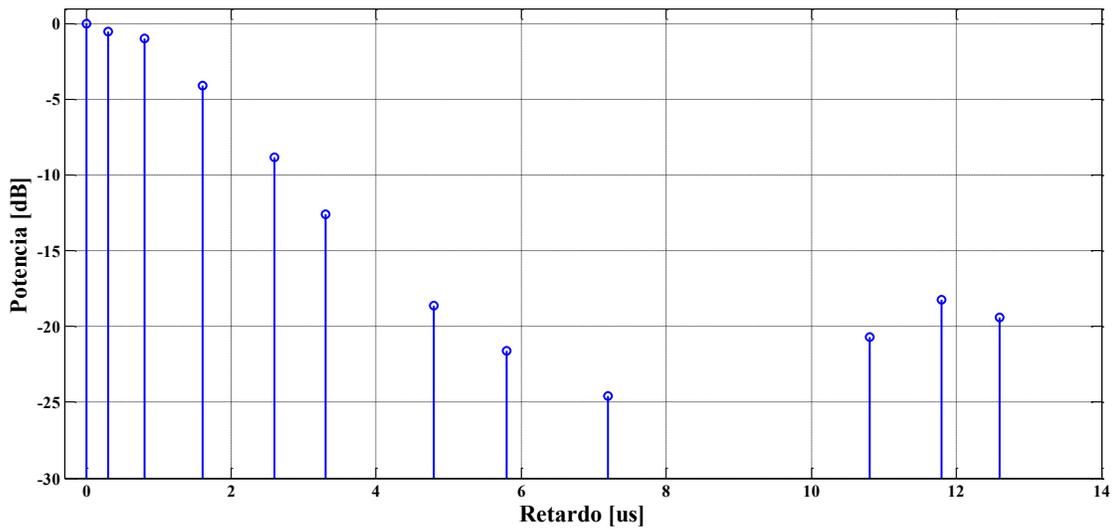


Figura 4.29 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular urbano a 30 km/h.

Móvil vehicular rural a 100 km/h (MR)

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	0.0
2	0.5	- 1.3
3	1.0	- 3.4
4	1.8	- 6.8
5	2.5	- 10.2
6	3.1	- 12.9
7	3.9	- 16.3
8	4.8	- 19.5
9	5.5	- 21.7
10	6.4	- 23.3
11	7.0	- 24.2
12	9.0	- 25.8

Tabla 4.16 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular rural a 100 km/h.

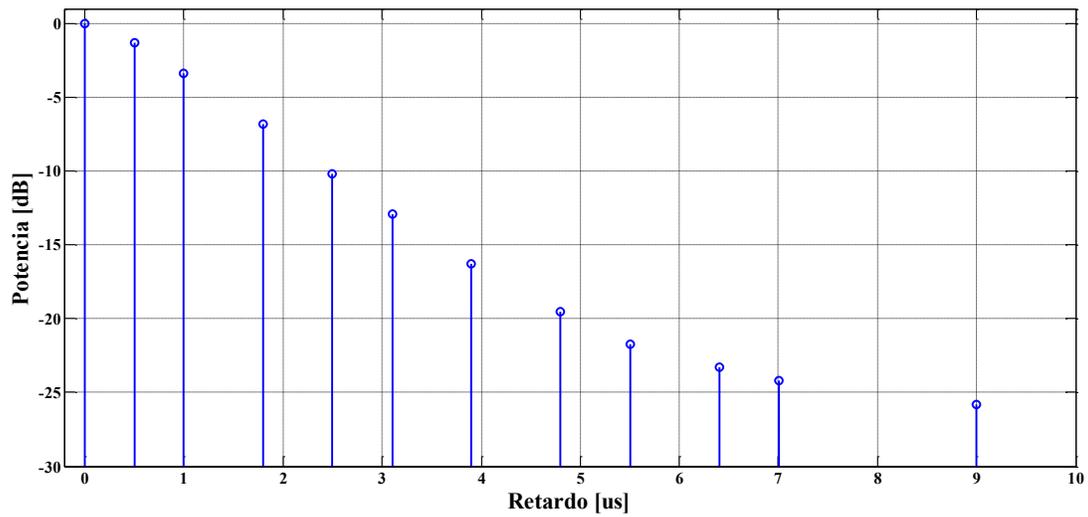


Figura 4.30 Canal de Propagación para recepción móvil vehicular rural a 100 km/h.

Cuando tenemos la necesidad de simular un canal de propagación, se sugiere primeramente analizar las condiciones que rodearan al transmisor, entre ellas, el tipo de red de transmisión, si la zona es urbana, suburbana, rural, montañosa, etc. Cuando queremos simular el entorno de propagación de una red SFN, también es necesario conocer las distancias entre los sitios transmisores de la red y la posición supuesta del receptor, para de esta manera poder predecir la diferencia en los tiempos de arribo de los taps de mayor potencia.

Con toda la información antes expuesta, y teniendo presentes los canales de propagación que se analizaron en este capítulo, es posible seleccionar el que mejor se ajuste a las condiciones ambientales del canal de propagación que deseamos simular. Por ejemplo, si deseamos simular las condiciones de propagación en una red SFN de 2 transmisores instalada en terreno montañoso, es posible usar los canales definidos para la ciudad de Río de Janeiro de la sección 4.3 y, al controlar la dispersión temporal entre los dos grupos de ecos (la cual depende de los tiempos de propagación entre los sitios de transmisión y nuestro receptor), podemos generar una simulación que tenga rasgos similares a lo que sucedería en la realidad.

5 INSTALACIÓN DE UNA RED SFN

El 31 de diciembre de 2015 se concretó el llamado “Apagón Analógico” en México. De esta manera, todas las televisoras dejaron de transmitir sus señales en forma analógica y se dio la transición a la televisión digital terrestre usando el estándar norteamericano ATSC.

El Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), como órgano regulador del sector, a través de la “Política para la transición a la televisión digital terrestre” [IFT, 2014], mostró su interés para hacer uso de todas las tecnologías que conlleven a una mejor eficiencia espectral y que solo se pueden utilizar con los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre. Ejemplo de estas tecnologías es la multiprogramación, usando la compresión de video de acuerdo al estándar MPEG-2 o H.264 para poder transmitir una mayor cantidad de programas en un ancho de banda de radiofrecuencia de 6 MHz. Asimismo, el uso de redes en frecuencia única, es una tecnología que el IFT quiere explotar para reducir el número de canales asignados a las televisoras.

El artículo 13 de la “Política para la transición a la televisión digital terrestre”, publicada el 11 de septiembre de 2014 en el Diario Oficial de la Federación por el Instituto Federal de Telecomunicaciones, dicta lo siguiente [IFT, 2014]:

*“Los Concesionarios de Televisión y Permisionarios de Televisión deberán contribuir en asegurar la continuidad del Servicio de Radiodifusión, es decir, garantizarán la adecuada transmisión de las señales de TDT, replicando toda el Área de Cobertura, pudiendo utilizar para ello, previa autorización, los Equipos Complementarios de Zona de Sombra que resulten necesarios. Cualquier crecimiento de la réplica del Área de Cobertura no podrá exceder la Zona de Cobertura autorizada. **Con la finalidad de hacer un uso eficiente del Espectro Radioeléctrico, a menos que se acredite fehacientemente que existe una imposibilidad técnica para ello, los Canales de Transmisión en los que operen los Equipos Complementarios de Zona de Sombra serán los mismos que los Canales Adicionales asignados conforme al artículo 7 (co-canal) o a los utilizados para la Operación Intermitente.”***

Debido al artículo citado, el IFT ha dejado de asignar canales distintos para cubrir áreas que el Instituto considera como zonas de sombra de una estación principal, por lo que a la fecha de publicación de esta tesis, ya se encuentran operando algunas redes SFN en México usando el estándar ATSC. En dos de ellas, tuve la oportunidad de trabajar en su instalación en conjunto con ingenieros de la empresa Rohde & Schwarz de México, siendo ambas para una de las televisoras más importantes del país, Televisión Azteca.

En las siguientes secciones, se presenta una descripción de cómo fueron instaladas y configuradas las redes SFN.

5.1 Redes SFN Puebla-Tlaxcala

En la región comprendida por los estados de Puebla y Tlaxcala, TV Azteca cuenta con 5 sitios de transmisión: Puebla, Tlaxcala, Atlixco, Actipan y Tlaxco. En cada sitio se transmiten las señales de dos programaciones independientes: Azteca 13 y Azteca 7. Cuando el IFT otorgó los permisos para la transmisión de señales de televisión digital, les asignaron el canal 24 para la radiodifusión de Azteca 13 en los 5 sitios antes mencionados, así como el canal 27 para la radiodifusión de Azteca 7 en las 5 localidades.



Figura 5.1 Posición de los sitios de transmisión de TV Azteca.

En la figura 5.1, los indicadores en amarillo muestran las posiciones de cada sitio de transmisión. Debido a la orografía del lugar, Atlixco, Actipan y Tlaxco quedan aislados de la propagación de señales tanto de Puebla como de Tlaxcala, por lo que fue posible que, en estas tres localidades, estos sitios de transmisión operaran en configuración MFN. Los sitios de transmisión tanto de Puebla como de Tlaxcala, conforman 2 redes SFN, una funcionando en el canal 24 (Azteca 13) y la otra en el canal 27 (Azteca 7).

La clave en el funcionamiento de las redes SFN es la sincronía entre todo el sistema de transmisión, tanto en el tiempo de transmisión como en la frecuencia. Ligeras variaciones en estos dos factores pueden llegar a impedir el correcto funcionamiento de la red. En este caso, todos los componentes de ambas redes SFN se sincronizaron usando la señal 1 pps (1 pulso por segundo) proveniente de los satélites del sistema GPS.

En la figura 5.2 se puede apreciar un diagrama de bloques de cómo se instalaron las dos redes SFN. Con el fin de que se entiendan de mejor manera todos los elementos que las conforman, las tablas 5.1 y 5.2 hacen una descripción detallada del equipo y las señales que se necesitaron para que ambas redes funcionaran adecuadamente.

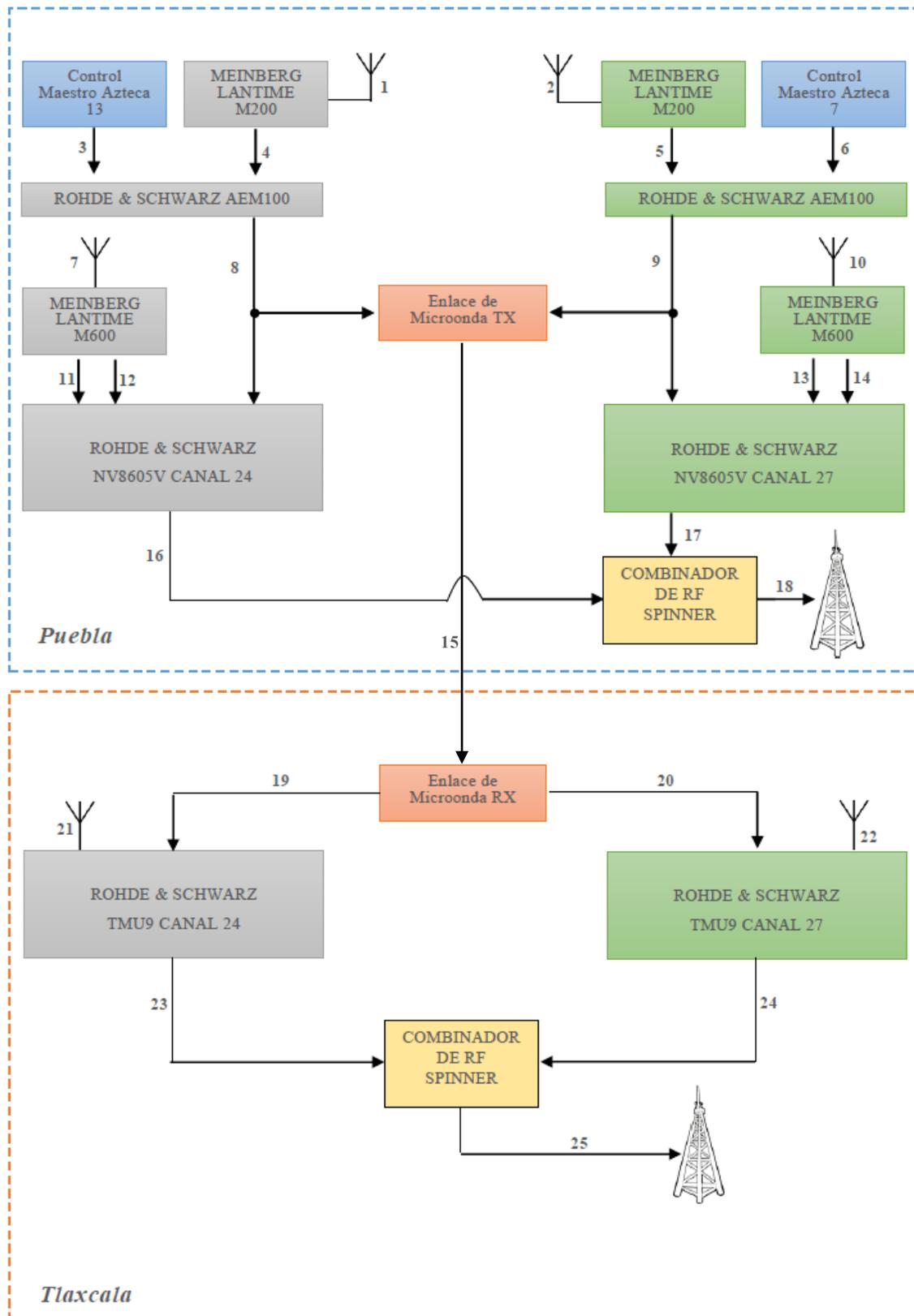


Figura 5.2 Diagrama de las redes SFN instaladas.

Descripción del Equipo de las redes SFN	
Control Maestro Azteca 13	Es el elemento que entrega la señal de video y audio que se quiere transmistir en el canal 24. La señal debe tener una tasa de transmisión 19.39 Mbps.
Control Maestro Azteca 7	Es el elemento que entrega la señal de video y audio que se quiere transmistir en el canal 27. La señal debe tener una tasa de transmisión de 19.39 Mbps.
MEINBERG LANTIME M200	Es un servidor que provee de una señal temporal de referencia, en este caso, a través del protocolo NTP. Su referencia es la señal 1 pps proveniente del sistema GPS y entrega la señal de sincronía vía Ethernet en una conexión IP.
Rohde & Schwarz AEM100	Es el elemento más importante de la red SFN ya que es el que le indica a cada transmisor perteneciente a la red en qué momento se debe transmitir cada símbolo. Esta información temporal es multiplexada en el el flujo de transporte original y toma como base una señal de sincronía que entrega un servidor NTP. Es el insertador de MIPs.
MEINBERG LANTIME M600	De la misma forma que el LANTIME M200, este es un servidor NTP, la diferencia es que el M600 es capaz de entregar una señal de referencia de 1 pps y una señal de 10 MHz. Estas señales son las que usan los transmisores de Puebla para sincronizarse con la red SFN, así como ser la referencia para el oscilador local del modulador.

Rohde & Schwarz NV8605V	Es un transmisor de alta potencia enfriado por líquido.
Combinador de RF Spinner	Es un elemento de radiofrecuencia que filtra y combina la potencia del canal 24 y el canal 27.
Enlace de Microondas	Es un enlace digital punto a punto capaz de transportar dos señales ASI.
Rohde & Schwarz TMU9	Son transmisores de potencia media enfriados por aire de nueva generación. La ventaja de esta línea de transmisores es que ya tienen integrado un receptor satelital que provee al modulador de las señales de referencia.

Tabla 5.1 Descripción del equipo de las redes SFN Puebla-Tlaxcala.

Descripción de las Señales de la red SFN	
1	Señal proveniente de los satelitales de GPS que sirve de alimentación para el servidor LANTIME M200.
2	Señal proveniente de los satelitales de GPS que sirve de alimentación para el servidor LANTIME M200.
3	Flujo de transporte de la televisora que contiene paquetes de audio y video codificado a una tasa de 19.39 Mbps.
4	Señal Ethernet que lleva la información temporal con el protocolo NTP vía una conexión IP entre el LANTIME M200 y el AEM100.
5	Señal Ethernet que lleva la información temporal con el protocolo NTP vía una conexión IP entre el LANTIME M200 y el AEM100.
6	Flujo de transporte de la televisora que contiene paquetes de audio y video codificado a una tasa de 19.39 Mbps.
7	Señal proveniente de los satelitales de GPS que sirve de alimentación para el servidor LANTIME M600.
8	Es un flujo de transporte con una tasa de transmisión de 19.39 Mbps que contiene paquetes de audio y video codificados. Algunos de estos paquetes

	transportan estampas temporales (MIPs) que son las responsables de que la red SFN funcione, puesto que es lo que le permite saber a los transmisores los instantes en los que se deben transmitir los símbolos.
9	Es un flujo de transporte con una tasa de transmisión de 19.39 Mbps que contiene paquetes de audio y video codificados. Algunos de estos paquetes transportan estampas temporales (MIPs) que son las responsables de que la red SFN funcione, puesto que es lo que le permite saber a los transmisores los instantes en los que se deben transmitir los símbolos.
10	Señal proveniente de los satelitales de GPS que sirve de alimentación para el servidor LANTIME M600.
11	Señal de sincronía 1 pps.
12	Señal de sincronía 10 MHz.
13	Señal de sincronía 1 pps.
14	Señal de sincronía 10 MHz.
15	Enlace de microondas digital que transporta las señales 8 y 9.
16	Señal de salida del transmisor. En este punto la señal sale sin ser filtrada.
17	Señal de salida del transmisor. En este punto la señal sale sin ser filtrada.
18	Es la combinación de la potencia del canal 24 y el canal 27. Ahora ambas señales están filtradas y listas para ser radiadas en el sitio de Puebla.
19	Es la señal 8 que se recupera en Tlaxcala después de haber sido transportada por el enlace de microondas.
20	Es la señal 9 que se recupera en Tlaxcala después de haber sido transportada por el enlace de microondas.
21	Señal proveniente de los satelitales de GPS que sirve de alimentación para el receptor satelital integrado en los transmisores TMU9 de Rohde & Schwarz.
22	Señal proveniente de los satelitales de GPS que sirve de alimentación para el receptor satelital integrado en los transmisores TMU9 de Rohde & Schwarz.
23	Señal de salida del transmisor. En este punto la señal sale sin ser filtrada.
24	Señal de salida del transmisor. En este punto la señal sale sin ser filtrada.

25	Es la combinación de la potencia del canal 24 y el canal 27. Ahora ambas señales están filtradas y listas para ser radiadas en el sitio de Tlaxcala.
-----------	--

Tabla 5.2 Descripción de las señales de las redes SFN Puebla-Tlaxcala.

La potencia a la salida del combinador de RF en la planta transmisora de Puebla, tanto en el canal 24 como en el canal 27, es de 3.6 kW, mientras que en Tlaxcala, la potencia después del combinador de RF es de 2.8 kW en ambos canales. Al usar transmisores de la misma potencia y compartir el sistema radiador tanto en Puebla como Tlaxcala, aunado a que la propagación de señales en el canal 24 (530-536 MHz) y el canal 27 (548-554 MHz) es muy similar, fue posible predecir que el comportamiento de las redes SFN sería muy parecido, siempre y cuando se usaran parámetros idénticos en la configuración de los AEM100.

El parámetro principal que se configura en los insertadores de MIPs de Rohde & Schwarz (AEM100), es el retardo T_{TX} , que es el tiempo a partir de que los paquetes salen del AEM100 y hasta el momento en el que son transmitidos al aire. Este retardo se calcula en función del mayor tiempo que les toma a los paquetes ir desde el centro de distribución hasta las plantas transmisoras que participan en la red SFN. Cuando los transmisores reciben los paquetes, son capaces de saber que los paquetes están tardando T_{TR} en llegar a ellos, lo que les permite calcular un nuevo retardo T_D , que en conjunto con T_{TR} suman T_{TX} y de esta manera todos los transmisores pueden transmitir el mismo símbolo simultáneamente, a menos que por cuestiones de diseño de la red, se requiera establecer un retardo extra en determinados transmisores, lo cual se hace manualmente en cada planta transmisora. En el caso de las redes SFN instaladas en Puebla y Tlaxcala, los AEM100, tanto para el canal 24 como para el canal 27, se configuraron con un $T_{TX} = 900$ ms.

Durante las mediciones de campo se comprobó que las redes SFN se comportaron prácticamente de la misma manera, por lo que en lo sucesivo solo se presentan las simulaciones y mediciones llevadas a cabo para el canal 24 con la señal de Azteca 13.

5.2 Planeación de la red SFN para el canal 24 en la banda UHF

Antes de instalar una red SFN es indispensable tener disponibles las coberturas esperadas de cada planta transmisora que participará en la red, de otro modo, es complicado ubicar las zonas en donde el entorno de recepción puede ser crítico. Como no se tuvo esta información, fue necesario generarla.

Para llevar a cabo las predicciones de cobertura, se utilizó el software Radio Mobile, el cual es un programa creado por el ingeniero y radioaficionado canadiense Roger Coudé. El software utiliza datos digitales de elevación del terreno y un modelo de propagación de las ondas de radio conocido como "Irregular Terrain Model", basado en el algoritmo Longley-Rice, que permite determinar de forma muy aproximada el área de cobertura de sistemas de radiocomunicaciones que trabajen en una frecuencia comprendida entre los 20 MHz y los 20 GHz [ETSIT-UPM, 2007]. A continuación, se presenta la información que se utilizó para la simulación de las coberturas, tanto de la planta transmisora de Puebla [XHPUR-P, 2008] como la de Tlaxcala [XHPUR-T, 2015]:

Información de la planta transmisora de Puebla XHPUR Canal 24 (530-536 MHz)

Coordenadas del sistema radiador: Latitud: 19°03'17.1"N / Longitud: 98°13'34.1"O

Altura del centro de radiación de la antena sobre el lugar de instalación: 104 m

Máxima Potencia Radiada Aparente de la estación: 53.51 kW @ 135°

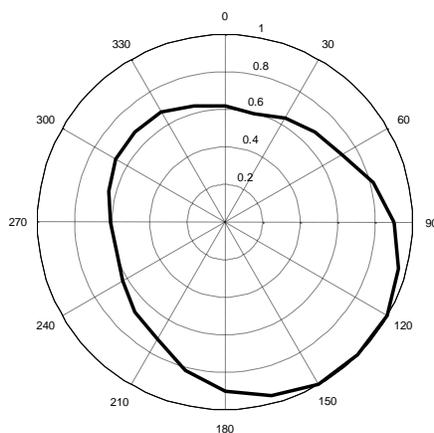


Figura 5.3 Patrón de radiación horizontal aproximado de la antena de Puebla.

Información de la planta transmisora de Tlaxcala XHPUR Canal 24 (530-536 MHz)

Coordenadas del sistema radiador: Latitud: 19°20'20.27"N / Longitud: 98°16'50.70"O

Altura del centro de radiación de la antena sobre el lugar de instalación: 29 m

Máxima Potencia Radiada Aparente de la estación: 21.960 kW @ 45° y 190°

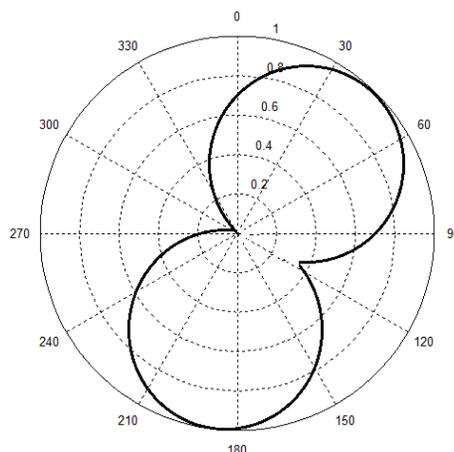


Figura 5.4 Patrón de radiación horizontal aproximado de la antena de Tlaxcala.

Como parámetro para determinar las áreas de servicio de las estaciones transmisoras, se tomó como base el artículo 22 de la “Política para la transición a la televisión digital terrestre” [IFT, 2014], el cual establece las intensidades de campo eléctrico que deben asegurar las televisoras en sus respectivas áreas de servicio de acuerdo a la disponibilidad F (50,90), es decir, 90% del tiempo en el 50% de localidades. Las intensidades de campo eléctrico están definidas de acuerdo al canal de RF asignado de la siguiente manera:

Canales	2 AL 6	7 AL 13	14 AL 51
Intensidad de campo eléctrico mínimo dentro de la zona de servicio	35 dBu	43 dBu	48 dBu

Tabla 5.3 Definición de intensidades de campo eléctrico en las zonas de servicio para TDT.

En este caso, como era necesario saber la cobertura de los sitios de transmisión de Puebla y Tlaxcala en el canal 24, se usó como límite una intensidad de campo eléctrico

de 48 dBu. El resultado de los cálculos de cobertura del transmisor de la ciudad de Puebla, se muestran en la figura 5.5.

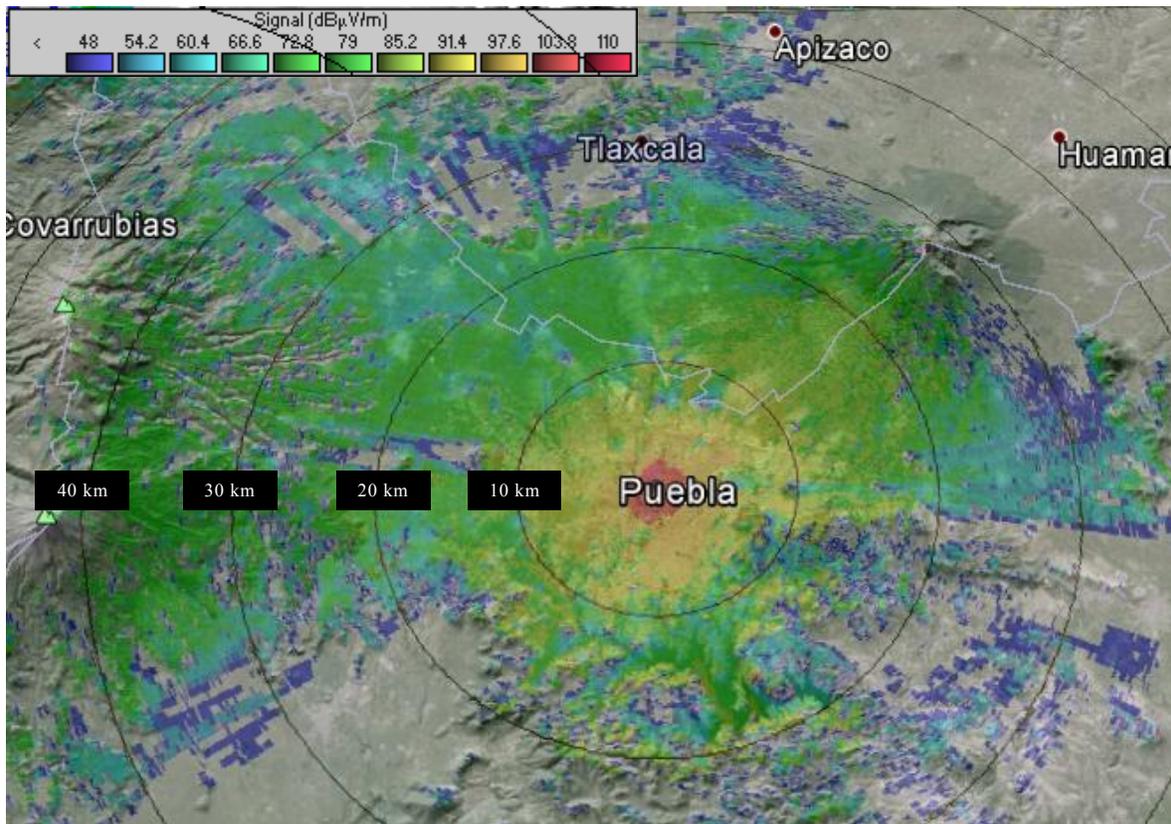


Figura 5.5 Cobertura del sitio transmisor de Puebla en el canal 24.

Según el resultado mostrado en la figura 5.5, se puede observar que el área de servicio de la estación de la ciudad de Puebla es muy grande. Para contextualizar, el 90% de la ciudad de Puebla está concentrada dentro de los primeros 10 km alrededor del sitio de transmisión.

Un aspecto muy importante a resaltar, es que la intensidad de campo eléctrico en la mayor parte de la ciudad de Tlaxcala no alcanza a ser de 48 dBu para considerar que pertenece al área de servicio del sitio de transmisión de Puebla. Esto se puede apreciar en la figura 5.6.

Esta fue la razón por la cual el IFT consideró el sitio de transmisión de Tlaxcala como una estación complementaria de las transmisiones de Puebla y no como una estación independiente.

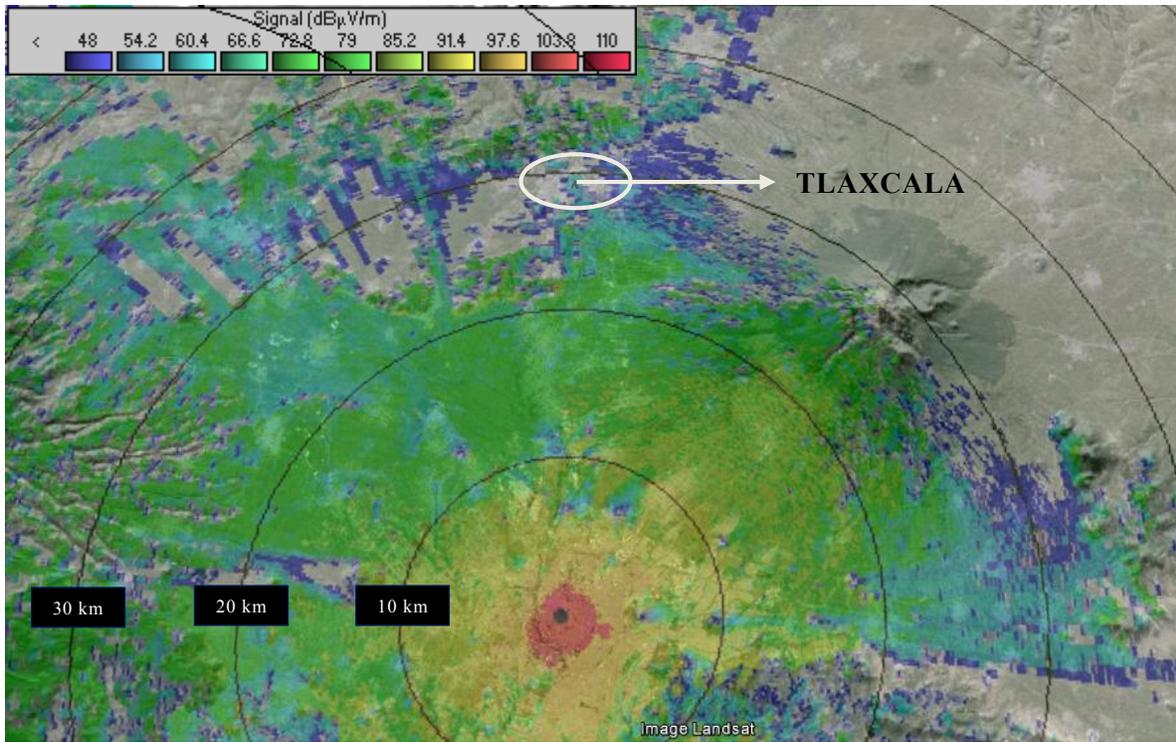


Figura 5.6 Cobertura del sitio de transmisión de Puebla en la ciudad de Tlaxcala.

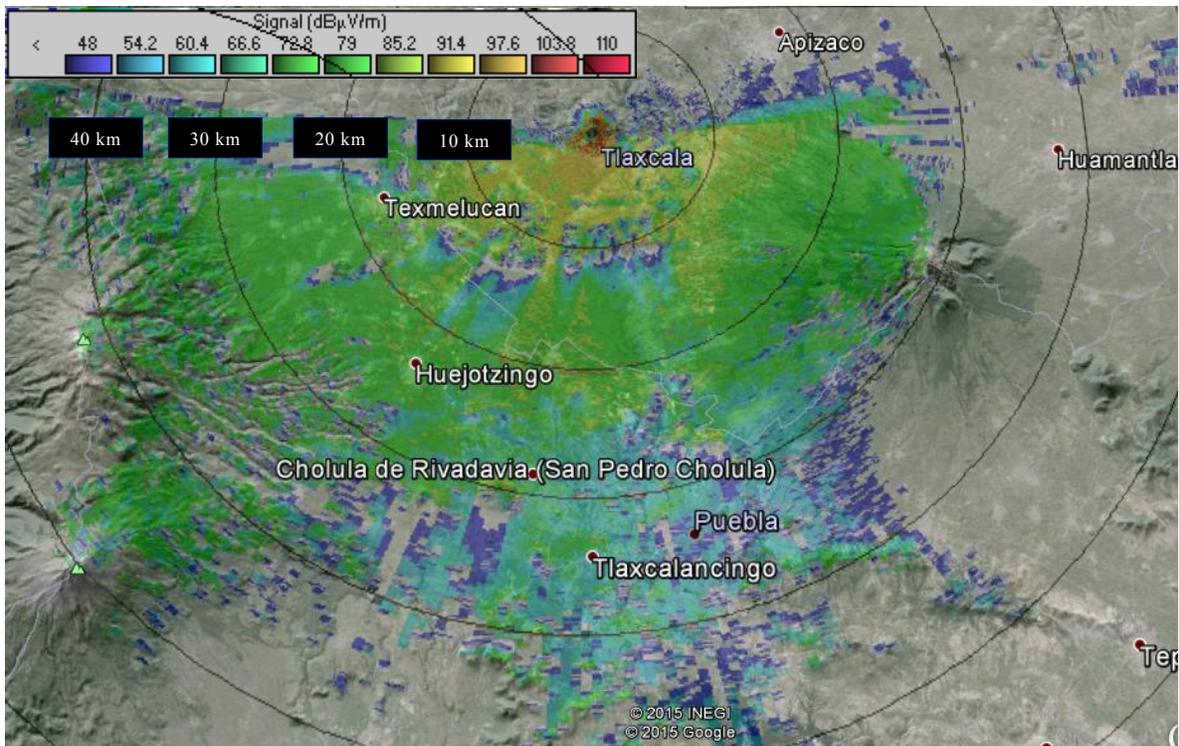


Figura 5.7 Cobertura del sitio transmisor de Tlaxcala en el canal 24.

De acuerdo a la figura 5.7, con la señal del sitio de transmisión de Tlaxcala, la televisora es capaz de entregar su señal en esta ciudad con muy buen nivel de campo eléctrico. También se puede apreciar que la señal radiada en Tlaxcala, alcanza a bañar algunas zonas de la ciudad de Puebla con una intensidad de campo muy débil.

Una vez con las predicciones de cobertura en la mano, fue posible identificar cuáles eran los problemas que se generarían al poner en marcha la red SFN. Un aspecto que complicaba el número de variables bajo control que se tenían, es que la posición de los sitios de transmisión, los patrones de radiación, ganancias y las alturas de las antenas sobre el nivel del suelo, así como las potencias de los transmisores, eran factores que se establecieron en el permiso otorgado por el Instituto Federal de Telecomunicaciones, por lo cual, no era posible modificarlos, puesto que el no cumplimiento de los valores establecidos en el permiso, puede ser motivo de penalizaciones para la televisora. De esta manera, la única variable que se podía manejar, eran los instantes de transmisión de cada sitio.

Entre Puebla y Tlaxcala, hay una distancia de alrededor de 30 km, entonces, si en el instante $t=0$ el sitio de transmisión de Puebla transmite un símbolo, éste llegará a Tlaxcala aproximadamente $100 \mu\text{s}$ después, puesto que las ondas de radio viajan a una velocidad muy similar a la de la luz, cuyo valor práctico es $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Por otro lado, el símbolo transmitido por la planta transmisora de Tlaxcala, si se transmite al mismo tiempo que el que salió de Puebla, llegaría a la capital de Tlaxcala casi de inmediato. Así, un receptor en esta localidad, recibiría la señal de Tlaxcala y un “eco” proveniente desde Puebla $100 \mu\text{s}$ después.

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo 2 de esta tesis, los ecos causan cada vez más daño conforme la dispersión temporal entre ellos aumenta. De hecho, en el caso de ATSC, en el estándar A/74, están definidos los límites en dispersión temporal y en potencia que un receptor debería ser capaz de soportar en recepción fija recibiendo una señal de al menos -28 dBm de potencia [ATSC, 2010]. Conforme la potencia recibida es menos potente, los límites son más exigentes.

	Retardo de eco respecto al tap de mayor amplitud [μs]	Potencia de eco respecto al tap de mayor amplitud [dB]
Pre-eco	-40	-15
	-30	-7
	-20	-7
	-15	-5
	-10	-3
	-5	-0.5
Post-eco	5	-0.5
	10	-1
	15	-1
	20	-2
	30	-3
	40	-4
	50	-15

Tabla 5.4 Comportamiento de los receptores recomendado por ATSC ante ecos estáticos.

La tabla 5.4 no muestra qué tan atenuado tendría que llegar un eco con un retardo de 100 μs para que el televisor sea capaz de recuperar la señal de audio y video, sin embargo, podemos inferir que debe llegar con una atenuación mucho mayor a 15 dB para que no cause ningún problema.

Como ya se habían analizado las predicciones de cobertura de ambas estaciones, se sabía que en Tlaxcala la potencia de la señal de Puebla, sería mucho menor a la potencia de las señales radiadas por el sitio de Tlaxcala. Lo mismo pasaría en el caso de las señales que viajaban desde Tlaxcala hacia Puebla, puesto que el nivel de potencia de las señales radiadas por el sitio de Puebla, sería muy grande al compararlas. Entonces, aunque existiera un eco con un retardo de aproximadamente 100 μs, existía la posibilidad de que no causara mayor daño una vez que la red SFN estuviera operando.

Este análisis condujo a pensar en las zonas en donde la intensidad de campo eléctrico producido por Puebla y Tlaxcala fuera similar. De acuerdo a las figuras 5.5 y 5.7, esta zona se señala en la figura 5.8.

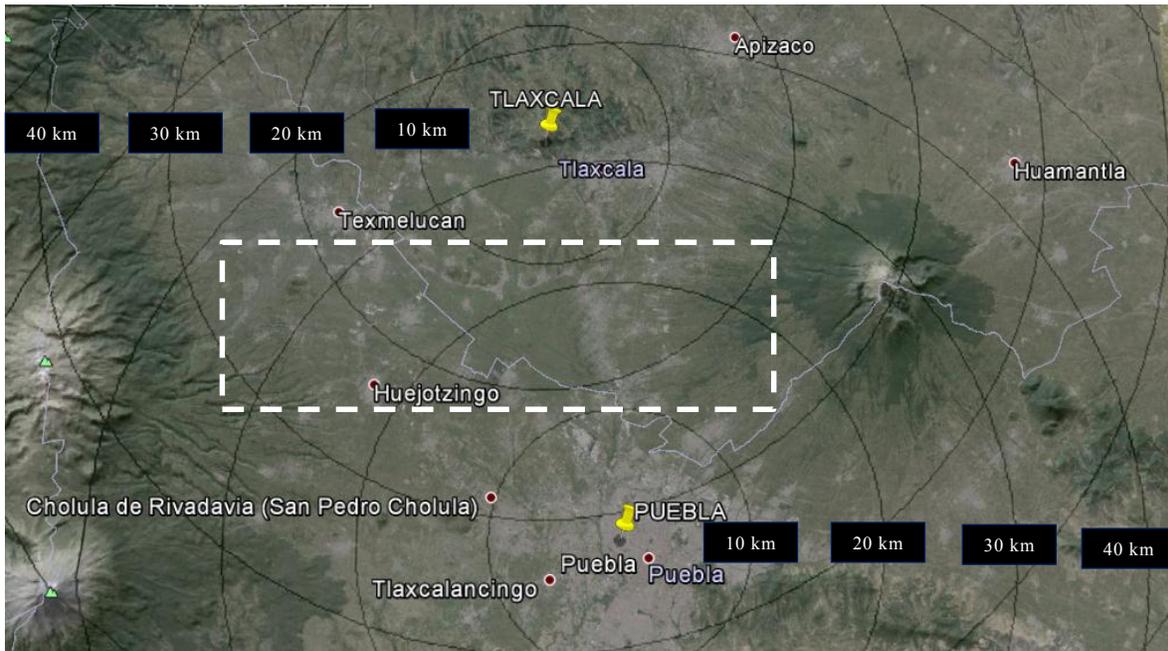


Figura 5.8 Zona de recepción crítica para la red SFN.

La zona de recepción crítica señalada en la figura 4.8 por el rectángulo de línea punteada, rodea localidades con un número de habitantes considerable, por lo que era de suma importancia asegurar que la red SFN no impidiera la correcta recepción en los hogares de este sector de la población. El área más poblada en esta zona está compuesta por los municipios de Zacatelco y Xicohtzinco que pertenecen al estado de Tlaxcala. En estos dos municipios se concentra la mayor parte de la población ubicada entre las ciudades de Puebla y Tlaxcala y componen una mancha urbana que se extiende unos 8 km.



Figura 5.9 Posición de las regiones pobladas de los municipios de Zacatelco y Xicohtzinco.

En la figura 5.9, los indicadores amarillos señalan las posiciones de las plantas transmisoras tanto de Puebla como de Tlaxcala. El centro de la mancha urbana compuesta por los pobladores de Zacatelco y Xicohtzinco, se encuentra a 16 km del sitio de transmisión de Tlaxcala y a 15.63 km de la planta transmisora de Puebla. En esta zona, los patrones de eco podrían tener 2 taps con potencias muy similares y con un retardo entre ellos que iría desde pocos microsegundos a algunas decenas de microsegundos. Esta situación podía ser perjudicial para la recepción de las señales de la televisora.

Se decidió poner en marcha la red SFN con ambos transmisores sincronizados para radiar la misma información al mismo tiempo, iniciar las mediciones de campo para observar el comportamiento del canal de propagación en la zona de recepción crítica y llevar a cabo las acciones necesarias para que la mayor parte de las zonas de cobertura de las estaciones de Puebla y Tlaxcala fueran cubiertas con una señal que los receptores comunes pudieran demodular y decodificar correctamente.

6 MEDICIONES DE CAMPO EN LA RED SFN PUEBLA-TLAXCALA

6.1 Equipo utilizado y procedimiento de medida

Las pruebas de campo se llevaron a cabo durante los días 10 y 11 de diciembre de 2015. El equipo utilizado fue el siguiente:

- Analizador de señales de televisión marca Rohde & Schwarz modelo ETL.
- Televisor ATSC marca etk modelo LEKT728.
- Adaptador de corriente marca etk de 100-240 Vac a 12 Vcc.
- Antena de varilla de 13.5 cm de longitud para recepción omnidireccional en interiores o exteriores marca etk con una impedancia de 75 Ω .
- Inversor de corriente de 12 Vcc a 110 Vac marca Steren modelo INV-1000.
- Batería de 12 V y 400 A, marca LTH modelo L-NS40-320.

En las redes SFN es muy importante el tipo de antena utilizada en la recepción. Por ejemplo, en una red donde participan dos transmisores y se usa una antena omnidireccional en el receptor, la potencia de las señales que arriban a la posición del mismo dependerá solo de la posición geográfica. De otro modo, si utilizamos antenas aéreas direccionales y las dirigimos hacia alguno de los dos transmisores, estamos facilitando que la potencia recibida de la señal del transmisor al que se ha apuntado la antena sea mayor a la potencia de la señal recibida procedente del otro transmisor, lo cual, en determinados casos puede ser la diferencia entre poder y no poder decodificar correctamente el audio y el video. Sin embargo, gran parte de la población está acostumbrada a usar antenas no direccionales como las antenas de conejo o las antenas de varilla, por lo que es complicado convencerlos de que usen antenas aéreas con mejores ganancias, además de que esto implica una inversión que la mayor parte de la población no hace en regiones rurales y suburbanas.

Por tal motivo, se decidió hacer las pruebas de campo utilizando una antena omnidireccional que ayudara a visualizar lo que ocurría con un sistema de recepción que no ofreciera demasiadas ventajas. La antena se colocó en el toldo de una camioneta

marca Toyota modelo Avanza, a 1.7 m del suelo. El equipo fue transportado a bordo de la camioneta y las mediciones se llevaron a cabo en determinados puntos sin que el vehículo estuviera en movimiento.

El diagrama de conexiones fue el siguiente:

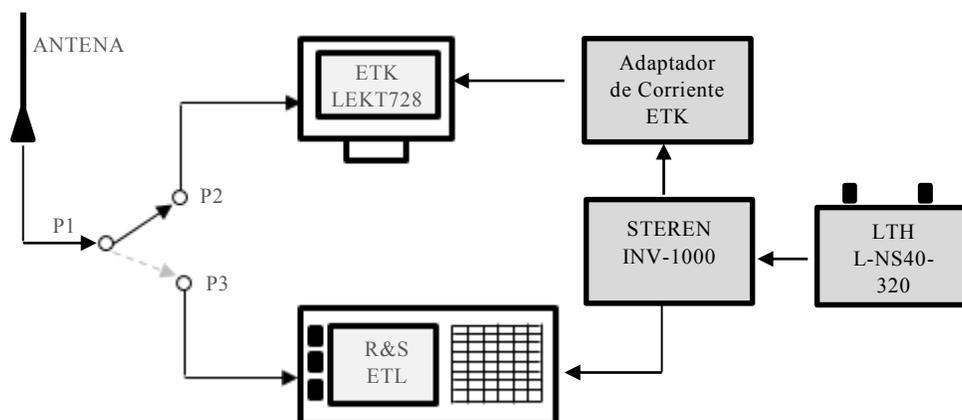


Figura 6.1 Diagrama de interconexión del equipo usado en las pruebas de campo.

La idea de realizar las pruebas de campo, fue evaluar la calidad de la señal de audio y video, así como observar el patrón de ecos en distintas zonas de la cobertura de la red SFN. El equipo Rohde & Schwarz ETL nos permitió llevar a cabo las dos tareas, puesto que es capaz de decodificar el audio y video de la señal que recibe, mostrar su espectrograma, la potencia de la señal recibida, diagrama de constelación, patrón de ojo, patrón de ecos y otras mediciones para analizar la calidad de las señales de televisión.

Para agilizar las mediciones, se decidió utilizar un receptor ATSC comercial, el cual solo serviría para monitorear si la señal de audio y video era decodificada en los puntos donde se llevaban a cabo las pruebas, mientras que el ETL sería el encargado de obtener el patrón de ecos en cada punto de medición además de otros datos importantes. Así, primero se revisaba si la televisión podía reproducir el video y el audio, se desconectaba la antena de la televisión y se conectaba directamente al ETL.

6.2 Mediciones

Para poder hacer un análisis completo del accionar de la red SFN, se eligieron 9 puntos distribuidos a lo largo de la ruta entre los sitios de transmisión de Tlaxcala y Puebla. Su ubicación se muestra en la figura 6.2. Nuevamente, los indicadores amarillos señalan la posición de las plantas transmisoras tanto de Puebla como de Tlaxcala.



Figura 6.2 Distribución de los puntos donde se llevaron a cabo las mediciones.

La información obtenida durante las mediciones se presenta con el objetivo de mostrar cómo varían las condiciones de recepción conforme la posición de la recepción cambia y también ayudan a demostrar si las predicciones realizadas acerca de cuál sería la zona de recepción crítica fueron ciertas. Es importante hacer notar que los puntos en donde se llevaron a cabo mediciones y que quedaron dentro de la zona de recepción crítica de acuerdo a las figuras 5.8 y 6.2 fueron el 4, 5, 6 y 7.

Los resultados obtenidos en cada punto, incluyen imágenes del patrón de ecos, espectrograma de la señal, potencia recibida, el M.E.R., si hay o no línea de vista directa

con las torres de transmisión de los sitios que participan en la red SFN y si la calidad del audio y video es buena o mala.

Desafortunadamente el equipo ETL solo es capaz de presentar ecos que no vayan más allá de $-18 \mu\text{s}$ o $+42 \mu\text{s}$ relativos al tap de mayor potencia, por lo que en los puntos cercanos a los sitios de transmisión, no fue posible registrar el grupo de ecos generados por el sitio de transmisión geográficamente más alejado. Sin embargo, si el grupo de ecos del sitio de transmisión más alejado fuera muy similar en potencia con relación al grupo generado por el sitio de transmisión más cercano, lo más probable era que la televisión no fuera capaz de mostrar ningún contenido, por lo que monitoreando la señal con el televisor, fue posible valorar lo que estaba sucediendo en los distintos puntos de prueba.

Para poder analizar de una manera más simple cómo va cambiando el patrón de ecos conforme el punto de medida cambia, se especifica la distancia entre cada punto y los sitios de transmisión, así como el retardo teórico esperado entre los dos taps de mayor potencia, los cuales fueron etiquetados con el nombre del sitio de transmisión que los está produciendo.

Los resultados obtenidos en cada uno de los 9 puntos fueron los siguientes:

Punto 1

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19°19'15.07"N	98°15'55.03"O	-56.2	32.2	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 1: 2.78 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 1: 29.51 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 9.26 μ s			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 98.36 μ s	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 89.1 μ s				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: Si			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.1 Mediciones en el punto 1.

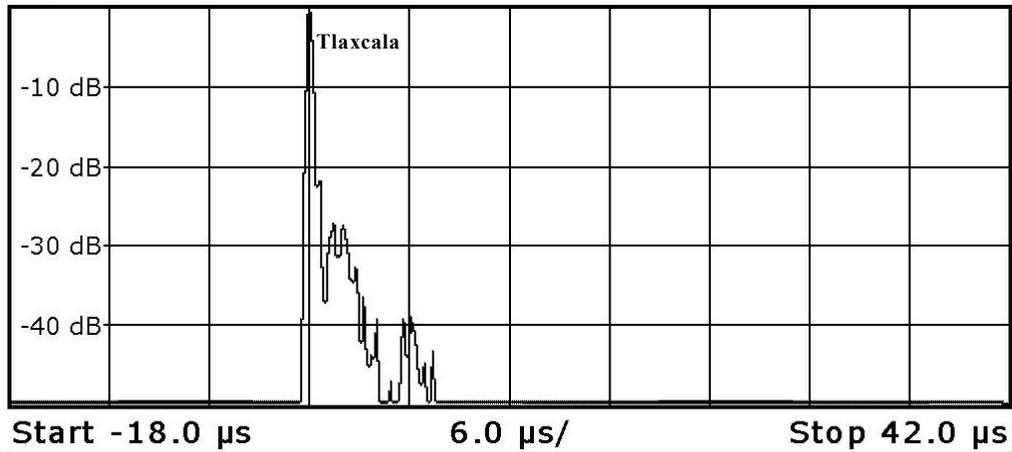


Figura 6.3 Patrón de eco en el punto 1.

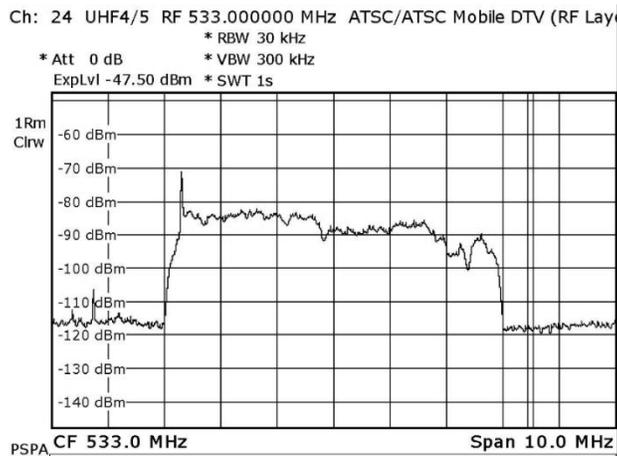


Figura 6.4 Espectro de la señal en el punto 1.

Punto 2

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19°17'23.96"N	98°14'59.00"O	-54.6	32.4	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 2: 6.51 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 2: 26.12 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 21.7 μ s			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 87.06 μ s	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 65.36 μ s				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: Si			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.2 Mediciones en el punto 2.

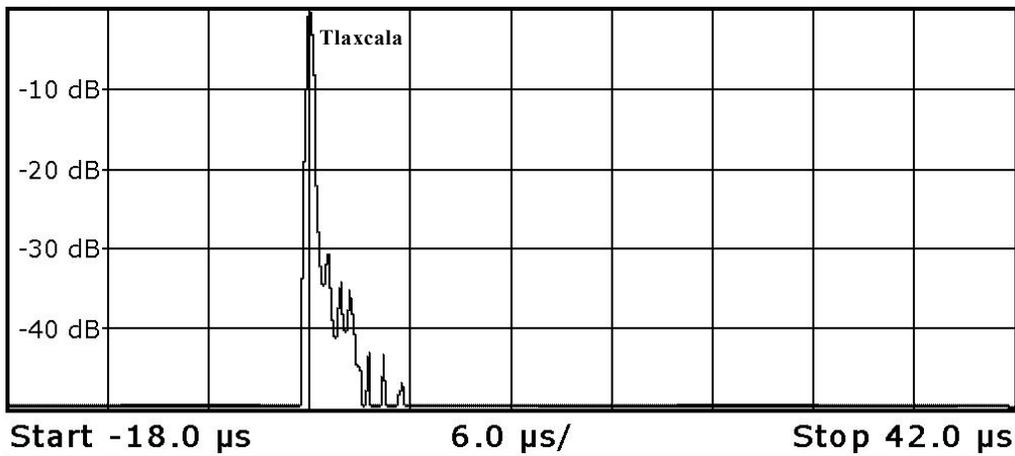


Figura 6.5 Patrón de eco en el punto 2.

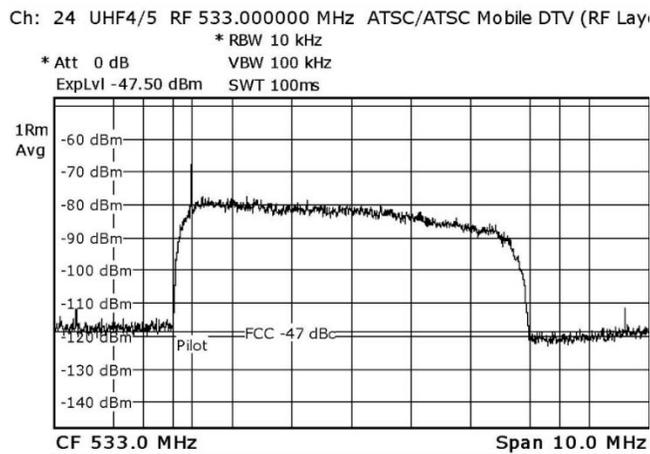


Figura 6.6 Espectro de la señal en el punto 2.

Punto 3

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19°15'25.34"N	98°13'46.58"O	-60.7	23.6	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 3: 10.75 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 3: 22.34 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 35.83 μs			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 74.46 μs	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 38.63 μs				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.3 Mediciones en el punto 3.

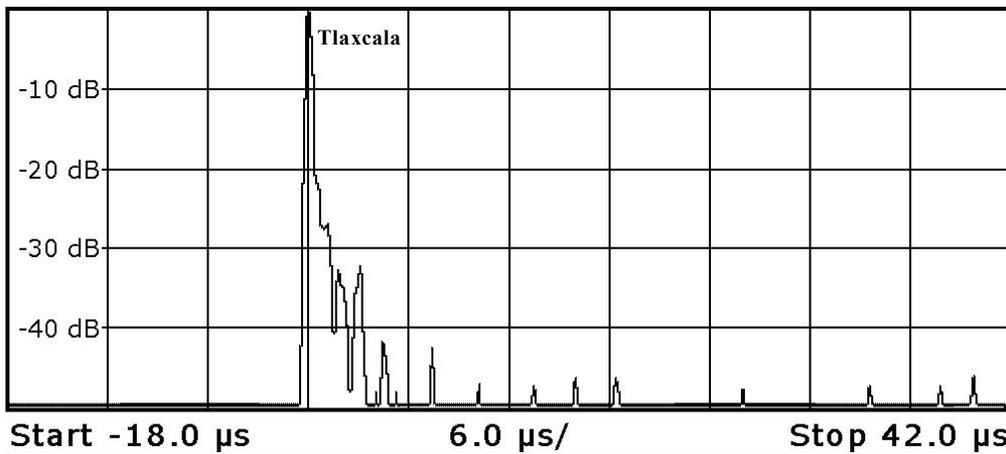


Figura 6.7 Patrón de eco en el punto 3.

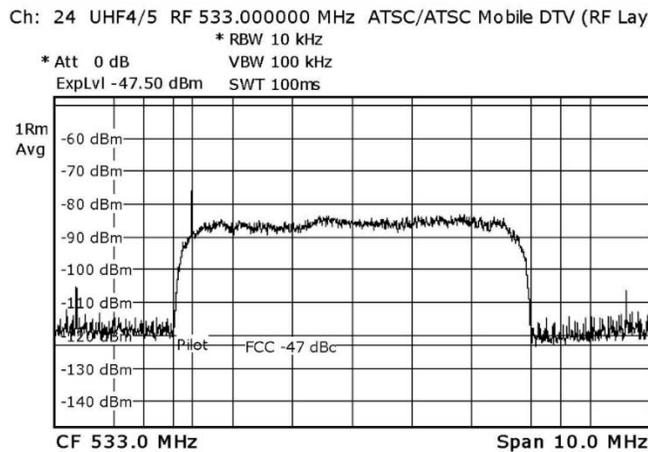


Figura 6.8 Espectro de la señal en el punto 3.

Punto 4

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19°14'4.35"N	98°14'35.89"O	-68.9	19.4	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 4: 12.44 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 4: 19.88 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 41.46 μs			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 66.26 μs	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 24.8 μs				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.4 Mediciones en el punto 4.

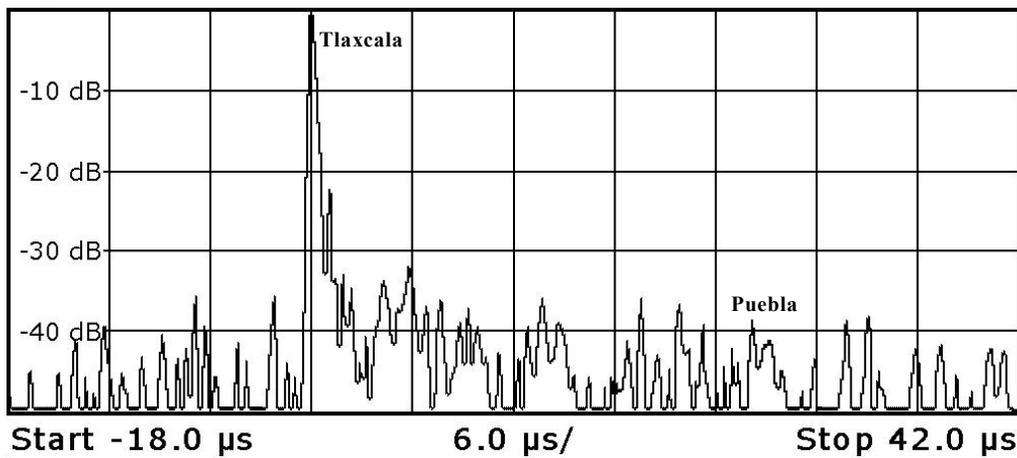


Figura 6.9 Patrón de eco en el punto 4.

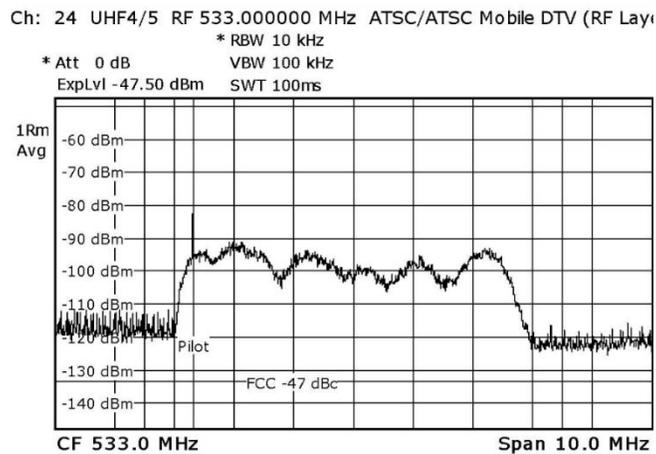


Figura 6.10 Espectro de la señal en el punto 4.

Punto 5

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19°12'23.26"N	98°14'25.41"O	-64.1	17.7	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 5: 15.46 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 5: 16.8 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 51.53 μs			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 56 μs	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 4.47 μs				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.5 Mediciones en el punto 5.

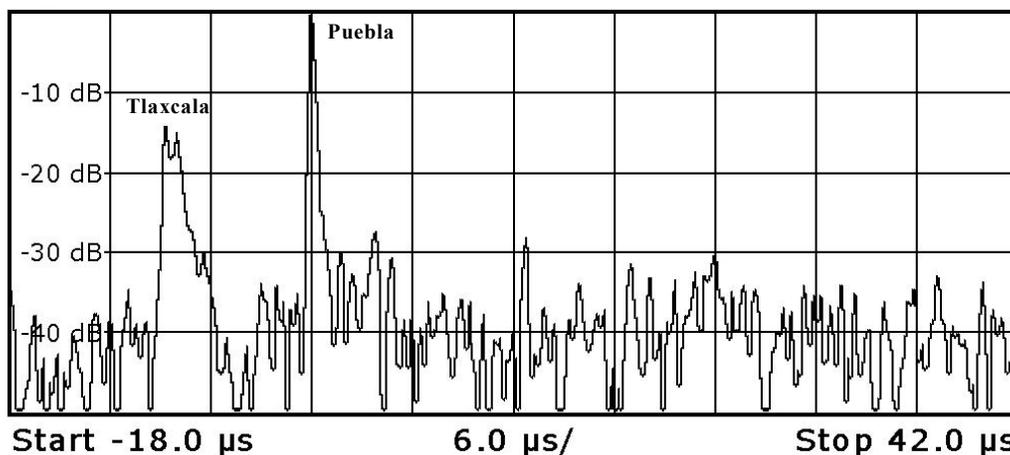


Figura 6.11 Patrón de eco en el punto 5.

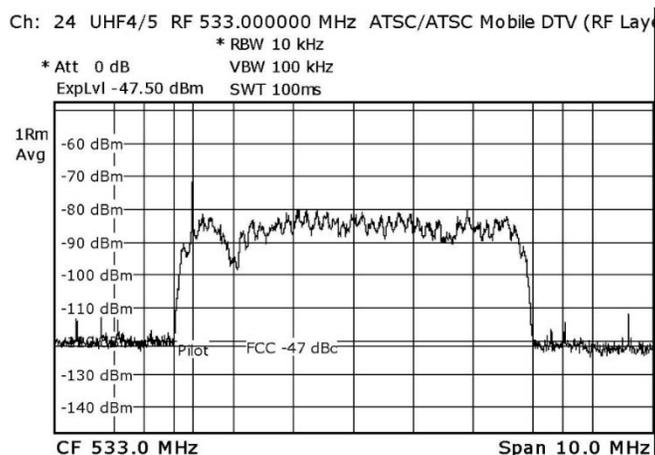


Figura 6.12 Espectro de la señal en el punto 5.

Punto 6

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19°10'31.31"N	98°14'1.67"O	-56.1	17.6	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 6: 18.96 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 6: 13.32 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 63.2 μ s			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 44.4 μ s	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 18.8 μ s				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.6 Mediciones en el punto 6.

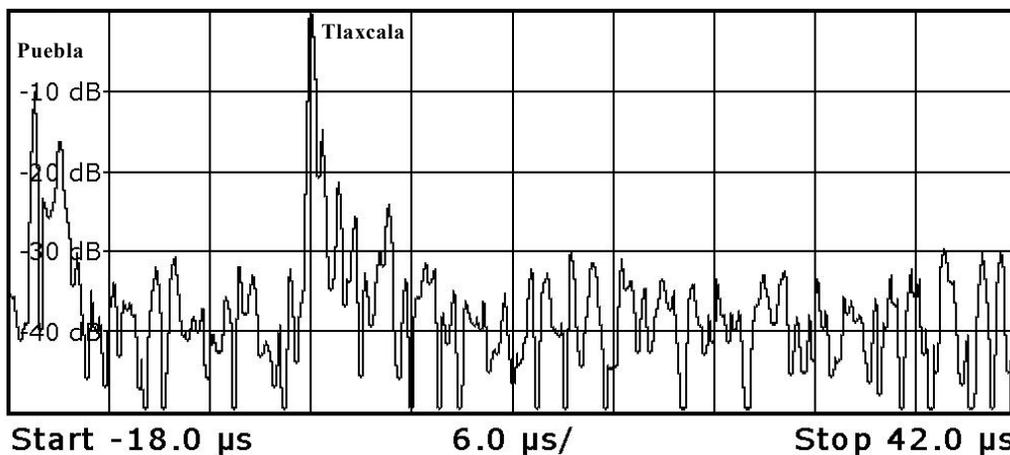


Figura 6.13 Patrón de eco en el punto 6.

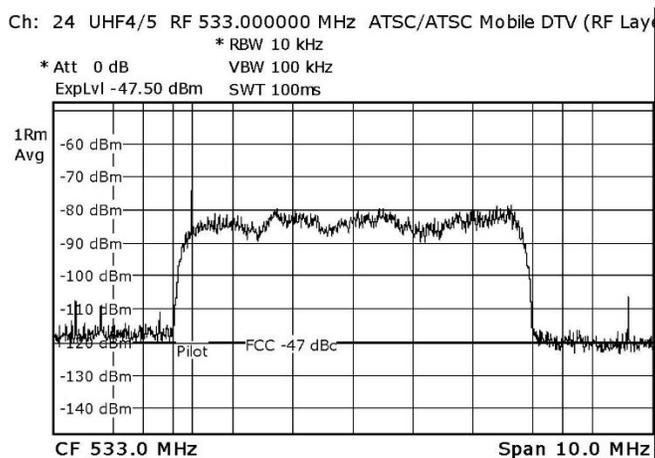


Figura 6.14 Espectro de la señal en el punto 6.

Punto 7

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19° 8'51.36"N	98°13'24.14"O	-46.6	24.6	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 7: 22.22 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 7: 10.21 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 74.06 μ s			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 34.03 μ s	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 40.03 μ s				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.7 Mediciones en el punto 7.

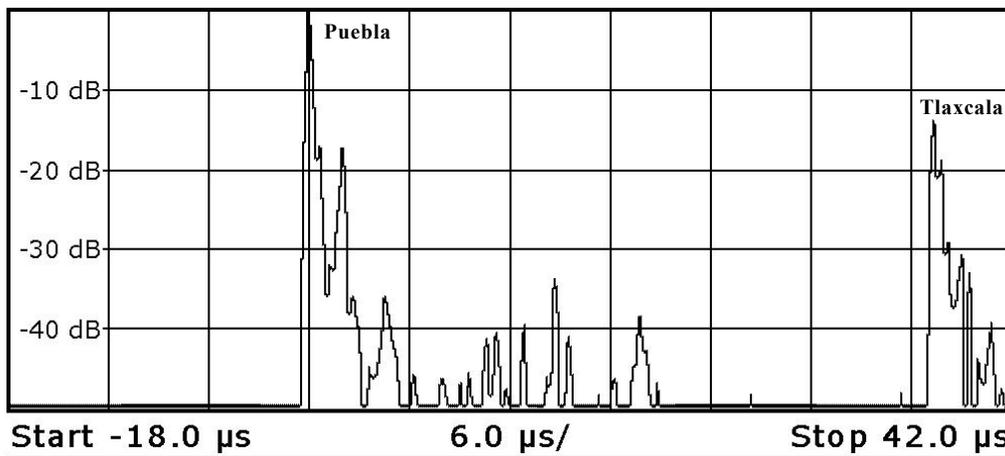


Figura 6.15 Patrón de eco en el punto 7.

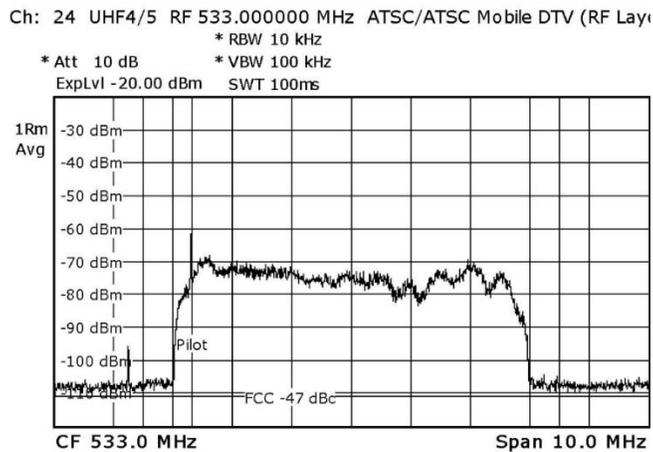


Figura 6.16 Espectro de la señal en el punto 7.

Punto 8

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19° 6'31.81"N	98°13'46.39"O	-58.6	17.7	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 8: 26.32 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 8: 5.94 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 87.73 μs			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 19.8 μs	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 67.93 μs				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.8 Mediciones en el punto 8.

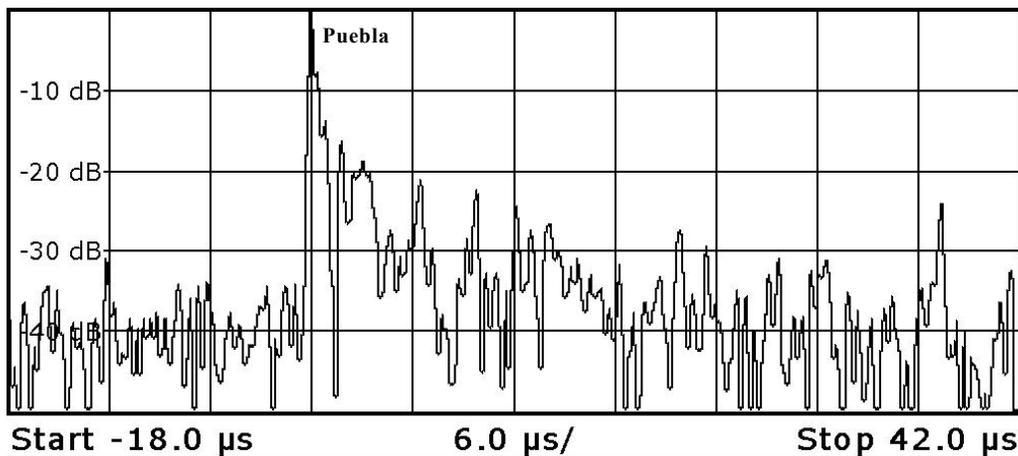


Figura 6.17 Patrón de eco en el punto 8.

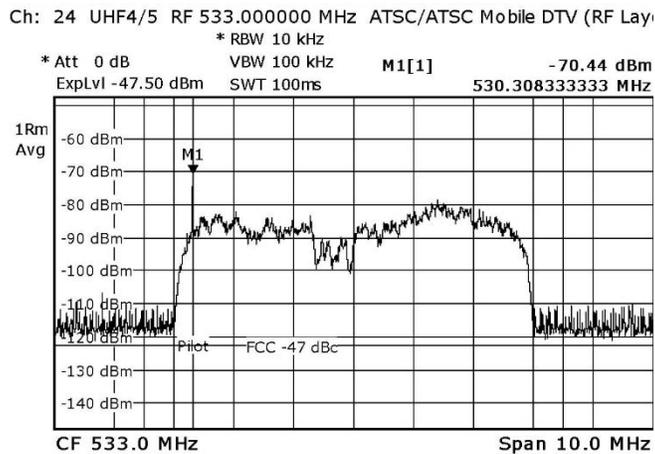


Figura 6.18 Espectro de la señal en el punto 8.

Punto 9

Posición		Potencia de la señal [dBm]	M.E.R. [dB]	Calidad de audio y video en el receptor de prueba
Latitud	Longitud			
19° 4'47.82"N	98°13'41.60"O	-39.6 dBm	20	Buena
Distancia entre el Sitio de Transmisión de Tlaxcala y el punto 9: 29.37 km			Distancia entre el Sitio de Transmisión de Puebla y el punto 9: 2.75 km	
Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Tlaxcala: 97.9 μ s			Tiempo de propagación aproximado desde el sitio de Puebla: 9.16 μ s	
Diferencia relativa aproximada esperada entre el grupo de ecos producido por ambos sitios de transmisión: 88.74 μ s				
Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala: No			Línea de Vista Directa hacia el sitio de transmisión de Puebla: No	

Tabla 6.9 Mediciones en el punto 9.

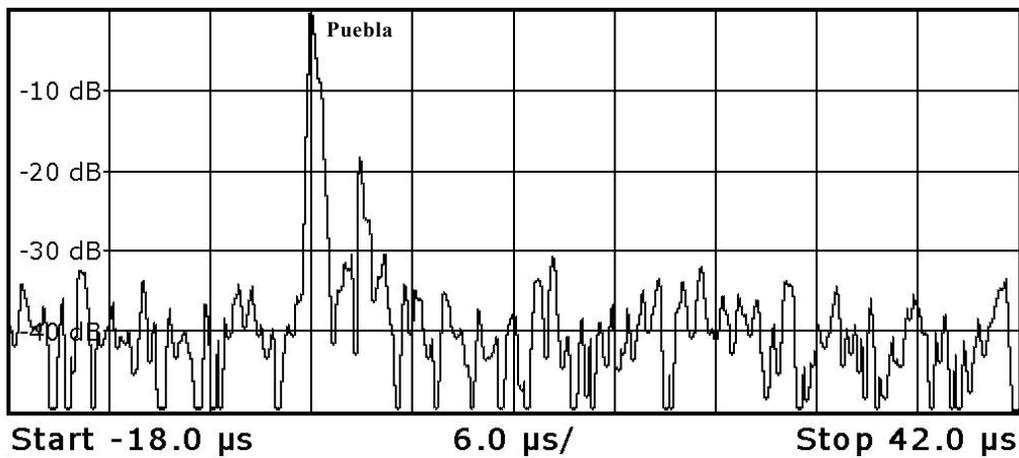


Figura 6.19 Patrón de eco en el punto 9.

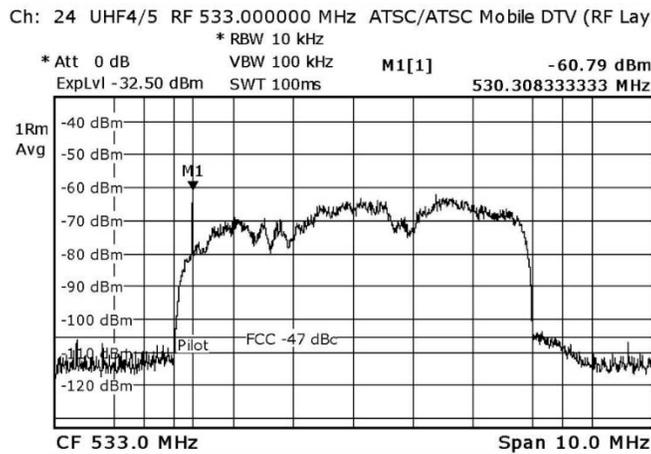


Figura 6.20 Espectro de la señal en el punto 9.

6.3 Análisis de resultados

Ahora que los resultados de las mediciones se han presentado, vale la pena hacer un análisis de los mismos.

Primeramente, cabe destacar que los 9 puntos de medida registraron una buena calidad en la señal de audio y video, con lo cual se pudo decretar que la red SFN estaba funcionando correctamente, al menos en la zona geográfica que más interesaba debido al número de pobladores de la misma. En los puntos en los que el ETL no fue capaz de presentar el grupo de ecos perteneciente al sitio de transmisión más alejado (1, 2, 8 y 9), también fue posible demodular y decodificar el contenido del programa de forma correcta, lo cual demuestra que la potencia de las señales transmitidas desde la ciudad de Puebla, llegaron con mucha atenuación a Tlaxcala y viceversa.

Se comentó que en la zona de recepción crítica, de acuerdo a las figuras 5.8 y 6.2, los puntos de medición 4, 5, 6 y 7 enfrentarían las peores condiciones de recepción de acuerdo a los estudios de cobertura realizados. Esto fue bastante acertado, ya que al observar los resultados de las mediciones, los puntos 5, 6 y 7 presentan ecos con potencias relativas considerables y en especial en el punto 7, se puede identificar un eco con un retardo de alrededor de 40 μ s y una diferencia en potencia respecto al tap de mayor potencia de 14 dB.

Los canales de propagación observados a lo largo de los 9 puntos en donde se llevaron a cabo las mediciones, dan la oportunidad de observar tres entornos de propagación dentro de la misma red SFN.

El primero de ellos está compuesto por las características de propagación encontradas en los puntos 1, 2 y 3, los cuales están ubicados en una zona rural llana, lo que provoca que el grupo de ecos que acompañan al tap de mayor potencia tenga un número de ecos muy pequeño y, además, la dispersión temporal entre ellos es mínima.

Los puntos 4, 5, 6, y 7 ya se encuentran ubicados en una zona suburbana con orografía poco accidentada y conforman el segundo entorno de propagación observado. En esta zona, más allá de que se encontraron las condiciones de recepción más complejas, se nota un aumento considerable en el número de ecos que arriban al

receptor, esto a causa de la existencia de una buena cantidad de construcciones que en su mayoría son de dos niveles y la existencia de algunos edificios y templos religiosos que se elevan sobre el promedio de altura de construcción en la zona. Esto provoca que los taps de los grupos de ecos producidos por las señales que arriban desde Tlaxcala y Puebla se empiecen a dispersar en el tiempo, desde algunos microsegundos hasta decenas de microsegundos. Sin embargo, los ecos que acompañan a los taps de mayor potencia, no son demasiado potentes como para generarle problemas graves al receptor.

Finalmente, los puntos 8 y 9 son muestras de cómo se comportan los canales de propagación en zonas urbanas asentadas en un terreno poco accidentado. Al analizar los patrones de ecos en estos puntos, es evidente que además de existir una gran cantidad de ecos arribando al receptor, los niveles de potencia de los mismos son mayores en comparación a lo que ocurría en la zona comprendida entre el punto 1 y el punto 7. Esto se debe a que en la ciudad de Puebla hay obstáculos de gran tamaño como edificios y distribuidores viales, entre otros, que además de dispersar los ecos en tiempo, son capaces de producir señales reflejadas con amplitudes considerables.

A pesar de la dispersión temporal de los ecos y las potencias de los mismos en los puntos 8 y 9, de ninguna manera se pueden comparar con los canales de propagación encontrados en la ciudad de Río de Janeiro presentados en la sección 4.3 de esta tesis. Aunque esta ciudad brasileña también es una zona urbana, la condición montañosa del terreno produce ecos más dispersos en el tiempo, generando entornos de propagación que son más difíciles de manejar para los receptores.

Una situación que se debe resaltar, es la existencia de canales de propagación con pre-ecos bastante fuertes en los puntos de medición 5 y 6. En el punto 5, a pesar de que el receptor se encontraba más cerca del sitio de transmisión de Tlaxcala, la señal proveniente de Puebla llegó con mayor amplitud. En el punto 6 sucede lo contrario, ya que a pesar de que el receptor ya se encontraba más cerca del sitio de transmisión de Puebla, la señal proveniente de Tlaxcala arribó con mayor potencia. En ambos casos, la causa de este comportamiento es la inexistencia de línea de vista directa hacia los sitios de transmisión de la red SFN.

Cuando no hay línea de vista directa, las señales arriban a los receptores atravesando obstáculos de diversos materiales o encontrando trayectorias alternativas a través de la reflexión, refracción o difracción de las ondas de radio. Cuando esto pasa, aunque la señal original no llegue tan retrasada al receptor, por lo general llega más atenuada, permitiendo la generación de canales de propagación muy variados en los cuales las potencias de los taps no varíen lógicamente tomando como única referencia la distancia que existe entre el receptor y los sitios de transmisión, puesto que los obstáculos en los alrededores próximos al receptor van a dictaminar el comportamiento del canal de propagación.

En algunos casos, la variación en la potencia de los taps a causa de la inexistencia de línea de vista directa hacia los sitios de transmisión, facilitará la labor de los receptores, sin embargo, generalmente la hace más compleja, por lo que es necesario dotar al sistema de recepción de mejores condiciones para que pueda dar mejores resultados.

Una de las posibles soluciones es el uso de antenas receptoras direccionales en lugar de antenas omnidireccionales, ya que a pesar de que no exista línea de vista directa, si se apunta la antena en la dirección del sitio de transmisión más cercano de la red SFN, generalmente se podrá obtener un patrón de ecos menos complejo.

Como muestra de este hecho, a continuación, se presentan unas mediciones tomadas en la población Nativitas del estado de Puebla. Al equipo de medición ETL se le conectó primeramente la antena omnidireccional usada para obtener las mediciones que se presentaron en la sección 6.2 y posteriormente se le conectó una antena direccional marca Steren modelo ANT-HD 100. Las coordenadas del punto en donde fueron tomadas las mediciones son:

Latitud: 19°13'44.08" N Longitud: 98°18'51.55" O

En la figura 6.21 se observa este punto con un indicador en rojo y las posiciones del sitio de transmisión de Puebla y Tlaxcala con indicadores en amarillo. En el punto de medición no existe línea de vista directa hacia ninguno de los transmisores de la red SFN, sin embargo, haciendo uso de una de una brújula, fue posible dirigir la antena

direccional hacia el sitio de transmisión de Tlaxcala. Tanto la antena direccional como la omnidireccional se colocaron a una altura de 1.7 m sobre el nivel del suelo. En las figuras 6.22 y 6.23 se muestra el patrón de eco conseguido con la antena omnidireccional y direccional respectivamente.



Figura 6.21 Posición del punto de medida en la población de Nativitas, Puebla.

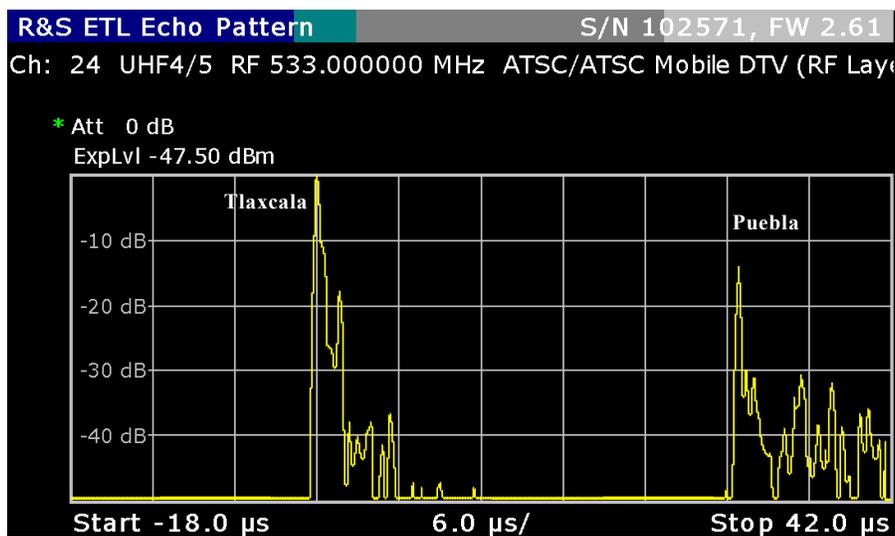


Figura 6.22 Patrón de eco en Nativitas con antena receptora omnidireccional.

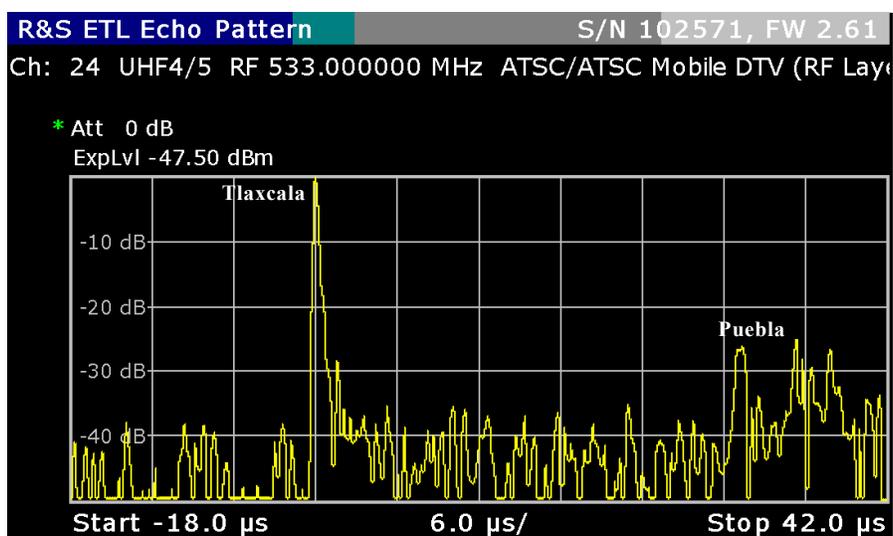


Figura 6.23 Patrón de eco en Nativitas con antena receptora direccional.

Al comparar el patrón de eco de la figura 6.22 y 6.23, es evidente el efecto de la ganancia de la antena directiva, ya que ahora el tap generado por el sitio de transmisión de Tlaxcala es aproximadamente 15 dB más grande que el tap generado por la señal que arriba desde Puebla. Un canal de propagación como el que representa el patrón de ecos de la figura 6.23 es mucho más fácil de manejar en el receptor que el presentado en la figura 6.22.

En el resto de los puntos de medida (1, 2, 3, 4, 7, 8 y 9), a pesar de que en la mayoría de ellos no fue posible tener línea de vista directa hacia los sitios de transmisión, el comportamiento del patrón de ecos del canal estuvo de acuerdo a lo esperado tomando como referencia las distancias entre el receptor y los sitios de transmisión.

Además de la potencia de las señales recibidas, en cada punto se presenta la medición del M.E.R. (Modulation Error Ratio). Esta medición nos proporciona la información de la calidad de señal en un punto determinado y tiene que ver con qué tan confinadas son las líneas del diagrama de constelación de las señales 8VSB. Esta medida generalmente se presenta en dB y está relacionada con la cantidad de bits en error (B.E.R.). Conforme mejor sea el M.E.R., la posibilidad de encontrar bits erróneos se reduce. A la salida del transmisor, se considera como una señal de calidad aquella que tiene un valor mayor o igual a 35 dB y naturalmente, el M.E.R va disminuyendo

conforme la señal viaja por el canal de propagación debido a factores como el ruido del canal, el multitrayecto y la atenuación.

De acuerdo a la figura 6.24, el M.E.R es bastante bueno en los puntos 1 y 2, es decir, en las periferias de la ciudad de Tlaxcala, en una zona rural muy cerca del sitio de transmisión de Tlaxcala; conforme el urbanismo se va haciendo más denso y los efectos de la red SFN se sienten con mayor fuerza, el M.E.R va decreciendo hasta que el receptor siente el efecto del transmisor de Puebla y comienza a mejorar pero no demasiado, puesto que los puntos 8 y 9, aunque se encuentran cerca del sitio de transmisión de Puebla, están dentro de una zona urbana y es visible un aumento en el multitrayecto debido a los obstáculos característicos de las ciudades.

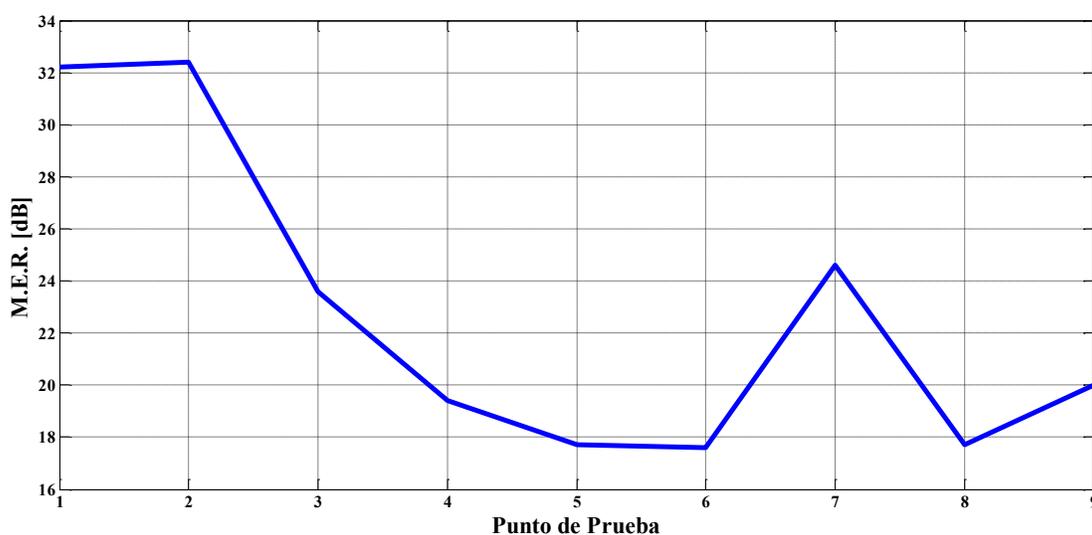


Figura 6.24 Gráfico del M.E.R.

El M.E.R. no está relacionado solamente con la potencia de la señal recibida, aunque generalmente los peores valores de M.E.R se encuentran en señales de muy bajo nivel de potencia, hay ocasiones en las cuales a través de la superposición de las señales que arriban desde distintos puntos al receptor, puede mejorar el M.E.R. Este es el caso de lo que sucede en el punto 7, donde a pesar de que el entorno de recepción no es sencillo, se registró un M.E.R. más alto comparado con los puntos vecinos. Todo depende del comportamiento dinámico de la señal recibida resultante, es decir, la

manera en la que se relacionan todas las fases y amplitudes de las componentes en frecuencia dentro del canal de 6 MHz (en el caso de ATSC) que arriban al receptor a través de trayectorias diferentes.

En la figura 6.25 se presenta la gráfica del comportamiento de la potencia recibida a lo largo de los 9 puntos de medida y se puede apreciar una de las ventajas de las redes SFN. En redes MFN, la potencia disminuye conforme el receptor se aleja del sitio de transmisión. En las zonas de cobertura de las redes SFN esto no ocurre, ya que es posible mantener niveles de campo eléctrico adecuados para que los receptores puedan recuperar el audio y el video, gracias a la superposición de las señales provenientes de todos los sitios de transmisión que participan en la red SFN. Esta es la razón por la que se dice que una red SFN compuesta por varios transmisores distribuidos de baja potencia, puede cubrir las zonas de servicio con mejores niveles de campo eléctrico en comparación a lo que sucede cuando solo está operando un transmisor de alta potencia.

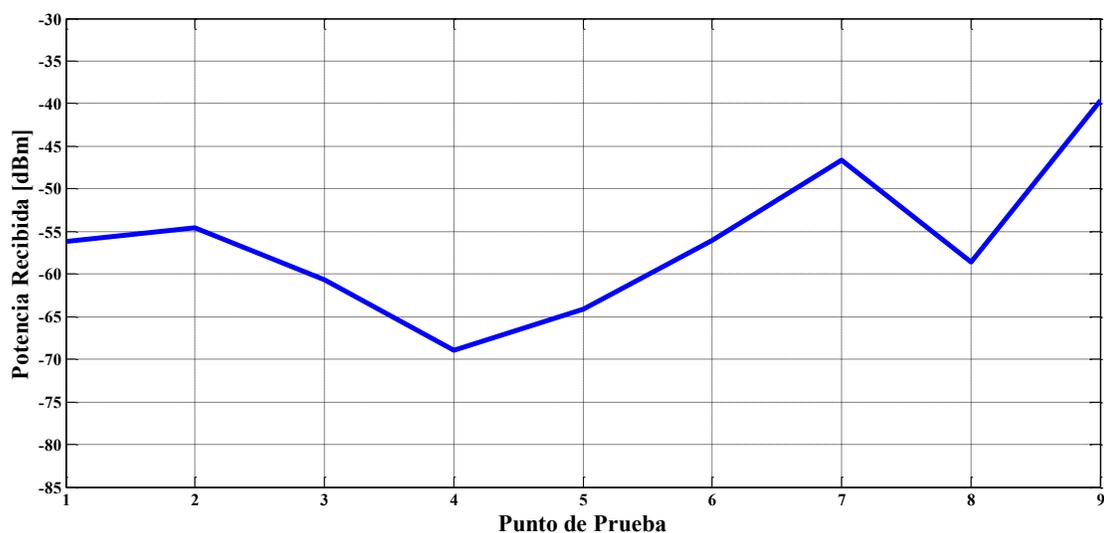


Figura 6.25 Gráfico de Potencia Recibida.

Finalmente, los espectrogramas presentados en la sección 6.2, permiten observar la relación que existe entre el patrón de ecos del canal y la afectación de la señal que llega al receptor. Es interesante ver como la calidad del espectro de la señal recibida se va deteriorando conforme los efectos de la red SFN y del urbanismo son más notorios.

Por ejemplo, en el espectro de la señal recibida en los puntos 1, 2 y 3, apenas son notorias las afectaciones, mientras que a partir del punto 4, la situación cambia y los espectros de la señal recibida correspondientes denotan afectaciones más graves.

7 NUEVOS CANALES DE PROPAGACIÓN PARA TDT EN RECEPCIÓN FIJA

En el capítulo 4, se han presentado diversos canales de propagación que nos pueden ayudar a simular una red SFN en entornos distintos tales como regiones montañosas, llanas, urbanas, rurales, etc. La mayoría de estos canales de propagación, han sido resultado del procesamiento de la información obtenida en pruebas de campo.

Así mismo, es posible definir canales de propagación para redes SFN tomando como base los canales definidos para redes MFN y replicando el patrón de ecos con una cierta distancia temporal n veces, siendo n la cantidad de transmisores que participan en la red. Sabiendo que el tiempo entre cada grupo de ecos depende de la posición de los transmisores en la red SFN que se quiere simular y el lugar en donde se colocaría el receptor a prueba. Ciertamente este enfoque solo es experimental y puede usarse para saber qué tan buenos son los receptores a prueba enfrentando entornos de recepción críticos.

Para llevar a cabo la definición de los canales de propagación presentados en este trabajo, se tomaron como base las mediciones de campo presentadas en el capítulo 6.

7.1 Definición

En esta sección se definen 2 nuevos perfiles de retardo que pueden ser utilizados para la simulación de redes SFN de 2 transmisores en recepción fija con antena para exteriores, en una zona suburbana, con una orografía poco accidentada y sin grandes obstáculos en los alrededores.

La razón por la cual se decidió definir dos perfiles de retardo, es porque dadas las condiciones de propagación en las redes SFN que fueron instaladas para dar servicio a las ciudades de Puebla, Tlaxcala y localidades vecinas, se tuvo la oportunidad de observar patrones con pre-ecos y post-ecos en niveles de potencia destacables. Al tener dos perfiles de retardo, uno para un canal de propagación con pre-eco y otro para un canal de propagación con post-eco, se brinda la oportunidad de simular entornos de

propagación reales en el laboratorio y observar el comportamiento de los receptores bajo prueba ante este tipo de señales.

El procedimiento para obtener ambos perfiles de retardo, consistió en sintetizar las mediciones del patrón de eco en los puntos 6 y 7, mostrados en las figuras 6.13 y 6.15 respectivamente, definiendo un umbral de -30 dB respecto al tap de mayor amplitud para filtrar el ruido de la medición, tal como se propone en [NOVEL, 2006]. Todos los ecos que sobresalieran de este umbral, fueron tomados como un tap independiente. Se consideraron estos dos puntos de medida como referencia porque son los que representan los entornos de recepción más complicados captados con el equipo de medición.

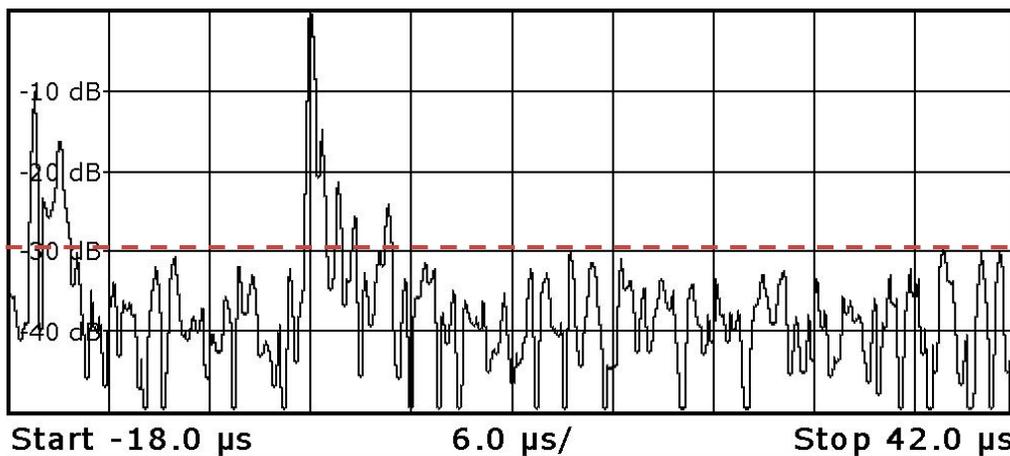


Figura 7.1 Definición de umbral de discriminación para el canal de propagación con pre-eco.

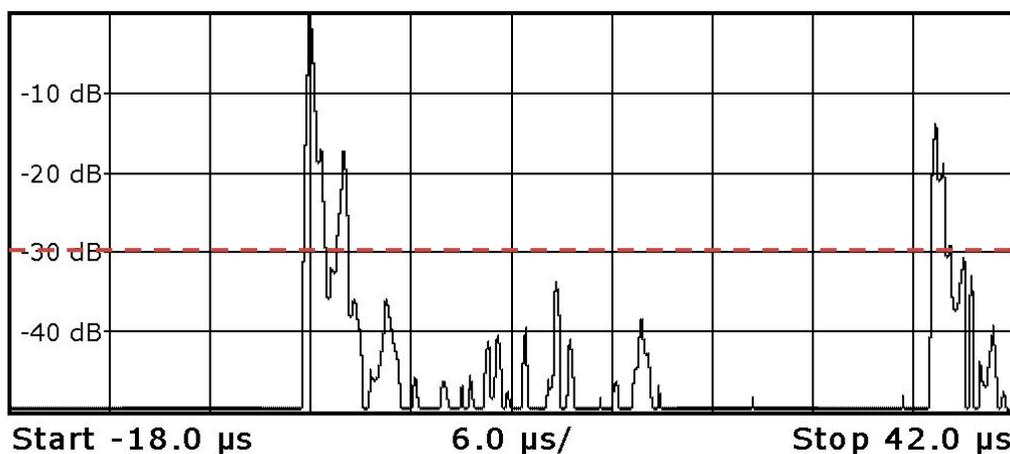


Figura 7.2 Definición de umbral de discriminación para el canal de propagación con post-eco.

Adicionalmente, en cada uno de los taps que conforman los perfiles de retardo definidos, se especifica la distribución de probabilidad que mejor modela la variación de su potencia, tomando como base la existencia o no existencia de línea de vista directa hacia los transmisores de la red SFN.

En los puntos 6 y 7, no fue posible mantener contacto visual con las torres de transmisión tanto del sitio de Puebla como de Tlaxcala, por lo que es posible predecir que la variación de la potencia debido a las fluctuaciones rápidas de los taps que arribaron al receptor estuvo acorde a la distribución de probabilidad Rayleigh. Es importante mencionar que si en lugar de colocar la antena receptora a 1.7 metros del suelo, se hubiera colocado en la azotea de una vivienda de dos pisos, es probable que se pudiera encontrar línea de vista directa con alguno de los dos sitios de transmisión de la red SFN o incluso, con ambos. Al hacerlo, la variación de potencia debido al fading rápido de por lo menos el tap de mayor potencia, seguiría la distribución de probabilidad Rice, lo cual amortiguaría las variaciones de potencia del resto de los ecos y se facilita la labor del receptor. Cuando todos los taps del patrón de eco de un canal de propagación varían respecto a la distribución Rayleigh, el resultado puede dificultar en gran medida el accionar del receptor, sobre todo en redes SFN. De ahí la importancia de que las personas que tratan de captar la señal televisiva dentro de la zona de cobertura de una red SFN, tengan que hacer lo posible por dotar a sus receptores de las mejores condiciones de recepción que estén a su alcance, como el uso de antenas aéreas instaladas sobre mástiles en lugar de antenas para interiores.

En el caso de los canales de propagación definidos en esta sección, se sugiere que todos los taps se simulen teniendo en cuenta una variación de su potencia de acuerdo a la distribución de probabilidad Rayleigh, para representar de forma fidedigna lo que sucedió en la realidad y someter a los receptores ante el peor de los casos que se pudo observar durante las pruebas de campo.

Los perfiles de retardo obtenidos, se presentan a continuación:

7.1.1 Perfil con pre-eco para recepción fija en una zona sub-urbana

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)	Fading rápido
1	0	-10.1	Rayleigh
2	0.2	-23.75	Rayleigh
3	1.4	-16.25	Rayleigh
4	16.4	0	Rayleigh
5	17.0	-15	Rayleigh
6	17.9	-21.25	Rayleigh
7	18.8	-25.62	Rayleigh
8	20.96	-23.87	Rayleigh

Tabla 7.1 Perfil con pre-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.

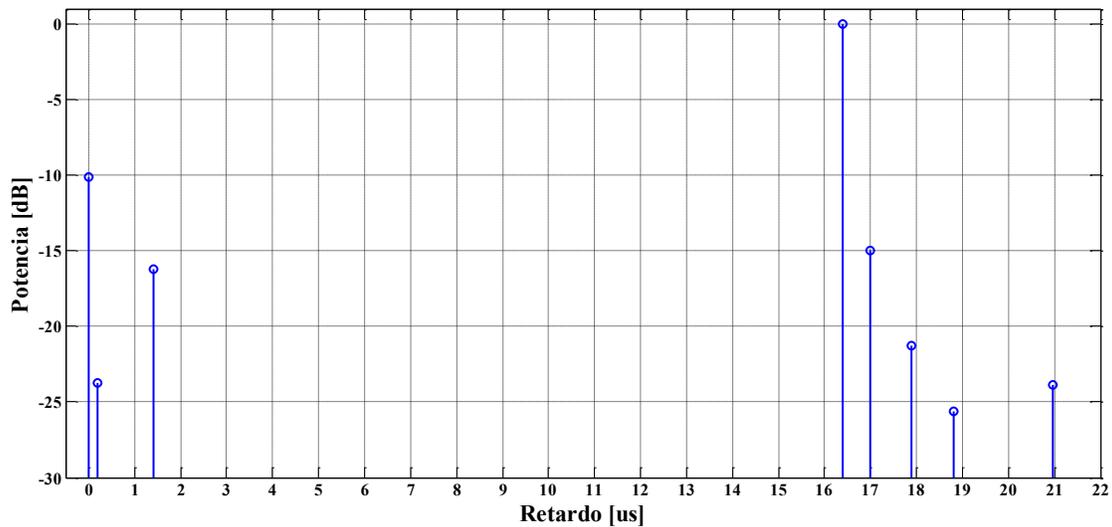


Figura 7.3 Perfil con pre-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.

7.1.2 Perfil con post-eco para recepción fija en una zona sub-urbana

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)	Fading rápido
1	0	0	Rayleigh
2	0.6	-17.5	Rayleigh
3	1.8	-17.5	Rayleigh
4	37.2	-13.75	Rayleigh
5	37.8	-18.75	Rayleigh
6	38.1	-29.37	Rayleigh

Tabla 7.2 Perfil con post-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.

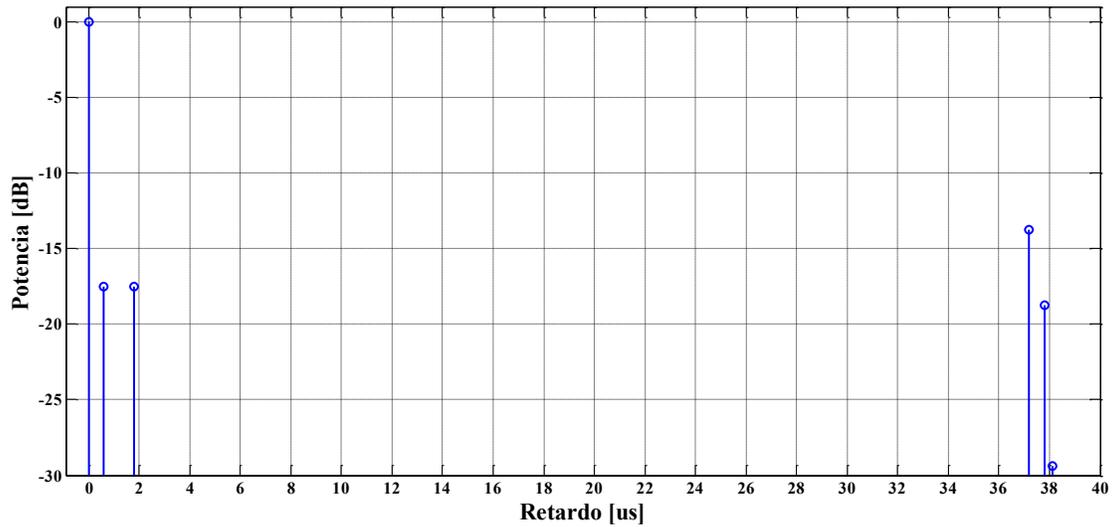


Figura 7.4 Perfil con post-eco para recepción fija en una zona sub-urbana sin línea de vista directa.

7.1.3 Consideraciones acerca de los canales de propagación definidos

Usando los canales de propagación presentados en el capítulo 4, es posible hacer una serie de comparaciones que ayudan a encontrar diferencias y similitudes entre éstos y los canales de propagación definidos en este capítulo. Por otro lado, es muy importante destacar las aportaciones de estos dos nuevos canales de propagación al catálogo presentado en el capítulo 4.

De acuerdo a las mediciones de campo presentadas en la sección 6.2, los canales de propagación definidos con base en condiciones generadas por redes SFN reales como los presentados desde la tabla 4.9 y hasta la tabla 4.16, así como los dos canales de propagación definidos en este capítulo, se puede notar que las redes SFN no generan taps independientes como suponen el canal de propagación definido en el proyecto AC318 Motivate de la sección 4.1 (tabla 4.3) y el canal Brasil E de la sección 4.2 (tabla 4.8). Ambos, como ya se ha comentado, solo representan condiciones de propagación teóricas.

El canal de propagación Brasil A, definido en la tabla 4.4 de la sección 4.2, se dijo que ayudaba a representar la recepción en una posición fija con antena externa en una zona llana y con pocos obstáculos grandes en los alrededores, tal como ocurre en la zona entre las ciudades de Tlaxcala y Puebla. Si se observa el segundo grupo de ecos del canal de propagación definido en la tabla 7.1 y los ecos definidos en el canal Brasil A, se nota un gran parecido en la dispersión temporal de los ecos y las potencias de los mismos. El segundo grupo de ecos de la tabla 7.1 es generado por solo uno de los dos transmisores de la red SFN, por lo que, si apagamos el otro transmisor, nos daríamos cuenta que el canal Brasil A sí representaría de buena manera los canales de propagación que existen en zonas llanas para redes MFN. De esta manera, se comprueba que el canal Brasil A, puede ser utilizado para simular, de forma aproximada, los entornos de propagación de redes SFN que pudieran darse en zonas suburbanas con terreno poco accidentado si se replica el patrón de ecos como diferentes grupos separados temporalmente. El número de grupos, dependerá de la cantidad de transmisores con los

que trabaje la red SFN. En la tabla 7.3 y figura 7.5 se da un ejemplo de lo antes descrito en el caso de que la red SFN opere con dos transmisores.

Número de Tap	Retardo (μs)	Potencia (dB)
1	0.0	0
2	0.15	-13.8
3	2.22	-16.2
4	3.05	-14.9
5	5.86	-13.6
6	5.93	-16.4
7	16.4	0
8	16.55	-13.8
9	18.62	-16.2
10	19.45	-14.9
11	22.26	-13.6
12	22.33	-16.4

Tabla 7.3 Canal de Propagación en una red SFN de 2 transmisores usando como base el Canal Brasil A.

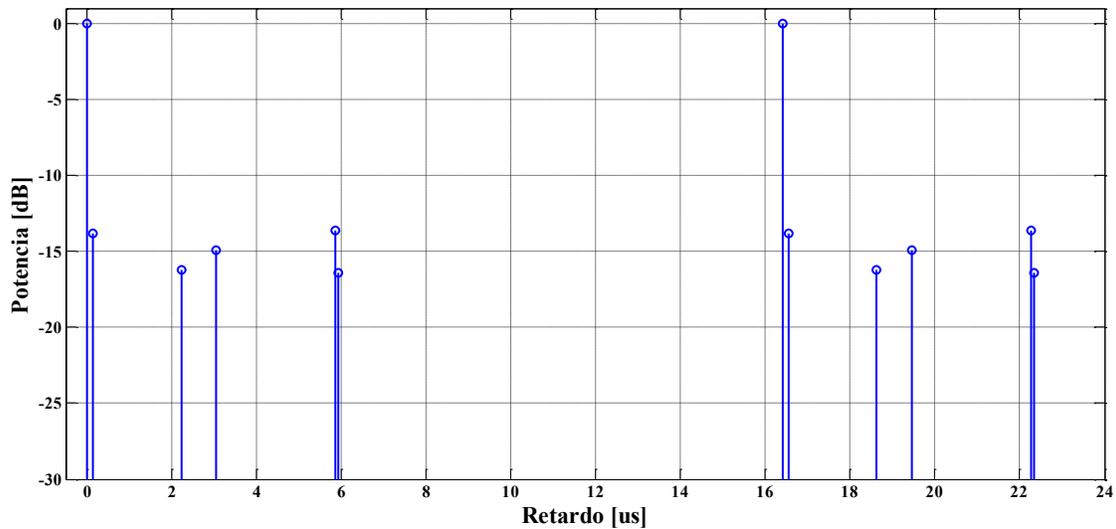


Figura 7.5 Canal de Propagación en una red SFN de 2 transmisores usando como base el Canal Brasil A.

El canal de propagación definido en la tabla 7.3 tiene dos grupos de ecos, ambos basados en el canal Brasil A y con una separación temporal de alrededor de 10 μs . Aunque este canal de propagación se definió sin estar basado en una situación real, por

lo ya explicado, podemos estar seguros de que sí puede simular un entorno de propagación que se aproxima mucho a lo que puede darse en la realidad en zonas suburbanas con orografías poco accidentadas.

Por otro lado, la zona en donde fueron realizadas las pruebas de campo presentadas en el capítulo 6, se asemeja en buena medida a las condiciones ambientales que existen entre las ciudades chinas de Zhengzhou y Kaifeng. Si se observa el canal de propagación definido en la tabla 4.9 de la sección 4.3 y se compara con el definido en la tabla 7.2, se hace evidente un gran parecido entre ambos, en cuanto a la relación de potencias de los taps en cada uno de los dos grupos de ecos. La principal diferencia es que la separación temporal entre los grupos de ecos en el canal de propagación de la tabla 7.2 es mayor. Sin embargo, la dispersión temporal de los ecos dentro de cada grupo, es muy similar.

Esto comprueba que tanto el canal de propagación definido en la tabla 7.2 como el de la red SFN de Zhengzhou-Kaifeng, representan de buena manera los entornos de propagación que se dan con estas redes de transmisión en zonas suburbanas con orografías poco accidentadas.

Ninguno de los canales de propagación definidos en este capítulo puede ser utilizado para simular las condiciones de propagación de una red SFN que opera en una zona montañosa o una zona de urbanismo denso, puesto que la dispersión temporal de los taps que conforman cada grupo de ecos, así como sus potencias relativas, no generan condiciones de propagación tan severas en comparación a lo que ocurre en canales de propagación como el definido en la tabla 4.12 de la sección 4.3 para la ciudad de Río de Janeiro.

Los dos nuevos canales de propagación presentados en las tablas 7.1 y 7.2, además de incrementar las opciones de simulación para aquellos interesados en representar los entornos de propagación de una red SFN, tienen algunas características que merecen ser destacadas, como:

- Su definición se basó en señales reales obtenidas con un sistema de recepción que se asemeja mucho al usado por la mayoría de los pobladores de zonas rurales y suburbanas.
- El canal de propagación definido en la tabla 7.1 presenta la mayor dispersión temporal de un grupo de pre-ecos, en comparación con cualquiera de los canales de propagación presentados en el capítulo 4.
- El canal de propagación definido en la tabla 7.2 presenta la mayor dispersión temporal de un grupo de post-ecos, en comparación con cualquiera de los canales de propagación presentados en el capítulo 4.

7.2 Simulación de los nuevos canales de propagación

Para investigar qué tan difícil es manejar los dos canales de propagación definidos en este trabajo para receptores comerciales, se llevaron a cabo una serie de simulaciones utilizando el equipo del laboratorio del proyecto REFUTV “Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC” en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para hacer las simulaciones se hizo uso del siguiente equipo:

- Generador de señales de televisión digital bajo el estándar ATSC marca Rohde & Schwarz modelo SFE Broadcast Tester, con capacidad de generar fading con 12 trayectorias distintas agrupadas en dos grupos compuestos por 6 trayectorias cada uno. A cada trayectoria se le puede definir un tiempo de retardo y una atenuación relativa al tap de mayor potencia, así como la distribución de probabilidad que mejor modela las fluctuaciones rápidas de cada tap.
- Televisor ATSC marca etk modelo LEKT728.
- Televisor ATSC marca ATVIO modelo ATV0714LCD.

El diagrama de conexiones se muestra en la figura 7.6. Se usaron dos televisores para observar las diferencias en el desempeño de los mismos ante los dos canales de propagación simulados.



Figura 7.6 Diagrama de conexiones del equipo utilizado en las simulaciones.

Para saber qué tan difícil resulta para los receptores manejar estos dos canales, se buscaron los umbrales de recepción de los receptores en función de la relación C/N en la entrada del receptor usando una potencia de señal recibida de -28 dBm, que ATSC considera como una señal de muy buena intensidad [ATSC, 2010]. Al identificar estos umbrales, es posible notar cuál de los canales de propagación simulados complica más el accionar de los receptores, sabiendo que entre mejor relación C/N necesite el televisor para poder reproducir el audio y el video sin errores, el entorno de propagación es más complejo.

El procedimiento que se siguió para realizar la simulación de los canales de propagación definidos en las tablas 7.1 y 7.2 se explica a continuación:

1. En el generador, el canal de radiofrecuencia se configuró en el canal 24 (530-536 MHz).
2. Así mismo, la potencia de la señal de salida se fijó en -28 dBm.
3. Se introdujo al generador la información del perfil con pre-eco para recepción fija en una zona suburbana (tabla 7.1).
4. La relación C/N se estableció en 35 dB y se hicieron decrementos en pasos de 5 dB hasta el valor en donde el televisor no fuera capaz de decodificar ni el audio ni el video sin errores.
5. Después, se introducía el último valor de C/N en donde el televisor era capaz de mostrar el audio y el video sin errores y se empezaban a hacer decrementos con pasos de 1 dB.

6. Al llegar al valor en el que la televisión no era capaz de mostrar el contenido del programa sin errores, se introducía el valor inmediatamente anterior al último decremento y se comenzaban a hacer decrementos con pasos de 0.1 dB para encontrar el umbral de recepción. El criterio para determinar cuál era el umbral de recepción, fue aquel valor de C/N en el cual se presentaban al menos 2 errores, en el audio o en el video, en un periodo de 1 minuto.
7. En el generador SFE, se introdujo la información del perfil con post-eco para recepción fija en una zona suburbana (tabla 7.2).
8. Se repitieron los procesos descritos desde el punto 4 hasta el punto 6.

Estos 8 pasos, se llevaron a cabo en dos ocasiones, la primera vez usando el televisor marca etk modelo LEKT728 y la segunda, utilizando el televisor marca ATVIO modelo ATV0714LCD.

Los resultados de los umbrales de recepción de acuerdo a la relación C/N se presentan a continuación:

Potencia Recibida = -28 dBm Canal: 24 (530-536 MHz)	
Receptor	C/N mínima necesaria para recibir sin errores
etk modelo LEKT728	23.8 dB
ATVIO modelo ATV0714LCD	23.2 dB

Tabla 7.4 Umbrales de recepción para el perfil con pre-eco definido en la tabla 7.1.

Potencia Recibida = -28 dBm Canal: 24 (530-536 MHz)	
Receptor	C/N mínima necesaria para recibir sin errores
etk modelo LEKT728	22.0 dB
ATVIO modelo ATV0714LCD	22.4 dB

Tabla 7.5 Umbrales de recepción para el perfil con post-eco definido en la tabla 7.2.

Los resultados presentados en la tabla 7.4 y 7.5 muestran como los receptores de ATSC son más sensibles a los pre-ecos que a los post-ecos y, por tanto, necesitan de una

mejor relación C/N para ser capaces de decodificar el audio y el video de la señal de televisión sin errores. Al comparar el desempeño de los receptores, no fue posible encontrar diferencias muy notorias.

Aunque los umbrales obtenidos son similares tanto para el perfil con pre-ecos como para el perfil con post-ecos, hay que recordar que el perfil con post-ecos representa un canal de propagación en el cual la dispersión temporal entre los dos grupos de ecos que lo conforman es de alrededor de 35.4 μ s, mientras que el perfil con pre-eco, representa un canal en el cual los dos grupos de ecos están separados temporalmente por 15 μ s. Si usamos como base el mismo perfil con pre-eco y vamos separando cada vez más los dos grupos de ecos, naturalmente la relación C/N necesaria para reproducir el audio y el video sin errores, tendrá que ir creciendo. Cuando la separación entre los grupos de ecos llegue a ser de 35.4 μ s, al hacer una comparación entre los umbrales de recepción del perfil con pre-ecos y el perfil con post-ecos, veremos que ya no son comparables.

De acuerdo con [ATSC, 2010], un televisor ATSC genérico debe ser capaz de reproducir el audio y el video sin errores cuando la relación C/N en el canal sintonizado y a la entrada del receptor, es mayor a 15.5 dB. Esto es válido para una señal recibida libre de multitrayecto. Cuando existe multitrayecto, es normal que el umbral de C/N crezca con relación a la complejidad de la respuesta impulsional del canal de propagación. En el caso de los umbrales presentados en las tablas 7.4 y 7.5, se puede notar que los receptores exigen una relación C/N mucho más grande que 15.5 dB para poder presentar el contenido de la señal televisiva sin errores, lo cual permite determinar que, para los receptores bajo prueba, no fue fácil manejar los dos canales de propagación definidos en esta tesis.

8 CONCLUSIÓN

El objetivo de este trabajo, fue llegar a definir al menos un canal de propagación que ayudara a representar las condiciones de propagación que un receptor puede enfrentar dentro de la cobertura de una red SFN. El medio para lograrlo, dio la oportunidad de presentar cómo se instalaron 2 de las primeras redes SFN en México utilizando el estándar ATSC, lo cual es de suma importancia, puesto que con esto se demuestra que las redes SFN pueden funcionar con el esquema de modulación 8VSB. Si bien es cierto que este esquema presenta varias desventajas al compararlo con OFDM, el hecho de que ya haya redes SFN funcionando en México con ATSC, es una buena señal pensando en lo que será el futuro de las redes de transmisión de señales de televisión digital en nuestro país y, sobre todo, lo que esta tecnología puede representar para el uso eficiente del espectro radioeléctrico en las bandas UHF y VHF, el cual es sumamente valorado.

La investigación que se llevó a cabo en el capítulo 2 de este trabajo, dio como resultado una base teórica que proporciona las herramientas para comprender qué es un canal de propagación y sus principales características. Usando todos los conceptos de este capítulo, resulta más sencillo comprender por qué ciertas condiciones de propagación hacen más complicado el accionar de los receptores y sin duda, ayudan a tomar decisiones a la hora de diseñar redes SFN, puesto que se conoce aquello que se debe evitar.

Al final, se lograron definir 2 nuevos canales de propagación para redes SFN en recepción fija con base en las mediciones de campo que se llevaron a cabo para comprobar el funcionamiento adecuado de las dos redes SFN instaladas para una de las televisoras más importantes de México, con el fin de dar servicio a las ciudades de Puebla, Tlaxcala y localidades vecinas. De esta manera, se cumplió con el objetivo planteado al inicio de esta tesis y en lugar de presentar solo un nuevo canal de propagación, se lograron definir dos, los cuales se unen a un conjunto de canales definidos por varios institutos de investigación, universidades y organizaciones de todo el mundo, que también se incluyen en este trabajo. Este catálogo de canales de

propagación, es una muy buena referencia para todos aquellos interesados en simular un entorno de propagación determinado dentro de una red MFN o SFN.

El Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) ha asumido una postura importante que empujará a los radiodifusores a utilizar las redes SFN como una solución tecnológica para dar cobertura a sus áreas de servicio haciendo uso del espectro radioeléctrico eficientemente, por lo que es de suma importancia que se establezca un mecanismo entre el IFT y los radiodifusores para que el diseño de las redes SFN tenga más grados de libertad. Si bien es cierto que las televisoras son las responsables de solicitarle al IFT la aprobación de los diagramas de radiación, altura del centro eléctrico de radiación, potencias de transmisión necesarias para cubrir una zona determinada y la posición del sitio de transmisión, al instalar una red SFN, obtener todos los factores técnicos antes descritos de las simulaciones de cobertura, resulta casi imposible. Encontrar los factores técnicos adecuados para el correcto funcionamiento de una red SFN, en especial usando ATSC, puede requerir de muchas pruebas en campo y varias modificaciones en los parámetros técnicos de transmisión, por lo que es muy probable que los parámetros que aprobó en primera instancia el IFT, no sean los más adecuados para el funcionamiento de la red SFN.

Esta es la razón por la que se debe estudiar la posibilidad de crear un esquema de permisos más flexible, motivando a los radiodifusores a realizar lo necesario para hacer funcionar las redes SFN en sus zonas de servicio con todas las herramientas tecnológicas a su disposición. Todo lo anterior, con el fin de aprovechar lo mejor posible esta tecnología de transmisión y reducir la oposición que existe por parte de los radiodifusores para introducirla.

BIBLIOGRAFÍA

[ATSC, 2011]	Advanced Television System Committee, Inc., ATSC Standard for Transmitter Synchronization A/110 , ATSC, Estados Unidos de América, 2011.
[FISHER, 2009]	FISHER, Walter, Tecnologías para la Radiodifusión Digital de Video y Audio Una Guía Práctica para Ingenieros , Rohde & Schwarz, Alemania, 2009.
[PARSONS, 2000]	PARSONS, J. D., The Mobile Radio Propagation Channel 2nd edition , John Wiley & Sons LTD, Inglaterra, 2000.
[R&S, 2001]	ROHDE & SCHWARZ BROADCASTING DIVISION, Application Note, Fading Channel Simulation in DVB , 2001.
[UIT-R P.1057-1, 2001]	Recomendación UIT-R P.1057-1, Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas radioeléctricas , 1994-2001.
[GÓMEZ, 2014]	GÓMEZ, Javier, Apuntes de Redes Inalámbricas y Móviles , Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.
[M&H, 2011]	MATZ, Gerald & HLAWATSCH, Franz, Wireless Communications over Rapidly Time-Varying Channels , Universidad de Tecnología de Viena, Ámsterdam, Países Bajos, 2011.
[GEßNER, 2013]	GEßNER, Christina, Long Term Evolution A concise introduction to LTE and its measurement requirements , Rohde & Schwarz, Alemania, 2013.
[S&P, 2014]	SALLENT, Oriol & PÉREZ, Jordi, Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles y celulares , Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2014.
[S&V&A, 2003]	SALLENT, Oriol & VALENZUELA, José Luis & AGUSTÍ, Ramón, Principios de Comunicaciones

	Móviles , Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2003.
[COST207, 1989]	COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, COST 207 Digital land mobile radio communications Final Report , Roma, Italia, 1989.
[MOTIVATE, 2000]	MACAVOCK, Peter. TEW, Barry, PIAGET, Claude, GLEDHILL, Jeff, Draft Comments on the SET-ABERT final report, Annex 2 MOTIVATE REPORT , Génova, Italia, 2000.
[ABERT/SET, 2000]	ABERT/SET, SET-ABERT final report , Brasil, 2000.
[T&P&G&Y, 2006]	TANG, Shigang, PAN, Changyong, GONG, Ke & YANG Zhixing, Propagation Characteristics of Distributed Transmission with Two Synchronized Transmitters , IEEE, 2006.
[G&R&D, 2013]	GUERRA, Mauricio V., RODRÍGUEZ, Carlos V. & DA SILVA, Luiz, SFN Channel Measurements in Brazil , IEEE, 2013.
[NOVEL, 2006]	PARVIAINEN, H., KYÖSTI, P., ZHAO, X., HIMMANEN, H., TALMOLA, P.H.K., RINNE, J., Novel Radio Channel Models for Evaluation of DVB-H Broadcast Systems , IEEE, 2006.
[WINGTV, 2006]	CELTIC, Wing TV Services to Wireless, Integrated, Nomadic, GPRS-UMTS & TV handheld terminals , CELTIC Telecommunications Solutions, 2006.
[IFT, 2014]	Instituto Federal de Telecomunicaciones, Política para la transición a televisión digital terrestre , Diario Oficial de la Federación, México, 2014.
[ETSIT-UPM, 2007]	Grupo de Radiocomunicación, Departamento SSR, Tutorial de Radio Mobile , Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, España, 2007.
[XHPUR-P, 2008]	Secretaría Técnica del Pleno de la Comisión Federal de Telecomunicaciones, Modificaciones de las características técnicas de la concesión para la instalación, operación y uso temporal del canal

	<i>adicional para la TDT, Folio CFT/D01/STP/1110/2008</i> , México, 2008.
[XHPUR-T, 2015]	Unidad de Concesiones y Servicios del Instituto Federal de Telecomunicaciones, <i>Constancia de Inscripción en el Registro Público de Concesiones, Folio Electrónico FER040610CO-105174</i> , México, 2015.
[ATSC, 2010]	Advanced Television System Committee, Inc., <i>Receiver Performance Guidelines A/74</i> , ATSC, Estados Unidos de América, 2010.

Declaración

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

Ciudad de México, 16 de marzo de 2016.

DANIEL ESQUIVEL TRUJILLO