



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DEFINICIÓN DE PROTOCOLO DE PRUEBAS
PARA DETERMINAR EL DESEMPEÑO DEL
SISTEMA DRM+ EN MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA-TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:

EDGAR SENOBIO MOZO RAMOS



TUTOR:

DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2012

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rangel Licea Victor
Secretario: Dr. Rodríguez Cuevas Jorge
Vocal: Dr. Matías Maruri José María
1er. Suplente: Dr. Martynyuk Oleksandr
2do. Suplente: Dr. Psenicka Bohumil

México, D.F. Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES:

Quienes me han dado una formación integral y a quienes debo absolutamente todo lo que como persona soy. Agradeceré toda mi vida el gran amor y cariño que me han dado y el apoyo incondicional que por siempre me han brindado, ustedes son y serán la base de mis logros.

A MIS HERMANOS:

A Carolina, Celerino y Daniel. Les agradezco todo el apoyo y el ánimo que siempre me dan para seguir adelante, ustedes son quienes me empujan cuando mis fuerzas se quebrantan.

A CARMEN:

A la persona especial que me ha acompañado en este viaje lleno de turbulencias, gracias por tu amor, cariño y comprensión, has sido esencial para lograr esta meta.

AL DR. JOSÉ MARÍA

Por su valioso tiempo y dedicación, por compartir sus conocimientos, por sus consejos y recomendaciones que han sido fundamentales para realizar este trabajo.

A LA CEP (COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO)

Por el apoyo que me dio durante el desarrollo de la maestría, ayuda que sin duda fue primordial para lograr esta meta.

A Radio UNAM

En especial al Ingeniero Mario Manuel Arreola Santander, por su apoyo y disponibilidad en la obtención de datos técnicos.

AI IMER

Por el acceso a sus instalaciones y obtención de datos; agradezco también la ayuda brindada amablemente en el apoyo de este trabajo al Ing. Miguel Ángel González López.

A Radio IBERO

Por el apoyo brindado y la facilidad para acceder a sus instalaciones y la ayuda brindada por el Ing. Dimitri Hernández.

Resumen

Debido a la migración latente de la radio analógica a digital, se han desarrollado varios sistemas de radio digital y entre ellos está DRM (Digital Radio Mondiale) objeto de estudio del presente trabajo. Se realizó en esta investigación una metodología de pruebas útil para la implementación del estándar y cuyo objetivo es determinar de forma científica el desempeño del estándar para FM para el caso particular en la Ciudad de México. El trabajo contiene un estudio de las características técnicas de tres estaciones de radio, y se eligió la más oportuna para la implementación del protocolo de pruebas.

El trabajo consta de la propuesta completa de Emplazamiento de transmisión, equipo de transmisión más apropiado, además se fijaron los parámetros de transmisión. Se definieron rutas de medidas y se eligió el equipo de medidas más adecuado para la obtención y análisis de los parámetros que determinan el desempeño del sistema DRM+.

Abstract

Because of the potential change of the analog broadcasting to a digital system, several digital radio systems have developed. DRM (Digital Radio Mondiale) is one of these new digital systems. This work focuses on DRM, and presents a useful test methodology in order to implement the standard in Mexico City, where we intend to determine the performance of the DRM standard for Frequency Modulation (FM). This research contains a study of the technical characteristics of three FM stations, and one station was chosen as the most appropriate for the implementation of the test protocol.

This work contains a complete proposal of the installation of appropriate transmission equipment. In addition, the transmission parameters were fixed. Measurement routes were defined and the most appropriate equipment was chosen in order to obtain and analyze the parameters that determine the performance of the DRM + system.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes: Estado de la Radio digital, DRM y DRM+	1
1.2 Definición del Problema	3
1.3 Objetivo.....	3
1.4 Organización de la Tesis	4
2 ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 Sistemas de Radio Digital Terrestre.....	5
2.1.1 DAB-Eureka-147	5
2.1.2 HD Radio-IBOC	7
2.1.3 ISDB-TSB.....	8
2.2 Digital Radio Mondiale.....	9
2.2.1 Conceptos básicos	9
2.2.2 Historia.....	10
2.2.3 Características técnicas	11
2.2.4 Pruebas del sistema DRM	16
2.3 DRM+ - Extensión del estándar DRM.....	16
2.3.1 Características técnicas	17
2.3.2 Pruebas del sistema DRM+.....	18
3 DISEÑO DE PRUEBAS.....	20
3.1 Introducción	20
3.2 Definición de los objetivos de las pruebas	20
3.3 Definición de modos de recepción.....	21
3.4 Selección de la estación transmisora.....	23
3.4.1 Introducción	23
3.4.2 Configuraciones posibles de transmisión de DRM+.....	24
3.4.3 Radio UNAM.....	29
3.4.4 Instituto Mexicano de la Radio	33
3.4.5 Radio Universidad Iberoamericana.....	35
3.4.6 Elección de la estación transmisora	38
3.5 Planificación de las pruebas.....	41
3.5.1 Propuesta de la arquitectura del sistema para transmisión simulcast.....	41
3.5.2 Definición de rutas de medidas	44
3.6 Metodología de medidas	51
3.6.1 Definición del sistema de medidas.....	52
3.6.2 Parámetros necesarios a registrar	55

3.7 Metodología de análisis	57
4 CONCLUSIONES GENERALES	60
5 DISCUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS	61
REFERENCIAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Bandas de frecuencia de DRM.</i>	10
<i>Figura 2.2. Diagrama de bloques de transmisión del sistema DRM.</i>	12
<i>Figura 2.3. Codificadores de audio recomendados en función de las tasas binarias disponibles en DRM.</i>	13
<i>Figura 3.1. DRM+ con un amplificador de potencia lineal.</i>	24
<i>Figura 3.2. Espectro de DRM+ y FM en modo combinado junto con el espectro de salida de DRM+.</i>	24
<i>Figura 3.3. Modo combinado DRM+ con potencia RF combinada.</i>	25
<i>Figura 3.4. DRM+ modo combinado (acoplamiento de antena).</i>	26
<i>Figura 3.5. Modo combinado DRM+ con acoplador híbrido y antena de dos polarizaciones cruzadas.</i>	27
<i>Figura 3.6. Combinación de DRM+ y FM a nivel de señal bajo.</i>	27
<i>Figura 3.7. Máscara de espectro para una transmisión DRM+ y FM.</i>	28
<i>Figura 3.8. Imagen del espectro de DRM+ en modo combinado.</i>	28
<i>Figura 3.9. Ubicación del transmisor de Radio UNAM.</i>	30
<i>Figura 3.10. Torre de Radio UNAM (derecha) y sección superior (izquierda).</i>	31
<i>Figura 3.11. Estimación de campo para Radio UNAM.</i>	32
<i>Figura 3.12. Ubicación del transmisor del IMER.</i>	33
<i>Figura 3.13. Torre (izquierda) y arreglo de antenas (derecha).</i>	34
<i>Figura 3.14. Estimación de campo para IMER.</i>	35
<i>Figura 3.15. Posición geográfica Radio Ibero.</i>	36
<i>Figura 3.16. Intensidad de campo de Radio Ibero.</i>	37
<i>Figura 3.17. Patrones de radiación horizontales de las 3 emisoras.</i>	38
<i>Figura 3.18. Comparación de las coberturas FM de las estaciones IMER, Ibero y UNAM.</i>	39
<i>Figura 3.19. Relación de protección FM y DRM+.</i>	41
<i>Figura 3.20. DRM+ modo combinado (acoplamiento de antena).</i>	42
<i>Figura 3.21. Acoplamiento entre antenas verticalmente espaciadas.</i>	43
<i>Figura 3.22. Colocación de antena DRM+.</i>	44
<i>Figura 3.23. Zona con visión directa y estimación de cobertura DRM+ para una modulación 4-QAM y modo de recepción móvil.</i>	45
<i>Figura 3.24. Cobertura DRM+ con 4-QAM y 16-QAM.</i>	49
<i>Figura 3.25. Mapa de rutas de medidas definidas en la Ciudad de México.</i>	50
<i>Figura 3.26. Cobertura DRM+ con 4-QAM y 16-QAM y rutas de medidas.</i>	51
<i>Figura 3.27. Ejemplo de camioneta para la realización de medidas.</i>	52
<i>Figura 3.28. Diagrama de bloques del equipo de recepción.</i>	53
<i>Figura 3.29. RFmondial Frontend (derecha) y software del receptor DRM+ (izquierda).</i>	54
<i>Figura 3.30. Software del receptor DRM+.</i>	55

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Tasas binarias de los distintos modos de IBOC FM.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2.2. Valores de los parámetros OFDM para los modos de robustez de DRM.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2.3. Usos de los modos de robustez de DRM.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2.4. Índices de codificación y niveles de protección correspondiente.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2.5. Parámetros OFDM de DRM+.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.6. Tasas de código SDC.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.7. Tasas de código MSC.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2.8. Tasas de código utilizadas para pruebas.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3.1. Objetivos de las pruebas a realizar.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3.2. Opciones del combinador DRM+.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3.3. Características técnicas de operación de Radio UNAM.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3.4. Parámetros técnicos de una estación IMER.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.5. Parámetros técnicos de Radio Ibero.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3.6. Intensidad de campo medio mínimo Emed para 4-QAM, R= 1/3 en VHF banda II.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3.7. Intensidad de campo medio mínimo Emed para 16-QAM, R= 1/2 en VHF banda II.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3.8. Rutas de Medidas en la Ciudad de México.....</i>	<i>49</i>

1 INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de este capítulo se describirá en términos generales el contexto dentro del cual se desenvuelve el tema de esta tesis. Inicialmente se da un esbozo global de la radio digital para luego incursionar de manera particular en la tecnología DRM y con mayor importancia en DRM+.

Posteriormente se explican los objetivos que impulsaron la investigación y el desarrollo de este trabajo. En seguida se describe de forma desglosada cada una de las partes que integran este estudio.

1.1 Antecedentes: Estado de la Radio digital, DRM y DRM+

La tecnología digital ha transformado gradualmente la forma en la cual se crea y distribuye la información, para el caso de la radiodifusión no es una excepción. En el mundo de la radiodifusión sonora las tecnologías digitales se usan desde hace tiempo para la grabación, producción y almacenamiento de programas. Es por ello que muchos radiodifusores han invertido en sistemas digitales para la producción y contribución al cambio de analógico a digital dentro de las transmisiones de radiodifusión. Las modulaciones digitales se empezaron a utilizar en la radio a finales de los años 90, y hoy en día ya hay varios estándares de radio Digital [WBU-06].

Dentro de un mundo cada vez más digitalizado, las tecnologías de AM y FM se están quedando cada vez más aisladas. Con el objeto de aprovechar las ventajas de las nuevas tecnologías, y ante el avance de las tecnologías digitales, en 1992 la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) especificó las características que debían tener las nuevas tecnologías de radio digital terrestre que sustituyeran a la radio analógica actual [ITUBS-774]. A continuación se citan los distintos sistemas de radio digital existentes, dejando para el final el sistema DRM y DRM+, objeto de estudio en el presente documento.

Eureka 147, conocido comercialmente como DAB (Digital Audio Broadcasting), fue desarrollado en Europa y la iniciativa surgió en la Conferencia Ministerial de París con la participación de 17 países en 1985. Es un sistema de radio digital desarrollado principalmente para recepción por receptores móviles, portátiles y fijos utilizando una simple antena no direccional. Puede ser utilizado en redes terrestres, satelitales, híbridas (satelital y terrestre complementadas) y de radiodifusión por cable.

Este sistema está diseñado para operar a cualquier frecuencia dentro de los 30 a 3000 MHz, pero en la práctica funciona en dos banda la banda III VHF y la banda L. El consorcio Eureka 147 fue fundado en 1987 con socios de Alemania, Francia, Países Bajos y Reino Unido. Fue aceptado en 1994 por la UIT y en 1995 aprobado como estándar por la

Introducción

ETSI. Dicho sistema tiene como característica particular que además incorpora transmisión de imagen en movimiento. Eureka 147 es una tecnología madura que ha sido implementada en Reino Unido, Alemania y Canadá, además se hacen pruebas en diferentes países de Europa.

El segundo sistema que apareció en la radio digital, es IBOC (In-Band / On-Channel), conocido comercialmente como HD-Radio, el cual se desarrolló en Estados Unidos y fue diseñado para sustituir las emisiones en onda media y en FM, aceptado por la UIT que lo llamó “Sistema digital C” para la banda de FM y para onda media lo denominó “Sistema IBOC DSB”.

El sistema HD Radio permite a las radiodifusoras transmitir simultáneamente la señal digital y analógica, sin necesidad de espectro adicional para la señal digital. Por tanto trabaja como sistema híbrido compatible entre sistema analógico y digital, esto hace más sencilla la migración del sistema analógico al digital, una vez que todos los radios analógicos hayan sido sustituidos en un futuro próximo.

ISDB-TSB (Radiodifusión Digital de Servicios Integrados-Terrestre para Radiodifusión de Audio), sistema desarrollado para emisiones terrestres de sonido digital. El sistema fue desarrollado inicialmente por la Asociación de Industria de Radio y Comercio en Octubre de 1998. Posteriormente con la realización de pruebas experimentales y de campo se aprobó como estándar japonés por la *Association of Radio Industries and Businesses (ARIB)* en 1999 e incluido en la recomendación BS.1114-3 de la UIT en 2004.

Estos tres sistemas citados anteriormente forman los sistemas de radio digital terrestre que la UIT ha aceptado para frecuencias superiores a los 30 MHz. Más adelante se describirá con mayor detalle cada uno de ellos.

DRM (Digital Radio Mondiale) es un sistema de radiodifusión digital desarrollado por el Consorcio DRM, con el objetivo de tener un sistema digital adecuado para todas las bandas de radiodifusión de AM en el mundo. Dicho consorcio se formó en 1998 con importantes representantes de la radiodifusión sonora, radiodifusores, fabricantes de equipos de transmisión, recepción y semiconductores, operados de red, organismos reguladores y centros de investigación.

Los principales objetivos para desarrollar este sistema digital eran:

- Mejorar la calidad de audio y la fiabilidad de recepción.
- Mayor facilidad de uso del receptor para los oyentes.
- Una ruta asegurada de migración del sistema analógico al digital.
- Máxima reutilización de la infraestructura existente.
- Mejorar la eficiencia espectral.

El sistema DRM fue estandarizado por el ETSI en 2001, y por el IEC en 2003. Aceptado por la UIT en 2002 a través de la Recomendación UIT-R BS-1514, con las características definidas por el estándar del IEC. DRM es el único estándar de radio digital

aceptado para las bandas de radiodifusión de onda corta. Cubre todas las bandas de radiodifusión por debajo de los 30 MHz, es decir, las bandas de LF, MF y HF.

Posteriormente se pensó en una extensión de este sistema para las bandas arriba de los 30 MHz y hasta 174 MHz, denominado DRM+, también desarrollado por el Consorcio DRM y apoyado por todos sus integrantes. Es un estándar abierto con la recomendación de la ETSI [ETSI-980] y están planeadas las recomendaciones cercanas por la UIT.

Este sistema puede soportar pequeños y medianos radiodifusores, tiene áreas de cobertura pequeñas con una estación simple, cuenta con un sistema eficiente de potencia y una estructura de multiplexación no compleja. Puede además soportar grandes radiodifusores, teniendo en este caso áreas de cobertura extensas utilizando Redes de Frecuencia Única, puede permitir hasta 4 servicios en un múltiplex.

Estos dos sistemas digitales del Consorcio DRM, serán explicados de manera más extensa en el capítulo 2.

1.2 Definición del Problema

Debido a que DRM+ es un sistema que está probándose actualmente en el mundo, ya que es un sistema recientemente definido, se requieren hacer pruebas de campo que permitan determinar la forma de ser implementado el sistema en dicho lugar, de acuerdo a las condiciones ambientales que se tengan, para después conocer el desempeño del sistema.

De acuerdo a la innovación del sistema en nuestro país y al interés que tiene el Consorcio DRM en promocionar su tecnología en México además del antecedente de pruebas en 26 MHz de este consorcio en la ciudad, el objetivo de esta investigación es determinar una metodología de pruebas necesarias para determinar la factibilidad de implementar el sistema DRM+ considerando las condiciones de propagación en la Ciudad de México.

Actualmente se realizan pruebas en diversos países para implementar DRM+, en los cuales existe un interés por adquirir esta tecnología. El presente trabajo se centrará en definir un protocolo que permita guiar la implementación de dicho sistema dentro de esta ciudad, primeramente eligiendo una estación particular de radiodifusión para posteriormente determinar los parámetros necesarios que permitan evaluar el sistema.

1.3 Objetivo

De acuerdo a los pocos estudios realizados acerca de DRM+, se requiere preparar las bases para determinar de forma científica el desempeño de dicho estándar para el caso particular en la Ciudad de México, un entorno urbano con edificios altos en gran parte de la ciudad y en algunas zonas edificios bajos, rodeada además de montañas, lo cual genera un ambiente más complicado para la recepción de las señales.

Introducción

Además no existe un precedente concreto de la secuencia en la realización de las pruebas, es por ello conveniente captar de manera efusiva la metodología implícita en las pruebas realizadas hasta ahora en diversos lugares dentro de los cuales se pretende implementar DRM+.

Por tanto el objetivo fundamental de esta tesis es definir un protocolo de pruebas con la finalidad de determinar el desempeño del sistema DRM+ (extensión del estándar Digital Radio Mondiale) considerando todas las características del entorno en la Ciudad de México.

Para la evaluación del desempeño del sistema es necesario englobar diversos parámetros como son: la calidad de recepción, el área de cobertura, la relación señal a ruido, tipo de modulación. Es por ello que los diversos objetivos son describir estos parámetros dentro de la metodología y permitan emitir una resolución acerca del desempeño.

1.4 Organización de la Tesis

El presente trabajo se divide en 5 capítulos, en donde el capítulo 1 está destinado a dar una breve introducción de la radio digital y los diferentes sistemas de radio digital que existen, además de presentar los motivos de este trabajo y su principal objetivo.

El capítulo 2, referente al Estado del Arte, describe las características específicas de los diferentes sistemas digitales actuales con el objeto de diferenciarlos de los dos sistemas con mayor importancia en este trabajo, que son DRM y DRM+, enfocando mayor interés en DRM+ y las pruebas de campo y laboratorio realizadas en la banda de FM hasta ahora.

El capítulo 3, se destina para el desarrollo del protocolo de pruebas, dando una explicación de la elección de la estación transmisora donde se define el protocolo, además detallando los elementos necesarios para la definición de las pruebas útiles para determinar el rendimiento del sistema DRM+.

El capítulo 4 es de las conclusiones generales a las cuales se llegaron al final de este trabajo.

El capítulo 5 trata sobre las posibles aplicaciones que pueda tener este trabajo, discutiendo cada uno de sus aportaciones importantes en el país. Además se comentan las líneas de investigación que puedan surgir a partir de la realización de esta tesis.

Finalmente se presentan las referencias utilizadas durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas de Radio Digital Terrestre

A finales de los años del siglo XX y principios del XXI los expertos en tecnología iniciaron un proyecto con el fin de crear un sistema basado en señales digitales para implantar un sistema de radiodifusión. Hoy en día se utilizan 4 sistemas en todo el mundo; Eureka-147, IBOC, ISDB-TSB y el sistema Digital Radio Mondiale (DRM).

2.1.1 DAB-Eureka-147

El proyecto Eureka-147 fue establecido en 1987 con el apoyo de la Comisión Europea para desarrollar un sistema de radiodifusión de audio y datos para receptores fijos, portátiles y móviles. El trabajo resultó en la publicación del estándar ETSI 300 401 [ETSI-401]. Puede funcionar en cualquier frecuencia que se encuentre dentro del rango de los 30MHz a 3GHz, pero se ha desarrollado en dos bandas, la banda III de VHF (174MHz-230MHz) y la banda L de UHF (1452MHz-1492MHz). DAB fue aceptado por la UIT como el primer estándar de radio digital denominado “Sistema Digital A” [ITUBS-1114] [ITUBO-1130].

La interferencia que comúnmente perturba la recepción analógica, la cual es causada por señales de radio reflejadas de los edificios y montañas, es eliminada con señales DAB. [DAB-11]. Los datos de los servicios individuales, ya sean de audio o datos basados en recursos multimedia se deben combinar en un solo flujo de datos para transmitirse. Este proceso es conocido como multiplexado y al flujo de datos resultante se le llama múltiplex [BOWE-98].

El múltiplex de DAB está basado en una trama que comprende 3 elementos diferentes: el Canal de Sincronización, el Canal de Información Rápida y el Canal de Servicio Principal (MSC por sus siglas en inglés Main Service Channel), el cual contiene las tramas de audio o paquetes de datos correspondientes a los diferentes servicios en el múltiplex. Esta parte del múltiplex es esencialmente la carga útil de la señal DAB.

La ventaja que ofrece el múltiplex es que integra diversos servicios, por lo tanto se transmiten varios servicios de radio dentro del mismo múltiplex. Esta característica exige a las emisoras minoritarias a compartir el múltiplex con otras emisoras, y delegar el control de la parte de transmisión (transmisor y antena) a otra radiodifusora o a una empresa especializada en servicios de radiodifusión.

La restricción de compartir la parte de transmisión es vista como un problema por algunos profesionales o empresas dueñas de una estación de radio, que no les agrada la idea de que alguna radiodifusora controle este aspecto de la radiodifusión. Para resolver este problema en algunos países se ha legislado de alguna manera creando empresas públicas que gestionan el múltiplex.

El sistema DAB utiliza una técnica de codificación y multiplexación llamada MUSICAM, acrónimo para Masking Pattern Universal Sub-band Integrated Coding And Multiplexing, al mismo tiempo MUSICAM emplea una técnica de codificación psicoacústica como especifica la codificación MPEG-2 Audio layer II [ISO-11172].

Existen codificadores que dan calidades de audio similares al MPEG-II Audio Layer II con tasas binarias menores, por ejemplo, el MP3 o el AAC (Advanced Audio Coding) [BRAN-99] [DIET-02], éste último utilizado en otros sistemas de radio digital debido a que maneja tasas de codificación muy grandes manteniendo una calidad de audio cercana a la de CD. Para el año 2007 DAB incluyó en el estándar la posibilidad de utilizar la codificación MPEG-4 HE AAC v2 (High Efficiency Advanced Audio Coding) [ISO-14496] [MELT-06], denominándose al nuevo estándar DAB+ [ETSI-563].

La flexibilidad de DAB para transmitir datos facilitó la existencia de un nuevo sistema desarrollado en Corea, DMB (Digital Multimedia Broadcasting), que incorporó un codificador de video para transmitir tanto servicios de radio como de televisión. DMB fue aprobado para su uso en Corea del Sur en 2002, y estandarizado en Europa en 2005 [KOZA-04] [ETSI-428].

DAB utiliza el esquema de modulación digital con portadora múltiple espectralmente eficiente, Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM). Desarrollado dentro del proyecto Eureka-147 [STOT-98]. COFDM utiliza muchas portadoras, hasta 1536, separadas 1kHz para el caso de DAB, cada portadora modulada independientemente en QPSK. El múltiplex es distribuido entre todas las portadoras, ocupando aproximadamente 1.54 MHz [BOWE-98].

Además hace un uso eficiente del espectro, característica que siempre ha sido un problema en muchos países. Esto ha llevado a la admisión de radio digital basada en DAB en Europa, Sudeste de Asia y Australia. La cobertura a mediados de 2007 era ya de más de 500 millones de personas [HERR-07], en la actualidad hay 330 tipos de receptores disponibles en el mercado, 30 países cuentan con servicios regulares de DAB al aire y más de 12 millones de receptores DAB se han vendido en diversos lugares del mundo [DAB-11].

En años recientes, México ha probado diversas plataformas de radio digital, incluyendo DAB, DRM y HD radio. En México los radiodifusores estaban interesados en DAB+ o DMB como parte de un Mercado multiestándar, en cambio el organismo mexicano regulador COFETEL junto con el ejecutivo ha anunciado la adopción del estándar digital IBOC [COFE-11].

2.1.2 HD Radio-IBOC

El sistema IBOC (In Band / On Channel) o comercialmente HD Radio fue desarrollado por la empresa estadounidense Ibiquity Digital Corporation. HD Radio está diseñado para funcionar tanto FM, es decir en la banda II de VHF (88-108 MHz), y AM en onda media (525-1700 kHz). Este sistema no utiliza nuevas frecuencias para su operación, sino que funciona dentro de las mismas bandas de radiodifusión analógica. La NRSC (National Radio Systems Committee) estandarizó el sistema en 2005 [NRSC-08]. El NRSC supervisó las pruebas de laboratorio y de campo bajo ciertos requerimientos que definieron las recomendaciones de los sistemas para la banda de FM en 2001 [NRSC-01] y para la de AM en 2002 [NRSC-02].

Internacionalmente está recomendado por la UIT, desde el año 2002 para la banda de AM, nombrándolo “Sistema IBOC DSB” [ITUBS-1514], y en 2003 para la banda de FM denominándolo “Sistema digital C” [ITUBS-1114].

HD Radio está diseñado para tener una migración suave entre las tecnologías analógicas de radio, es decir, AM y FM, y digitales. Para ello, HD Radio diseñó un modo de transmisión, en el cual las transmisiones analógicas coexisten con las digitales, denominado Modo Híbrido. Una vez que los oyentes hayan adquirido sus receptores digitales y desaparezcan las modulaciones analógicas, se aprovechará el espacio dejado por éstas para establecer el Modo Totalmente Digital.

En el modo híbrido se añaden señales digitales a los lados de la señal analógica con una potencia menor respecto a la analógica para que no interfiera y con una modulación lo suficientemente robusta para que no sea interferida por la señal analógica. En el caso de HD Radio para AM también se añaden señales digitales dentro del ancho de banda de la señal analógica, con un nivel bajo y una modulación muy robusta. La señal HD Radio del modo Híbrido se puede recibir tanto por un receptor analógico AM como FM además de los receptores digitales HD Radio. Éstos últimos tienen la capacidad de alternar automáticamente la recepción de la señal analógica y la digital para captar la mejor de ellas en cada momento.

Para el caso de FM, se ha definido también el Modo Híbrido Extendido, en el cual el ancho de banda de las bandas laterales híbridas puede ser extendido hacia la señal analógica para incrementar la capacidad digital. Esta extensión se da en los bordes interiores de cada banda lateral primaria. El modo totalmente digital, esto es, tras suprimir la señal analógica existente y el aumento de potencia de las portadoras que anteriormente estaban bajo la señal analógica generarán aumento de potencia en la forma de onda totalmente digital que incremente la robustez.

La señal HD Radio para FM ocupa un ancho de banda de 400 kHz. El sistema HD Radio permite a los radiodifusores ofrecer múltiples servicios. Un servicio puede verse como una agrupación lógica de datos de aplicaciones que el sistema HD Radio puede identificar. La modulación utilizada por HD Radio es OFDM. Las tasas binarias alcanzadas con HD Radio se muestran en la tabla 2.1. [JOHN-03] [PEYL-03].

MODO	TASA BINARIA
Híbrido FM	98 kbps
Híbrido Extendido FM	110 a 148 kbps
Totalmente Digital FM	200 a 300 kbps

Tabla 2.1. Tasas binarias de los distintos modos de IBOC FM.

A lo largo del proceso de definición del sistema HD Radio se han probado diferentes codificadores de fuente, AAC, PAC y HDC. El Codificador HDC es el actual codificador de audio propiedad de la empresa iBiquity. Este codificador de fuente fue desarrollado en colaboración con Coding Technologies basándose en la tecnología SBR, y es el que se utiliza actualmente en los equipos HD Radio comerciales.

Actualmente se realizan transmisiones en la frontera norte del país, esto con el objetivo de realizar pruebas experimentales sobre el estándar. Dichas transmisiones fueron autorizadas por la COFETEL mediante un documento que emitió denominado “Lineamientos para la transición a la radio digital terrestre (RDT), de las estaciones de radiodifusión sonora ubicadas en la frontera norte de México” [COFE-08]. Además, la COFETEL lo ha aceptado como el estándar de radio digital para nuestro país [COFE-11].

2.1.3 ISDB-TSB

El sistema de radiodifusión digital ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting) fue desarrollado en Japón, el cual engloba a los servicios de radio y televisión, y en cuanto al medio de transmisión, comprende la radiodifusión por satélite (ISDB-S), terrestre (ISDB-T) y por cable (ISDB-C). Por tanto, el sistema de radio digital terrestre ISDB-TSB (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial for Sound Broadcasting) es un subsistema que forma parte de este estándar global de radiodifusión digital.

Las especificaciones del sistema fueron publicadas en octubre del 1998 por el ARIB (Association of Radio Industries and Businesses). Después de realizar pruebas de laboratorio y de campo Japón lo adoptó como el sistema de transmisión terrestre de televisión y sonido digital en 1999. Además fue incluido en la recomendación de la UIT ITU-R BS-1114 como estándar de radio digital terrestre, denominándolo “Sistema Digital F” [ITUBS-1114]. En 1999 se realizaron las primeras transmisiones de prueba y en octubre de 2003 mediante dos estaciones se realizaron las primeras transmisiones comerciales en Tokio, Osaka y Nagoya.

El sistema utiliza un codificador de audio MPEG-2 AAC con SBR, aunque el SBR es opcional. Funciona a una velocidad binaria típica de 144 Kbps, con una calidad de audio cercada a la de CD, además tiene la posibilidad de codificar audio multicanal [ARIB-10] [ITUBS-1114].

Utiliza una modulación OFDM para la transmisión, con cuatro posibilidades de modulación para las portadoras, DQPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Para la corrección de errores utiliza la técnica de codificación convolucional y Reed-Solomon añadiendo entrelazado temporal y frecuencial [DIBE-10]. Debido a la variación de los canales de

propagación se tienen diferentes posibilidades de acuerdo al parámetro de modulación, en el caso de ISDB-T se utiliza BST-OFDM (Band Segmented Transmission OFDM) porque la señal ISDB-T se basa en segmentos de 6/14 MHz (aproximadamente 429 kHz) del ancho de banda de referencia, los cuales se pueden agrupar en transmisiones de mayor ancho de banda, ya que, el sistema se puede adaptar a las canalizaciones de los diferentes países; teniendo tres diferentes segmentos, 429 kHz (6/14), 500 kHz (7/14) y 571 kHz (8/14) para los anchos de banda de referencia de 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz, respectivamente [ITUBS-1114].

Además el sistema tiene la posibilidad de crear redes SFN, lógicamente puede transmitir datos, de hecho puede transmitir programas en varios idiomas. En julio de este año se ha producido el apagón analógico de televisión en Japón para utilizar el estándar ISDB-T [MIC-11], pero en el caso de los servicios de radiodifusión aún no está previsto.

2.2 Digital Radio Mondiale

Digital Radio Mondiale (DRM) es una tecnología de radio digital terrestre creada e impulsada por el Consorcio DRM, grupo de empresas y organismos de varias áreas relacionadas con la radiodifusión. En este apartado se explican las características básicas de esta tecnología, los hechos más importantes en su evolución y sus características técnicas.

2.2.1 Conceptos básicos

El Consorcio DRM se fundó para reemplazar la radiodifusión analógica mediante un sistema de radio digital de alta calidad en las bandas AM y FM/VHF, utilizando los mismos canales y espectro asignado empleados actualmente. Una característica importante de este estándar es que es abierto, lo cual permite que los fabricantes tengan un mismo sustento para poder diseñar y fabricar equipo. La figura 2.1 muestra las bandas de frecuencia en las que trabaja DRM, el estándar describe una serie de modos de funcionamiento diferentes, los cuales se pueden dividir en dos grupos [DRM-11]:

- Modos DRM 30, los cuales están diseñados específicamente para ser utilizados en bandas de radiodifusión de AM por debajo de los 30 MHz.
- Modos DRM+, que utilizan el espectro de 30 MHz hasta la banda III de VHF, centrados en la banda de radiodifusión de FM.

El sistema DRM30 está diseñado para funcionar bajo los requerimientos de espectro existentes, por lo que se especificaron los anchos de banda de 9 kHz y 10 kHz para la señal. Además de estos anchos de banda compatibles con las actuales canalizaciones, DRM30 puede funcionar con la mitad del ancho de banda (es decir, 4.5 kHz y 5 kHz), o doble (18 kHz y 20 kHz) [HOFM-03]. Con la mitad del ancho de banda se facilita la transición entre la radio analógica y la digital, y se usa para el simulcast. Con el doble de ancho de banda se puede trabajar donde la canalización sea mayor a 10 kHz, como Oceanía o América, además pueden servir para unir dos canales analógicos para una sola transmisión digital. De esta forma se consiguen tasas binarias mayores y mayor calidad de audio.

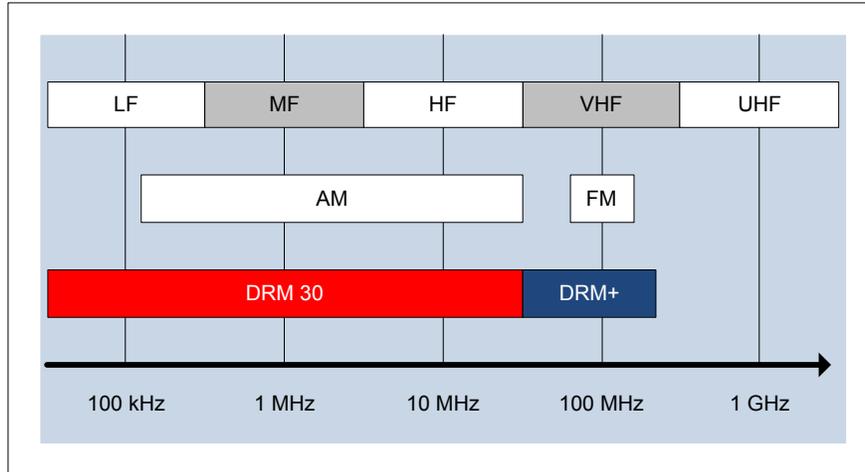


Figura 2.1. Bandas de frecuencia de DRM.

La modulación que utiliza DRM30 es COFDM con opciones para la modulación de portadoras en 4-QAM, 16-QAM o 64-QAM. Además, se usa el entrelazado temporal y técnicas de corrección de errores. Para facilitar la ecualización de la señal en recepción se añaden a la señal portadoras piloto específicas para la estimación de canal. DRM30 es muy flexible a la hora de definir los parámetros de modulación, de forma que se puedan adaptar lo mejor posible a los diferentes tipos de propagación existentes en las bandas de frecuencia por debajo de los 30 MHz.

En el caso de la codificación se puede elegir entre tres codificadores de audio de acuerdo a la calidad que se desee. El principal codificador es HE AAC v2 [ISO-14496] [MELT-06], que proporciona alta calidad para bajas velocidades binarias, incorpora las técnicas de replicación espectral de banda (SBR) y estéreo paramétrico (PS). Los otros codificadores son CELP (Code Excited Linear Prediction) y HVXC (Harmonic Vector eXcitation Coding). Estos dos codificadores son codificadores de voz de muy baja velocidad binaria, y sólo se pueden usar en programas de voz. Con el codificador AAC se consiguen calidades de audio similares a FM.

Además DRM30 es compatible con redes en frecuencia única y múltiple (MFN/SFN), pasar a otras frecuencias u otras redes, denominándose esto como (AFS – Automatic Frequency Checking & Switching) esta característica permite a los radiodifusores que operan con diversas plataformas tener la posibilidad de que sus oyentes pasen de DRM30 a AM, FM o DAB y viceversa.

2.2.2 Historia

El objetivo del Consorcio DRM (Digital Radio Mondiale) es soportar y difundir un sistema de radiodifusión digital apto para utilizar con todas las bandas de frecuencia hasta la banda III de VHF. En la actualidad el consorcio tiene 93 socios y 90 partidarios de 39 países activos en el consorcio.

El Consorcio DRM se estableció en Guangzhou, China, en 1997, con el objetivo inicial de digitalizar las bandas de emisión AM hasta 30 MHz (ondas larga, media y corta). Las

especificaciones del sistema DRM para la radiodifusión por debajo de 30 MHz (DRM30) las publicó por primera vez ETSI en 2001 para convertirlas en estándar en mayo de 2003.

Seguidamente, se publicó una serie de normas anexas de soporte, incluyendo un protocolo de distribución y comunicación. En el año 2003 la International Electrotechnical Commission dio al sistema DRM la clasificación de estándar internacional [IEC-03]. La UIT lo aceptó en 2002 a través de la Recomendación UIT-R BS-1514 [ITUBS-1514], con las características definidas por el estándar del IEC [ITUBS-1661]. En junio de 2003, durante la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR 2003) organizada por la UIT, se realizó la primera transmisión comercial diaria.

En 2005 se tomó la decisión de ampliar el sistema DRM para que incorporase modos diseñados para operar en las bandas de radiodifusión VHF. Esto requería añadir modos de alta frecuencia, lo que, tras un refinamiento mediante pruebas de laboratorio y de campo, resultó la publicación de las especificaciones DRM actuales (ampliadas) [ETSI-980]. Al nuevo sistema, que actualmente está en desarrollo, lo denominó DRM+. Con el sistema DRM+ se consigue dar solución a la digitalización de las bandas de radiodifusión más importantes existentes hoy en día.

2.2.3 Características técnicas

En esta sección se describen las diferentes etapas implicadas en el proceso de transmisión de una señal DRM. Se explican con detalle el funcionamiento de cada uno de los bloques que conforman la arquitectura del sistema.

Componentes del sistema

Existen dos tipos de datos a transmitir en el sistema DRM, que son la información relacionada directamente con el sistema DRM y la información de los servicios de audio o datos. El flujo de datos del sistema DRM se muestra en la figura 2.2, donde se observa la generación de los datos hasta formar el flujo de datos de transmisión. Cabe mencionar que el audio es la fuente principal de datos, habiendo además servicios añadidos que se transmiten en forma de datos indefinidos.

Los datos de los servicios se agrupan en el canal MSC (Main Service Channel), mientras que los datos propios de la señal DRM, la codificación de audio, el número de servicios, o la modulación utilizada se transmiten en los canales FAC (Fast Acces Channel) y SDC (Service Description Channel)

Tanto el codificador de audio como los precodificadores permiten que los datos de entrada se adapten al formato digital apropiado. Se pueden elegir dos niveles de protección a la salida del multiplexor para la codificación de los datos, considerando que los datos más importantes deben estar más protegidos.

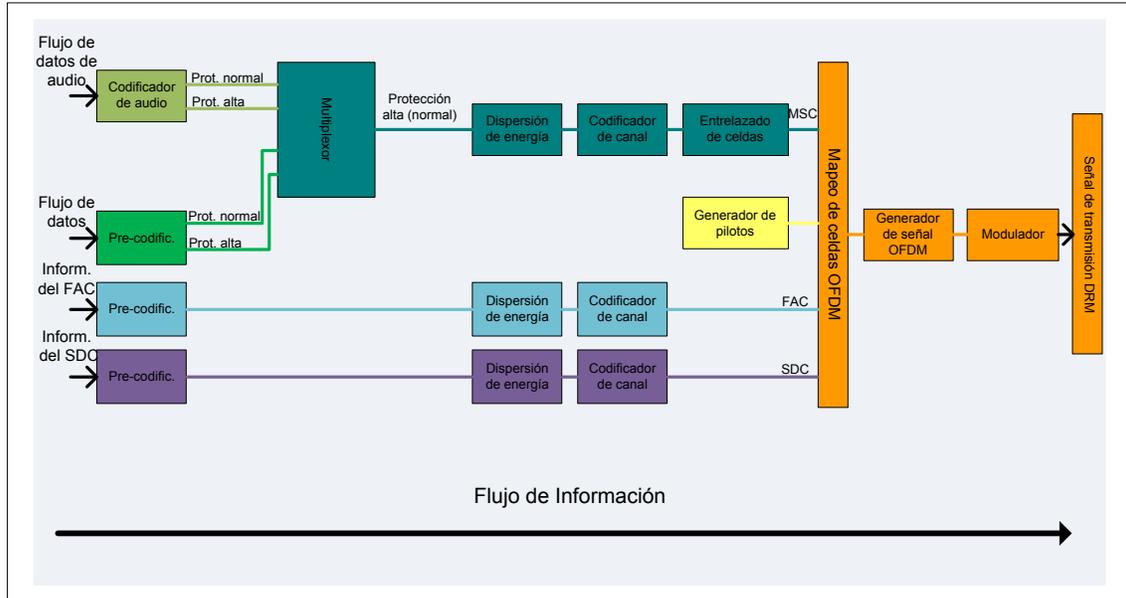


Figura 2.2. Diagrama de bloques de transmisión del sistema DRM.

La función del multiplexor es combinar los datos de todos los servicios, tanto de audio como de datos. El bloque de dispersión de energía provee una selección aleatoria de los bits, lo que reduce la posibilidad de que haya patrones de regularidad indeseados en la señal DRM. El bloque de codificación de canal agrega bits redundantes a los datos de una forma definida, de tal forma que provee los medios para la protección contra errores y la corrección. El bloque de entrelazado de celdas reordena la secuencia temporal de las celdas de una manera sistemática, por lo que la señal reconstruida finalmente en el receptor se ve menos afectada por los desvanecimientos rápidos. El generador de portadoras piloto genera portadoras con fase y amplitud conocida, lo cual permite que el receptor obtenga información acerca del canal de propagación, lo que permite la demodulación coherente de la señal.

El bloque de mapeo de celdas OFDM colecta las diferentes clases de celdas provenientes del MSC, FAC, SDC y portadoras piloto y las coloca en una red tiempo-frecuencia. El generador de la señal OFDM para convertir la señal DRM con los parámetros de transmisión requeridos. El modulador pasa la representación digital de la señal DRM a la señal analógica que será transmitida.

Codificación de Audio

Para permitir un equilibrio entre la calidad de audio y el número de servicios, el sistema DRM proporciona 3 codificadores de audio pertenecientes al estándar MPEG4. Los tres codificadores se pueden utilizar a diferentes tasas binarias.

AAC es el codificador más utilizado, ya que provee una calidad más alta, mientras que CELP y HVXC requieren tasas binarias más bajas, además de estar diseñados sólo para voz. Estos 3 codificadores se pueden mejorar utilizando la técnica de SBR. SBR (Spectral Band Replication), es una técnica de extensión del ancho de banda que permite a los codecs

de audio entregar la misma experiencia de audio en aproximadamente la mitad de la tasa binaria que el códec requeriría si trabajara sin ésta.

El codificador AAC permite dos frecuencias de muestreo, 12 kHz y 24 kHz, que sólo sirve para audio estéreo. A una tasa de muestreo de 12 kHz las tramas de audio duran 80 ms y con 24 kHz duran 40 ms. Las tramas de audio se agrupan en supertramas de audio con una duración de 400 ms, con ello se pueden tener 5 o 10 tramas de audio en una supertrama.

A estas bajas tasas de bits la calidad de audio se degrada, con lo cual se utilizan las técnicas de mejora que son el SBR y Parametric Stereo (PS). PS es una técnica que incrementa la eficiencia de codificación por segunda vez explotando una representación paramétrica de una imagen estéreo de una señal de entrada. La figura 2.3 indica los tipos de codificación mencionados a diferentes tasas binarias y para tres canales típicos.

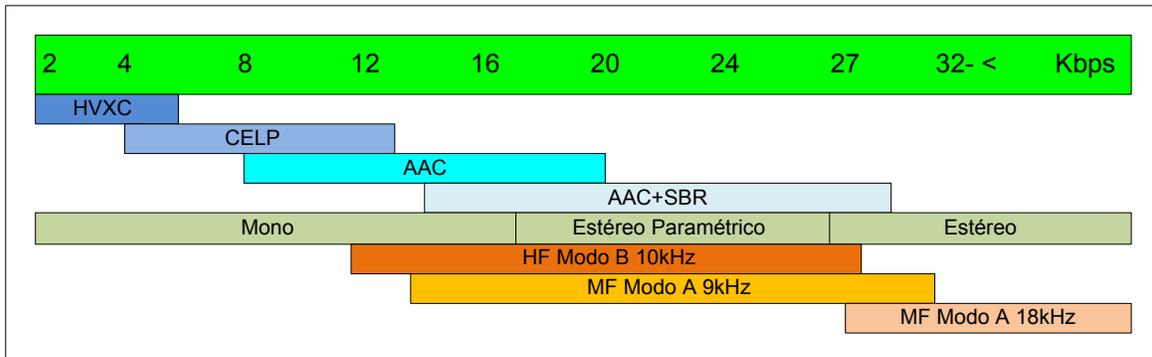


Figura 2.3. Codificadores de audio recomendados en función de las tasas binarias disponibles en DRM.

Múltiplex

El sistema DRM utiliza este componente del múltiplex para enviar las diferentes componentes de la señal y la información necesaria para que pueda sincronizarse con el receptor, reconociendo así los parámetros de la señal que se están utilizando y pueda decodificarlos correctamente. Los datos que se transmiten por la señal DRM se agrupan en los tres canales de datos siguientes:

- FAC (Fast Access Channel). Lleva la información para que la señal pueda ser decodificada, por lo tanto es el primer canal en ser decodificado por el receptor. Se decodifica rápidamente porque no tiene entrelazado, se transmite en el grupo fundamental de 4.5 kHz. En este canal se lleva la información acerca del ancho de banda de la señal, de la modulación del SDC, del entrelazado del MSC y del número y nombre de los servicios del MSC.
- SDC (Service Description Channel). Porta la información necesaria de cómo decodificar los servicios del MSC e información con otras frecuencias, horarios y regiones donde está disponible el mismo servicio o servicios relacionados. Utiliza una modulación menos compleja que el MSC para que se decodifique con una SNR menor.

- MSC (Main Service Channel). Es el canal que contiene la mayoría de los datos de la señal DRM, ya que lleva la información de los servicios. Puede tener entre uno y cuatro servicios, ya sea de audio o de datos.

Modulación y codificación de canal

DRM utiliza la modulación COFDM, que combina la modulación OFDM con codificación multinivel (MLC) basada en una codificación convolucional. A estos dos componentes se les agrega el entrelazado temporal y las portadoras piloto para la estimación de canal.

El sistema permite variar dos parámetros en la modulación OFDM, que son la longitud del intervalo de guarda y la separación entre portadoras. En el sistema se definen cuatro modos de robustez que contienen a su vez cuatro conjuntos de parámetros de la modulación OFDM. En la tabla 2.2 se pueden observar dichos parámetros para cada modo de robustez, donde se puede apreciar que mientras se avanza del modo A al modo D aumenta la robustez pero disminuye la tasa binaria disponible, además cada modo de robustez está diseñado para un tipo de canal de propagación, como se observa en la tabla 2.3.

MODO DE ROBUSTEZ	DURACIÓN DEL SÍMBOLO	INTERVALO DE GUARDA	SÍMBOLOS POR TRAMA	SEPARACIÓN DE SUBPORTADORAS
A	26.66 ms	2.66 ms	15	41.66 Hz
B	26.66 ms	5.33 ms	15	46.875 Hz
C	20.00 ms	5.33 ms	20	68.182 Hz
D	16.66 ms	7.33 ms	24	107.143 Hz

Tabla 2.2. Valores de los parámetros OFDM para los modos de robustez de DRM.

MODO DE ROBUSTEZ	CONDICIONES TÍPICAS DE PROPAGACIÓN		BANDA TÍPICA
A	Canales por onda de superficie con pocos desvanecimientos	Onda de superficie	LF, MF
B	Canales selectivos en tiempo y frecuencia con gran dispersión temporal	Onda Ionosférica	MF, HF
C	Con mayor dispersión temporal que el modo de robustez B	Onda Ionosférica (NVIS)	HF
D	Como el modo de robustez B pero con gran dispersión temporal y dispersión doppler	Onda Ionosférica (NVIS)	HF

Tabla 2.3. Usos de los modos de robustez de DRM.

Los símbolos del canal MSC se pueden modular en 64-QAM o en 16-QAM dependiendo del canal de propagación, mientras que los símbolos del canal SDC se pueden modular en 16-QAM o en 4-QAM. Los símbolos del canal FAC siempre se modulan con 4-QAM.

Al flujo binario se le agrega información redundante para protegerlo de errores. El valor del índice de codificación de la tabla 2.4 indica la fracción de información útil en el flujo binario total. Además se aprecia que los canales FAC y SDC tienen un nivel de protección fijo, mientras que para el canal MSC se puede escoger entre varias opciones.

CANAL	MODULACIÓN	ÍNDICE DE CODIFICACIÓN	NIVEL DE PROTECCIÓN
FAC	4-QAM	0.6	-
SDC	4-QAM	0.5	-
	16-QAM		-
MSC	16-QAM	0.5	0
		0.62	1
	64-QAM	0.5	0
		0.6	1
		0.71	2
	0.78	3	

Tabla 2.4. Índices de codificación y niveles de protección correspondiente.

Se utiliza además el entrelazado temporal, el cual sirve para darle mayor robustez a la señal DRM frente a desvanecimientos temporales y ruido impulsivo. Se puede manejar el entrelazado corto, de 400 ms y el entrelazado largo de 2 s.

El conjunto de parámetros definidos para el modo de robustez, el ancho de banda de la señal, la modulación de los canales MSC y SDC, el nivel de protección de ambos canales y el entrelazado, definen el modo de transmisión DRM, dando al sistema una gran flexibilidad para adaptarse a diferentes tipos de propagación y distintos planes de frecuencia.

Señal DRM

En la figura 2.2, donde se explica la generación de la señal DRM mediante un diagrama de bloques, en la práctica algunos bloques pueden aparecer en distinto lugar físicamente y el formato de audio varía de equipo a equipo, del estudio de grabación a los enlaces y de éstos al modulador. La codificación de audio en un formato y los cambios de dicho formato recaen de forma negativa en la calidad de audio.

El grupo de protocolos de DRM permiten que el audio se codifique rápidamente en la cadena de transmisión y no se vuelva a codificar ni decodificar hasta que llegue al receptor, evitando así efectos negativos en la señal. Estos protocolos incluyen aparte de los datos de los servicios, datos de configuración, datos propios de la señal DRM y datos de estado de los equipos. Existen cuatro categorías de datos asociados a los protocolos de datos:

- MDI (Multiplex Distribution Interface). Contiene los datos y comandos del multiplexor de DRM hacia el modulador. Los datos son todo el múltiplex de DRM, incluyendo el MSC, el SDC, el FAC y los comandos. Toda la información necesaria para configurar el modulador.
- MCI (Modulator Control Interface). Lleva la información remota de los comandos y las configuraciones al modulador y al transmisor, con ello se puede controlarlos de forma remota. La información del MCI se encuentra dentro del flujo de datos del MDI.
- SDI (Service Distribution Interface). Sirve para enviar los datos y comandos desde el estudio o cualquier otra fuente al multiplexor.

- RSCI (Receiver Status and Control Interface). Protocolo que lleva la información del múltiplex, la información de control y de estado del receptor.

2.2.4 Pruebas del sistema DRM

El sistema DRM se ha probado tanto con pruebas de campo como de laboratorio durante varios años, a continuación se mencionan resumidamente las más importantes.

Las pruebas de laboratorio las realizaron miembros del consorcio DRM, las primeras pruebas fueron en 1999 por el Instituto Fraunhofer donde se calcularon los valores de relación señal a ruido por bit (E_b/N_0) para obtener un BER de 10^{-4} para distintos modos de transmisión y canales de propagación [SCHI-99]. Además se probaron distintas configuraciones de transmisión con respecto a varios valores de dispersión temporal y frecuencial. Dichos valores se contemplaron en el estándar de DRM [ETSI-980].

Para el año 2000 fueron las segundas pruebas de laboratorio [SCHL-00], con el objetivo de elaborar un informe de las características del sistema para la UIT. Se probaron tres canales de transmisión que se llamaron “ground wave”, “sky-mode64” y “sky-mode16”, en estas pruebas se definieron configuraciones de transmisión óptimas para cada canal de transmisión y se calcularon las relaciones de protección entre AM y DRM. Del receptor se realizaron pruebas correspondientes al sistema de captura, de procesado y registro de medidas. Estos resultados se emitieron a la UIT-R para la elaboración de una recomendación sobre sistemas de radio digital para frecuencias por debajo de 30 MHz [ITUBS-1615].

Las primeras pruebas de campo se realizaron en el año 2000 con el proyecto RADIATE (Radio Digital Am TEsts) con el objetivo de estudiar la fiabilidad del sistema en todas las bandas de frecuencias en las que está definido. Las pruebas de este proyecto lograron examinar diversos usos y aplicaciones del sistema DRM, como son onda corta a larga distancia, NVIS, SFN en onda media y 26 MHz, y simulcast en onda media. Todas estas pruebas fueron de corta duración, apenas de unos cuantos días. Se entregó un resumen de los resultados a la UIT [ITU 6E/54E] y posteriormente a la EBU [BRIG-03]. Además de este proyecto, se han realizado muchas pruebas por el Consorcio DRM, las cuales no serán detalladas porque no son relevantes para este trabajo de investigación.

2.3 DRM+ - Extensión del estándar DRM

El sistema DRM+ está basado fundamentalmente en el sistema DRM30, comparten la misma modulación, codificación y señalización, adicionando las condiciones de propagación y el entorno normativo de las bandas de frecuencia altas, dando como resultado este nuevo modo de robustez (E).

DRM+ fue desarrollado después de que el consorcio DRM votó unánimemente en 2005 para extender el sistema DRM y cubrir las bandas de frecuencia altas y por lo tanto hacer frente a las llamadas por un sistema digital diseñado para adaptarse a la forma de atribución

de las frecuencias de radiodifusión analógica utilizada en todo el mundo. Dicho espectro no incluye sólo las bandas de FM internacionales de 87.5 a 108 MHz, sino también la banda de FM japonesa de 76 a 90 MHz, la banda de FM OIRT de 65.8 a 74 MHz, además el sistema puede ser utilizado en la banda de 47 a 68 MHz cercana a la banda de televisión donde las administraciones desean darle un nuevo uso.

2.3.1 Características técnicas

Como se ha mencionado el sistema DRM+ comparte los fundamentos técnicos del sistema DRM30, para lo cual se describe a continuación de manera resumida las características técnicas más importantes.

DRM+ trabaja a frecuencias de 30 a 174 MHz con un ancho de banda de 100 kHz, definido como el modo de robustez E (canales selectivos en tiempo y frecuencia). Utiliza el estándar industrial de codificación de audio HE AAC v2, común entre los sistemas de radio digital. En la tabla 2.5, se indican los valores de los parámetros OFDM de DRM+.

Periodo de tiempo elemental T	83 1/3 μ s
Duración de la parte útil $T_u = 27 \cdot T$	2.25 ms
Duración del intervalo de guarda $T_g = 3 \cdot T$	0.25 ms
Duración del símbolo $T_s = T_u + T_g$	2.5 ms
T_g/T_u	1/9
Duración de la trama de transmisión T_f	100 ms
Número de símbolos por trama N_s	40
Ancho de banda del canal B	96 kHz
Espacio entre portadoras $1/T_u$	444 4/9 Hz
Espacio entre número de portadoras	$K_{\min} = -106; K_{\max} = 106$
Portadoras sin uso	No

Tabla 2.5. Parámetros OFDM de DRM+.

En cuanto a la codificación de fuente se tiene la posibilidad de MPEG surround 5.1, con una frecuencia de muestreo de audio de 24 y 48 kHz (éste último sólo sin SBR). Trama de audio de 40 ms (24 kHz) y 20 ms (48 kHz) y supertrama de audio de 200 ms (5 ó 10 tramas respectivamente) sin estéreo paramétrico. El sistema utiliza entrelazado de 600 ms con una trama de transmisión de 100 ms y supertrama de transmisión de 400 ms. Los canales del sistema se pueden modular de la siguiente manera descrita junto con sus respectivas tasas de código. En la tabla 2.6 se define el canal SDC y en la tabla 2.7 los modos para MSC.

Modo-MSC 11 (4-QAM)		Modo-MSC 00 (16-QAM)	
Modo-SDC	Tasa de código R	Modo-SDC	Tasa de código R
0	0.5	0	0.5
1	0.25	1	0.25

Tabla 2.6. Tasas de código SDC.

Nivel de protección	Tasa de código R para modo MSC 11: 4-QAM		Combinaciones de tasa de código R para el modo MSC 00: 16-QAM			
	R_{all}	R_0	R_{all}	R_0	R_1	RY_{lcm}
0	0.25	1/4	0.33	1/6	1/2	6
1	0.33	1/3	0.41	1/4	4/7	28
2	0.4	2/5	0.5	1/3	2/3	3
3	0.5	1/2	0.62	1/2	3/4	4

Tabla 2.7. Tasas de código MSC.

La tasa de bits del MSC varía de 37 kbps a 186 kbps dependiendo del parámetro utilizado. Muchos de los parámetros dependen de la característica de la señal DRM a transmitir, para limitar la cantidad de pruebas, se determinaron dos parámetros típicos básicos, ver tabla 2.8.

Modo MSC	11-4-QAM	00-16-QAM
Nivel de protección MSC	1	2
Tasa de código R para MSC	1/3	1/2
Modo SDC	1	1
Tasa de código R para SDC	0.25	0.25
Tasa de bits aproximada	49.7 kbps	149.1 kbps

Tabla 2.8. Tasas de código utilizadas para pruebas.

2.3.2 Pruebas del sistema DRM+

Las primeras pruebas comenzaron con un modelado matemático extenso del rendimiento del sistema a partir de los procesos que llevaron a los sistemas digitales A y C. posteriormente se llevaron a cabo pruebas de laboratorio utilizando un simulador de desvanecimiento de canal utilizado para determinar la capacidad del sistemas bajo todas las condiciones, fueron utilizados seis tipos de canal para asegurar que siendo una situación urbana, rural, terreno obstruido, terreno montañoso o una red de frecuencia única el sistema proveerá fiabilidad y robustez con una intensidad de campo menor que la requerida para FM.

Desde 2007 se han desarrollado pruebas de campo principalmente en la Universidad de Hanover y Kaiserslautern, Alemania, en colaboración con muchas compañías emergentes como el Instituto Fraunhofer, Robert Bosch, Dolby, RFMondiale. El mayor énfasis de estas pruebas ha sido la banda II (87.5 a 108 MHz), aunque se han realizado pruebas en otras bandas.

En mayo del 2009 en un congreso internacional de sistemas de radiodifusión realizado en Bilbao, España, se entregó un documento a la IEEE, donde se discuten los resultados de compatibilidad del sistema DRM+ y FM, dichos resultados están basados en estudios teóricos, pruebas de laboratorio y de campo y ejercicios de planeación. Lo importante de estas pruebas es la demostración de la compatibilidad con un sistema de radiodifusión analógico, considerando ciertas condiciones técnicas como la relación de protección para evitar la interferencia entre un sistema y otro [STEI-09] [DRM-10].

La universidad de Hanover realizó un reporte de pruebas de campo en marzo del 2010 [MAIE-10]. El trabajo describe pruebas que fueron realizadas en la ciudad de Hanover en un ambiente rural, con mediciones de intensidad de campo, BER, SNR, por lo que de acuerdo al estatus del audio el modo 4-QAM con una tasa de código de 0.33 muestra una buena calidad de audio en la recepción disminuyendo la intensidad de campo alrededor de 30 dB μ V/m y un SNR de 10 dB. Para el caso del modo 16-QAM la recepción fue posible con una intensidad de campo de aproximadamente 46 dB μ V/m y un SNR de 18 dB. Con DRM+ se necesita menor intensidad de campo en comparación con FM estéreo cuyo valor es de 66 dB μ V/m en un ambiente urbano a una altura de 10 m (+10 dB a una altura de 1.5 m) [ITUBS-412].

En junio y julio del 2009 se realizó una demostración del sistema en Paris, Francia, donde se hicieron además algunas pruebas no formales. La señal DRM+ fue difundida en la frecuencia de 64.5 MHz, banda I, y se colocó el receptor a 10 km, obteniendo una buena intensidad de señal con tan sólo 400 W de potencia radiada. Esto afirma que el sistema es una buena solución para las radiodifusoras que no pueden unirse a un múltiplex, incluso en lugares donde la banda de FM está llena [DRM-09].

Dos días antes del taller de DRM+ realizado en Colombo, Sri Lanka, en diciembre del 2010, se realizó una campaña de pruebas móviles con el objetivo de mostrar la capacidad del sistema en la banda II de VHF [DRM6A/503]. En estas pruebas fue posible realizar una buena recepción de calidad de audio con aproximadamente 35 dB μ V/m. el área de cobertura se extendió hasta entre 5 y 10 km con 47 W de potencia transmitida.

Durante enero a abril del 2011 Radio María llevó a cabo una serie de pruebas de campo del sistema DRM+ en la banda I (55.8 MHz), en la región norte de Italia incluyendo la ciudad de Turín. El sistema fue probado en un ambiente de recepción típica con una gran variedad de condiciones de recepción. Las pruebas se realizaron sobre 3 rutas con una longitud total de 68 km. El 90% de la ruta presentó excelente recepción, se cubrieron las partes urbanas perfectamente, con algunas excepciones donde la cobertura se pierde debido a los túneles. Se obtuvo un umbral de SNR en el rango de 10 a 13 dB. La cobertura fue de aproximadamente 30 km con una potencia de 40 W [DRM6A/512].

El consorcio DRM llevó a cabo una prueba de campo de potencia alta del sistema DRM en la banda de FM [DRM6A/532]. Esto se realizó en la ciudad de Edimburgo en el Reino Unido durante enero a mayo del 2011 con el objetivo de realizar observaciones y medidas de la capacidad del sistema para realizar un reporte que atribuya a la aceptación del sistema DRM como sistema digital G en la recomendación ITU-R BS. 1114.

La prueba mostró que el sistema DRM+ es capaz de proveer excelente cobertura con buena calidad de audio y reduciendo los niveles de potencia en comparación con FM y como se esperó el modo 4-QAM fue más robusto que 16-QAM, la cobertura urbana fue superior que FM, en área rural la cobertura fue también excelente aunque debido al terreno hubo algunas fallas.

3 DISEÑO DE PRUEBAS

3.1 Introducción

El diseño de pruebas para determinar la eficiencia del sistema DRM+ es el principal objetivo de este trabajo, en este capítulo se describe la forma en la cual inicialmente se investigaron las características técnicas de 3 radiodifusoras y la elección de una de ellas para desarrollar el protocolo de pruebas. Al inicio se describen los modos de recepción que existen y la elección de la configuración de transmisión necesaria para poder transmitir FM y DRM+.

Además se detallan las pruebas necesarias, la forma de realizarlas y el equipamiento necesario, todo ello con el objeto de presentar una base de pruebas para una posible implementación futura de un sistema de radio digital que pueda emigrar gradualmente trabajando conjuntamente con la radiodifusión analógica.

3.2 Definición de los objetivos de las pruebas

Una forma útil de caracterizar el rendimiento de un transmisor DRM es con la medida del MER (Modulation Error Ratio). Cada transmisor debe ser capaz de ajustarse a la máscara de espectro DRM y al límite de MER al mismo tiempo. Es por ello que es esencial la medición de este parámetro.

Una prueba importante que se tiene que realizar es la medida de la disponibilidad de tramas de audio, de esta manera se tiene un registro del número de tramas recibidas con y sin error, lo cual ayuda a definir la calidad de recepción.

Medición de la intensidad de campo, debido a las condiciones de recepción local, los valores reales de este parámetro pueden variar considerablemente con respecto a sus valores previstos; por lo tanto, estos valores deben de comprobarse a través de mediciones para establecer la cobertura radioeléctrica de la intensidad de campo de una zona extensa.

Además se debe realizar la medición de la relación señal a ruido, indispensable para determinar la calidad o degradación de la señal en el receptor. A continuación se presentan de manera general las pruebas con sus respectivos objetivos definidas en este protocolo (Tabla 3.1), las cuales se explican de manera detallada más adelante.

Prueba	Objetivo
Medición de intensidad de campo.	Calcular un umbral de intensidad de campo práctico y definir la cobertura del sistema.
Detección de transmisiones adyacentes y cocanal.	Asegurar que las transmisiones de DRM+ no afecten a terceros y viceversa.
Comprobar que no haya productos de intermodulación ni emisiones fuera de banda.	Del mismo modo el aseguramiento de no interferencias a otras bandas hacia arriba y hacia abajo.
Medición con el transmisor y una carga de prueba.	Determinar que salga una buena señal del transmisor.
Comparación del audio recibido con un audio pregrabado.	Calcular la degradación del audio recibido.
Monitoreo de la señal de audio en tiempo real.	Identificar el efecto de los errores (si el audio se escucha mal con los errores presentados).
Grabar y decodificar todos los parámetros.	Realizar un análisis posterior a las pruebas. (Definir qué parámetros se han de grabar).
Medición móvil de intensidad de campo dentro de centros comerciales.	Calcular la degradación de la señal dentro de un ambiente con ruido.
Medición de intensidad de campo con portátiles.	Definir la calidad de recepción en aparatos portátiles.
Medidas de intensidad de campo en interiores de edificios.	Calcular la degradación de la señal, qué tanto se atenúa la señal dentro de edificios.
Comparación de medidas principalmente en los dos modos 4-QAM y 16-QAM.	Calcular los umbrales de campo para las dos combinaciones de los modos.
Medidas en rutas que crucen ciertas zonas de la ciudad.	Comparar la recepción por zonas de la ciudad, cambiando el modo de modulación entre 4-QAM y 16-QAM.
Medida de la tasa de error de modulación (MER)	Calcular la degradación de la señal.
Medidas bajo túneles.	Comprobar la posible no recepción de la señal.

Tabla 3.1. Objetivos de las pruebas a realizar.

3.3 Definición de modos de recepción

Cabe señalar que existen diferentes modos de recepción, los cuales definen las distintas condiciones ambientales en las que se puede llevar a cabo una recepción de la señal DRM. Estos diferentes modos provocan la realización de distintos tipos de pruebas, ya que, no es lo mismo recibir una señal en recepción fija que móvil dentro de un auto, o mediante un dispositivo portátil dentro de una tienda comercial, es por ello esencial definir los distintos modos de recepción.

Recepción Fija (FX)

Está definida como una recepción donde la antena receptora está montada sobre el techo, esto porque ahí se asumen las condiciones de recepción más cercanas a la realidad. Al calcular los niveles de intensidad de campo para la recepción de antena fija se considera

una altura de 10 m sobre el nivel de la tierra como un valor representativo para el servicio de radiodifusión [ITU-GE06]. Se maneja una probabilidad de ubicación del 70% para obtener una situación de buena recepción.

Recepción Portátil

En general, la recepción portátil es una recepción donde se utiliza un receptor con una antena adjunta o al aire libre en interiores o exteriores y a una altura de no más de 1.5 m sobre el nivel del suelo. Una probabilidad de ubicación del 95% es utilizada para obtener una buena recepción. Se tienen dos lugares distintos de recepción:

- Recepción en interiores, con un lugar de recepción dentro de un edificio.
- Recepción en exteriores, con una recepción fuera de un edificio.

Dentro de estos lugares de recepción aparecen dos condiciones opuestas de recepción que se distinguen por su gran variabilidad de situaciones de recepción portátil con diferentes tipos de antena-receptor, además de diferentes condiciones de recepción:

- Recepción portátil: esta situación modela una recepción bajo buenas condiciones tanto en interiores como en exteriores, con un receptor de antena VHF omnidireccional.
- Recepción portátil de mano: situación de recepción bajo malas condiciones de recepción y un receptor con antena externa.

Recepción portátil en interiores (PI)

Esta recepción está definida por un receptor portátil con un suministro de energía fijo y una antena plegada o con una entrada para una antena externa. El receptor es utilizado en el interior a no menos de 1.5 m sobre el nivel del suelo en habitaciones de planta baja y con una ventana en algún muro exterior. Se asume que las mejores condiciones de recepción se alcanzan moviendo la antena hasta 0.5 m en cualquier dirección y el receptor sin mover durante la recepción, y los objetos de gran tamaño cercanos al receptor de la misma forma dejar inmóviles. Se considera un área suburbana.

Recepción portátil en exteriores (PO)

Se utiliza un receptor portátil con alimentación de batería y una antena adjunta, el cual es utilizado en exteriores a no menos de 1.5 m sobre el nivel del suelo. En este caso se considera un área suburbana.

Recepción portátil de manos (PI-H, PO-H)

Recepción mediante un receptor de mano portátil con suministro de batería y una antena externa, para ambas situaciones en interiores y exteriores. Se considera un área urbana.

Recepción Móvil (MO)

Se considera una recepción en movimiento a alta velocidad con una antena situada a no menos de 1.5 m sobre el nivel del suelo. Se considera un área rural con terreno montañoso.

3.4 Selección de la estación transmisora

3.4.1 Introducción

Se realizaron visitas a diversas radiodifusoras con el objetivo de realizar un exhaustivo estudio acerca de las condiciones técnicas de la estación, con ello se logró tener el acceso a las estaciones de Radio UNAM (96.1 MHz), estaciones del IMER (Instituto Mexicano de la Radio, 94.5, 107.9 y 105.7 MHz) y Radio Ibero (90.9 MHz). El primer acercamiento fue con Radio UNAM, siendo esta la estación de nuestra propia universidad, y partiendo de ello se consideró que sería fácil el convencimiento de participación en el proyecto. Además de que se tenía conocimiento del lugar de transmisión, el cual se encuentra en el Ajusco de la Ciudad de México, esto porque es importante dentro del estudio conocer la cobertura del sistema desde distintos lugares de la Ciudad.

El segundo caso fue el IMER, donde por ser una institución de carácter estatal se pensó en que de igual manera no habría un rechazo al proyecto, el lugar de transmisión de las 3 estaciones de FM que tiene se encuentra en el cerro del Chiquihuite, al norte de la Ciudad de México.

Finalmente se tuvo un acercamiento a la Universidad Iberoamericana, en donde se dio la facilidad, y se realizó la visita a las instalaciones que se encuentran en Santa Fe.

En cada estación tanto en la UNAM, IMER y la Universidad Iberoamericana se logró tener acceso al lugar de transmisión, donde se observó el equipo de transmisión y se recabó la información necesaria para realizar un criterio de selección.

Para realizar un análisis acerca de qué estación podría ser mejor para desarrollar el protocolo de pruebas para DRM+, se realizó inicialmente la actividad de recabar información mediante fichas técnicas, posteriormente se hará uso de Radio Mobile para realizar una predicción de cobertura de acuerdo a los parámetros de transmisión que presentan las distintas radiodifusoras.

3.4.2 Configuraciones posibles de transmisión de DRM+

El sistema DRM+ puede utilizar una variedad de configuraciones para instalaciones existentes o nuevas para poder funcionar. En todos los sistemas de transmisión digital con una amplitud no constante, los amplificadores necesitan ser lo más lineales posible para ofrecer el mejor rendimiento del sistema. Un posible arreglo es utilizar un amplificador lineal clase A o de preferencia uno de clase AB.

Para un solo transmisor de DRM+, la arquitectura típica es muy sencilla como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.1. El programa de audio y la información digital adicional son combinados en el servidor de contenidos e insertados posteriormente en el modulador sobre el flujo de datos MDI. El modulador DRM+ provee una señal de salida modulada que es conectada directamente al amplificador de potencia. El espectro de salida es similar al que se muestra junto con la máscara del espectro DRM+ superpuestos en la figura 3.2a.

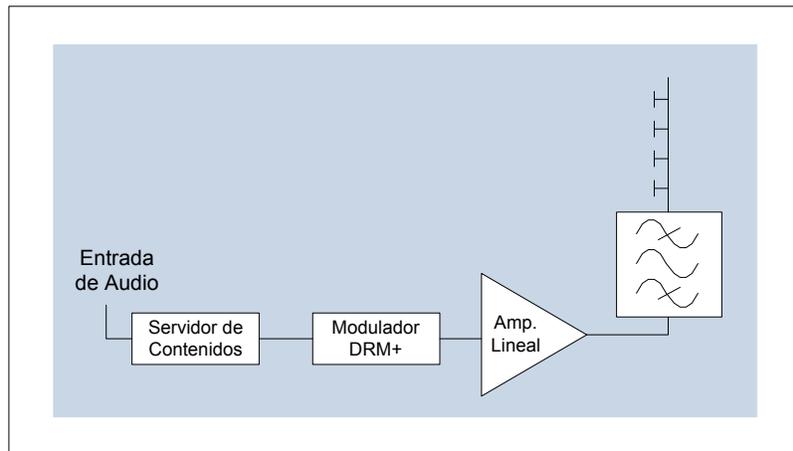


Figura 3.1. DRM+ con un amplificador de potencia lineal.

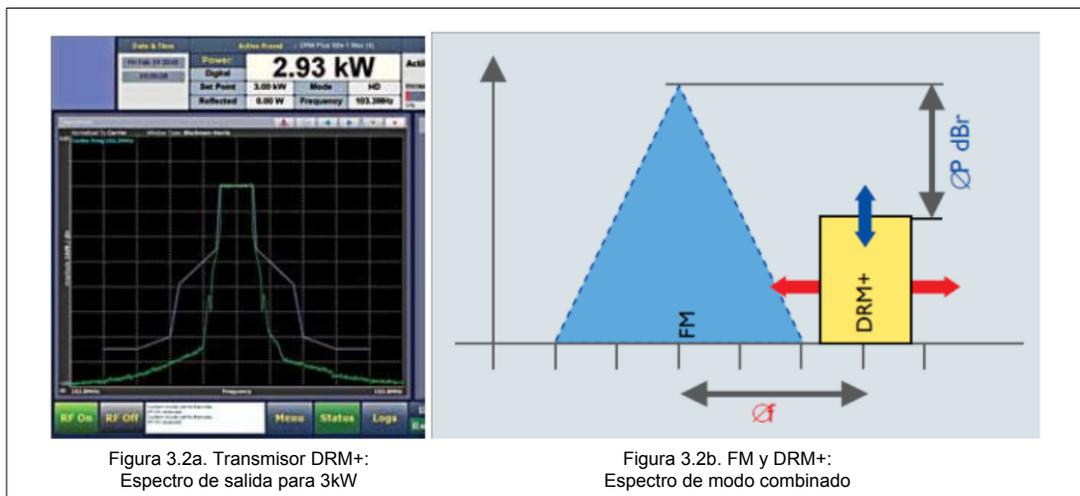


Figura 3.2a. Transmisor DRM+: Espectro de salida para 3kW

Figura 3.2b. FM y DRM+: Espectro de modo combinado

Figura 3.2. Espectro de DRM+ y FM en modo combinado junto con el espectro de salida de DRM+.

DRM+ en Modo Simulcast

También es posible tener una configuración mixta de la señal DRM+ con una instalación de FM ya existente. En el caso del modo combinado, donde DRM+ tiene que ser agregado en una transmisión analógica existente. La figura a y b muestran el espectro de salida de una transmisión DRM+ y las dos variables principales (desplazamiento de frecuencia y amplitud relativa) para el alojamiento de DRM+ junto con FM.

Existen tres maneras de combinar las señales tanto analógicas como digitales, las primeras dos son una combinación de alto nivel, las cuales son utilizando un acoplador direccional y mediante antenas separadas; la tercera es una combinación de señal de bajo nivel. A continuación se describen dichas formas de combinación.

Combinación de acoplador direccional

Las señales de DRM+ y FM son combinadas utilizando un acoplador híbrido después de dos amplificadores de potencia (Figura 3.3). El factor de acoplamiento se escoge para alcanzar la óptima relación entre la pérdida de potencia en el canal de FM, y el valor (potencia nominal) del amplificador DRM+. El valor de acoplamiento es generalmente en el rango de 6 a 10 dB. (Ver tabla 3.2).

Modo	FM salida RF (kW)	DRM+ Tx rating (-10dB relativo a FM) (kW)	Reducción de potencia FM	Eficiencia total (Mains to RF, indicative)
Solo FM	10	-	0 %	64
6 dB acoplador-combinador	7.5	3	25%	44
10 dB acoplador-combinador	9	9	10%	36
Combinador en el aire	10	1	0%	56

Tabla 3.2. Opciones del combinador DRM+.

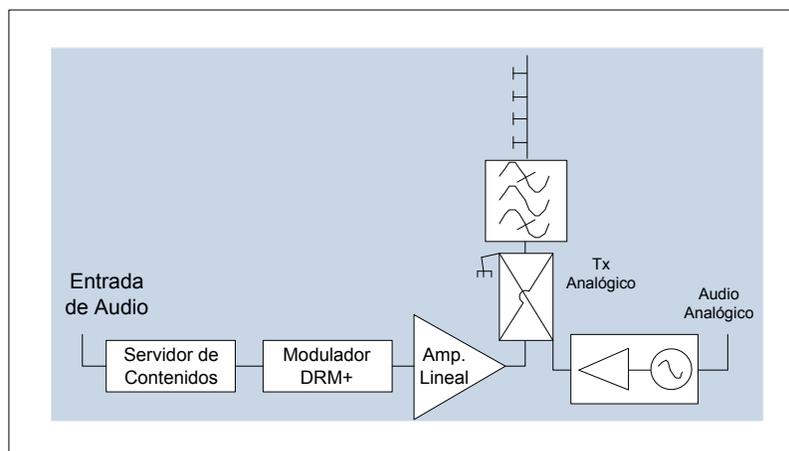


Figura 3.3. Modo combinado DRM+ con potencia RF combinada.

Parte de la potencia de transmisión se pierde en la carga de prueba conectada al acoplador híbrido, pero la ventaja es que los bloques analógico y digital son completamente independientes en la operación.

Modo combinado con antenas separadas

Funciona utilizando dos antenas para diferentes señales, una para la señal DRM+ y otra para la señal FM (ver figura 3.4). Las dos antenas deben estar idealmente sobre el mismo mástil y tener patrones de radiación similares con el fin de mantener la relación de amplitud entre la señal digital y la señal analógica. Desde un punto de vista de consumo de energía, esta es la forma más eficiente de operar en un modo combinado (ver tabla 3.2). Pero esto no garantiza que el nivel de potencia entre la transmisión analógica y digital se mantenga constante como sucede en condiciones multitraectoria.

Otra versión es utilizar un mezclador, o una antena de polarización circular con entradas independientes que se alimenten de elementos de polarización Vertical y Horizontal (Ver Figura 3.5). Nótese que en condiciones de multitraectoria, ninguna de las opciones anteriores garantizan que el nivel de potencia entre la transmisión analógica y digital permanecerá completamente constante.

DRM+ configuración del modo combinado (combinación de nivel de señal)

Es posible también combinar las señales de FM y DRM+ antes del amplificador de potencia como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.6. Para este modo el amplificador debe ser modificado o diseñado específicamente para poder alojar las dos señales sin generar productos de intermodulación excesivos.

En esta configuración la señal DRM+ y la señal de FM son combinadas antes del amplificador. El acoplamiento se hace a un nivel de señal bajo y las pérdidas de energía en la carga de prueba (artificial) conectada al acoplador híbrido son insignificantes.

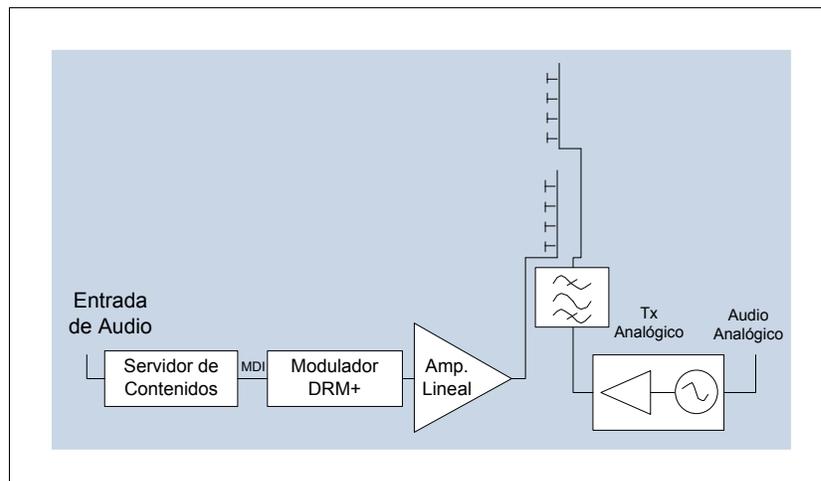


Figura 3.4. DRM+ modo combinado (acoplamiento de antena).

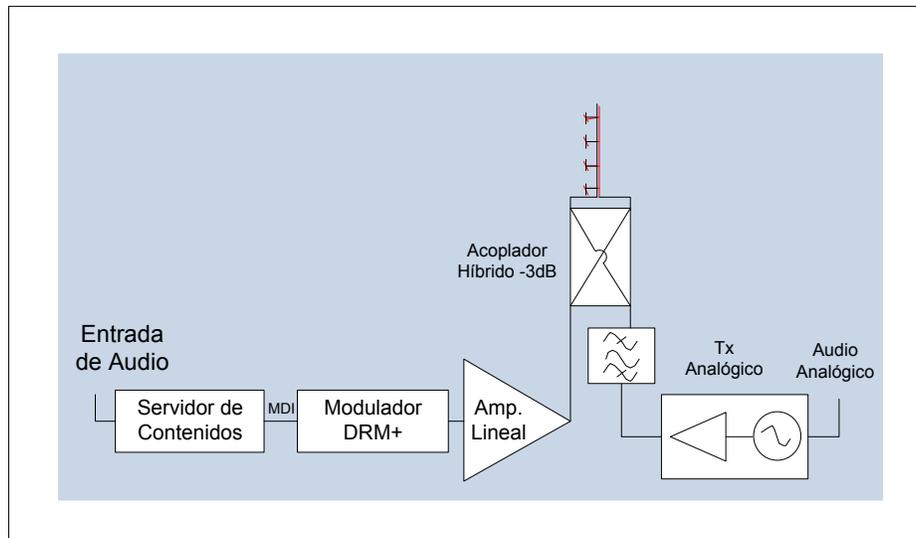


Figura 3.5. Modo combinado DRM+ con acoplador híbrido y antena de dos polarizaciones cruzadas.

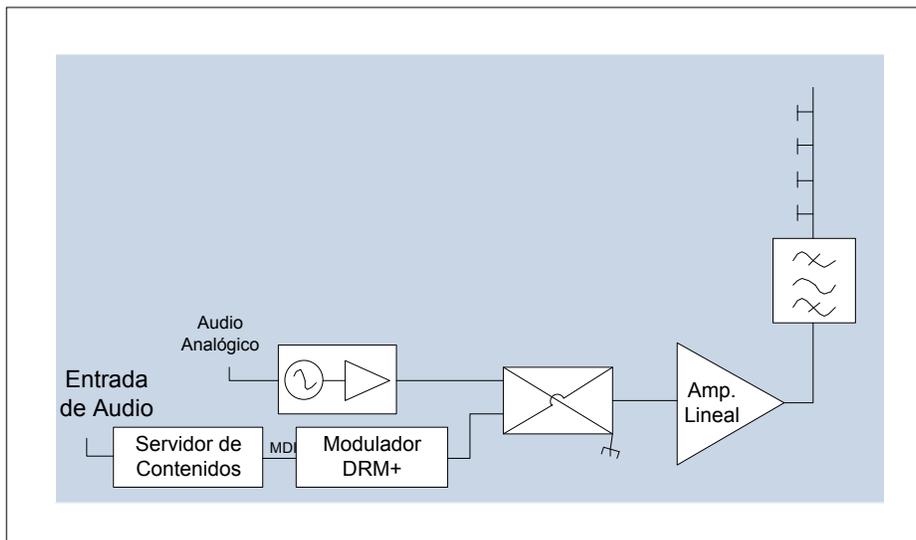


Figura 3.6. Combinación de DRM+ y FM a nivel de señal bajo.

Máscara de espectro DRM+

Para transmitir DRM+ en las bandas existentes y junto con otras transmisiones se han definido niveles de protección y una máscara del espectro de la señal transmitida. Una radiodifusora debe sintonizar todos los parámetros perfectamente para mantenerse dentro de la máscara, evitando de esta manera provocar interferencia con otras transmisiones y maximizando la cobertura de su propia transmisión.

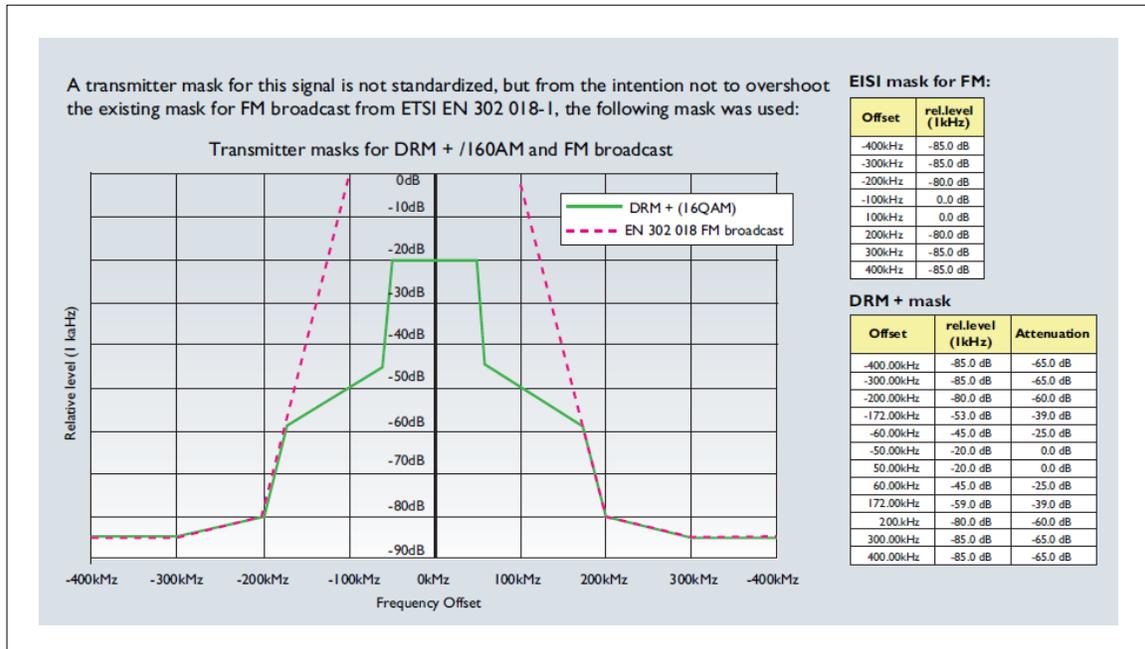


Figura 3.7. Máscara de espectro para una transmisión DRM+ y FM.

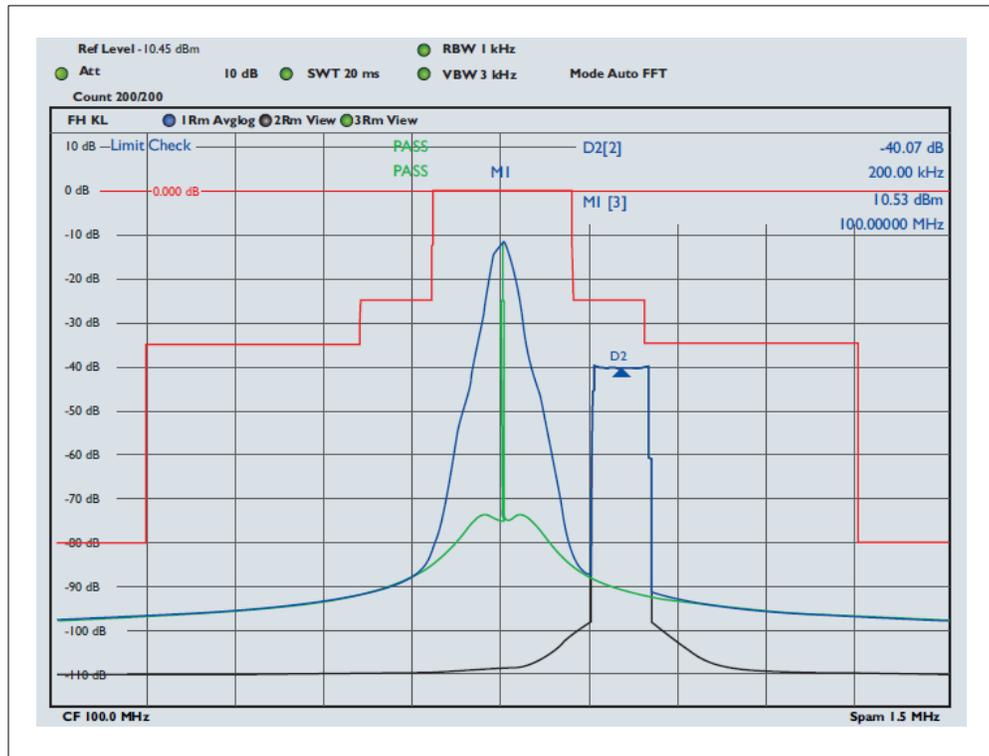


Figura 3.8. Imagen del espectro de DRM+ en modo combinado.

3.4.3 Radio UNAM

Radio UNAM es una estación de radio perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual tiene como objetivo difundir la cultura musical y el pensamiento en beneficio de la comunidad universitaria y la sociedad en general.

Las instalaciones administrativas y el estudio de grabación se encuentran en la Colonia del Valle, Delegación Benito Juárez, y de ahí se envían los contenidos por medio de un radio enlace al transmisor, ubicado en el Ajusco. La tabla 3.3 muestra las características técnicas de dicha estación.

La geografía física de la ubicación del transmisor de Radio UNAM incluye colinas rocosas suavemente onduladas que complican los servicios de radio, incluyendo multitrayectoria. En la figura 3.9 se presenta la ubicación del transmisor.

El servicio de FM utiliza dos sistemas de antenas con polarización circular, uno es el sistema principal y el otro es el sistema de respaldo para momentos de emergencia, útil cuando el sistema principal por alguna razón deja de funcionar. Utiliza la frecuencia de 96.1 MHz, con una potencia radiada efectiva de 100 kW. Como se observa en la figura 3.10, el sistema principal es un arreglo de 6 antenas tipo penetrator con ganancia de 5.05 dBd.

La antena Jampro que se utiliza posee optimización de patrón de radiación, es decir, está controlado hacia una dirección óptima, ya que en la parte trasera tiene unos reflectores en forma de “v”. Esta configuración es ideal para aquellas zonas en las cuales no se desee irradiar (ríos, cerros, lagos, áreas desérticas), direccionando toda la potencia del transmisor a zona útil.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE OPERACIÓN	
Radio UNAM Frecuencia: 96.1 MHz Localización de la estación: Latitud: 19°16'9.11"N Longitud: 99°12'24.10"O Altitud: 2619 m	
TRANSMISOR Fabricante: Harris Modelo: HT 35FM Potencia Nominal: 35 kW Potencia de Operación: 32 kW Excitador FM: Harris DIGIT CD Digital Impedancia de carga: 50 Ohms	ANTENA Fabricante: Jampro Antenas Modelo: JHPC-6 (6 elementos) Polarización: Circular, sentido horario Patrón de radiación: Direccional Ganancia: 5.05 dBd Altura sobre la tierra: 76 m
LÍNEA DE TRANSMISIÓN Fabricante: Andrew Modelo: heliax 3/8 “ Longitud: 106 m Impedancia: 50 ohms Atenuación total de la línea: 0.376 dB	POTENCIA RADIADA Potencia de salida del transmisor: 32 kW PRA: 100 kW

Tabla 3.3. Características técnicas de operación de Radio UNAM.

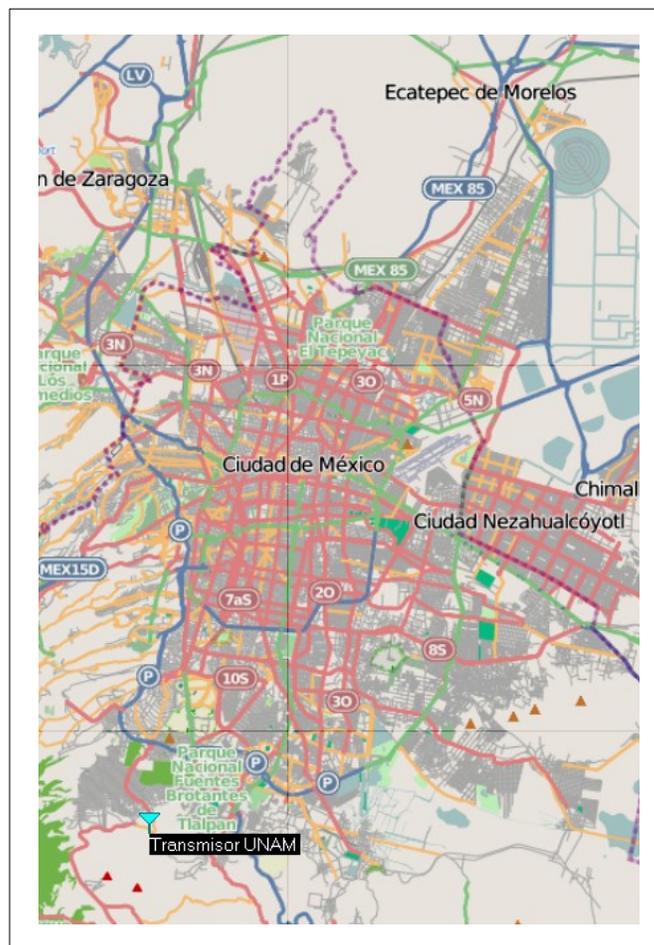


Figura 3.9. Ubicación del transmisor de Radio UNAM.



Figura 3.10. Torre de Radio UNAM (derecha) y sección superior (izquierda).

Se realizó la simulación con Radio Mobile para observar la cobertura del campo eléctrico que se tiene desde la transmisión del Ajusco, para lo cual se consideraron los siguientes parámetros [NOM02], además de los parámetros de la radiodifusora para su transmisión de FM:

- Niveles obtenidos para el 50% de las ubicaciones, situaciones y tiempo.
- Clima continental templado.
- Refractividad de la superficie de 301 unidades N.
- Conductividad del suelo de 5 mS/m.
- Permitividad relativa al suelo de 15.

En la figura 3.11 se puede observar la cobertura de Radio UNAM, donde el color verde indica toda el área que está 3 dB por arriba del umbral de recepción FM de $66\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, el color amarillo indica el área que está entre -3dB y $+3\text{dB}$ del umbral de recepción, un área con posibilidad de recepción y no recepción. El área roja indica la zona en la cual seguramente no hay recepción.

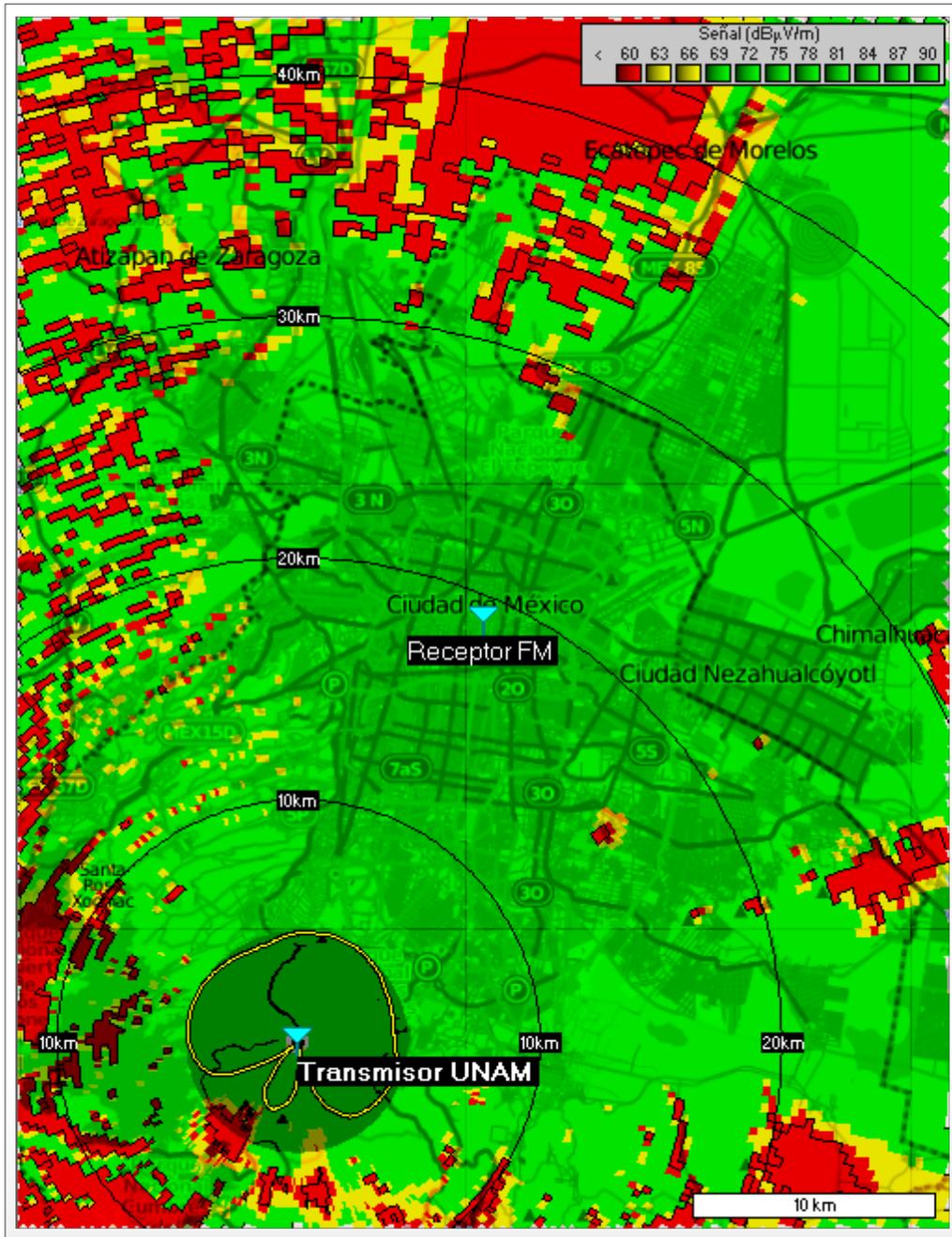


Figura 3.11. Estimación de campo para Radio UNAM.

3.4.4 Instituto Mexicano de la Radio

El Instituto Mexicano de la Radio cuenta con varias estaciones de radio tanto de AM como de FM, en la Ciudad de México y en toda la República Mexicana, tan solo en la Ciudad de México tiene 3 estaciones de FM, que son: 94.5 MHz, 107.9 MHz y 105.7 MHz.

Las instalaciones administrativas y estudios de grabación se encuentran ubicados en Mayorazgo # 83, Colonia Xoco, Del. Benito Juárez. La transmisión de la señal la realizan desde el cerro del Chiquihuite. En la tabla 3.4 se muestran los parámetros técnicos de una transmisión de FM del IMER y la ubicación del transmisor se observa en la figura 3.12. Las 3 estaciones de radio se transmiten con un arreglo de antenas Rymssa colocadas en la misma torre, la cual se muestra en la figura 3.13.

Para la simulación de estimación de campo se utilizaron los mismos parámetros generales anteriores, claro que ahora es una ubicación diferente, a una frecuencia diferente, y por lo tanto la propagación del campo cambia, se presenta en la figura 3.14 la estimación de campo.

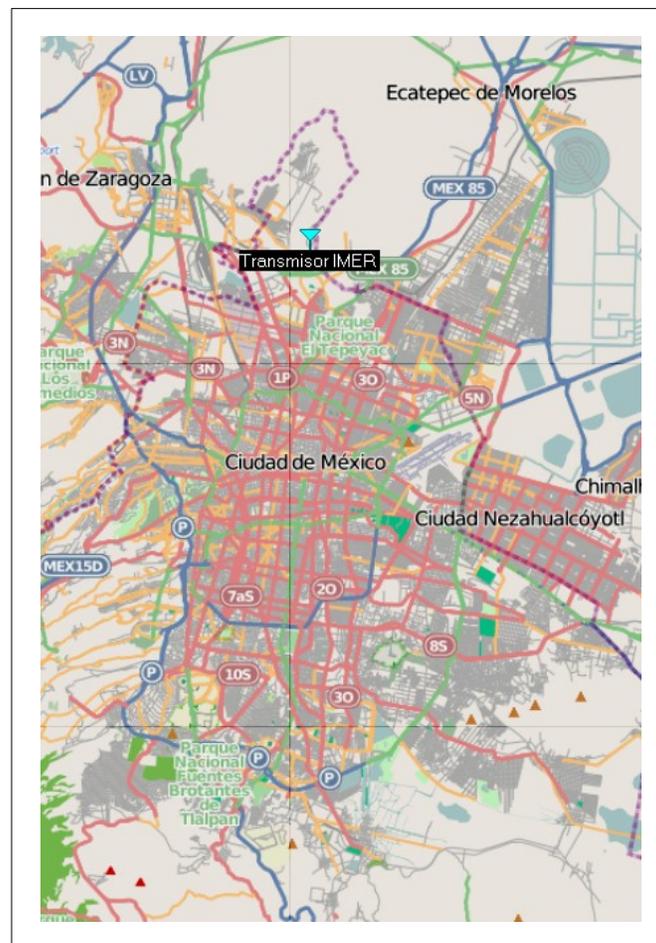


Figura 3.12. Ubicación del transmisor del IMER.



Figura 3.13. Torre (izquierda) y arreglo de antenas (derecha).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE OPERACIÓN	
FRECUENCIA: 94.5 MHz LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN: Latitud: 19°32'1.42"N Longitud: 99° 7'48.34"O Altitud: 2711m	
TRANSMISOR Fabricante: Harris Modelo: ZD20CD Potencia Nominal: 20 kW Potencia de Operación: 22 kW Impedancia de carga: 50 Ohms	ANTENA Fabricante: RYMSA Modelo: AT-572 (12 elementos) Polarización: Circular, sentido horario Patrón de radiación: Direccional Ganancia: 6.33 dBd Altura sobre la tierra: 50 m
Línea de Transmisión Fabricante: Andrew Modelo: Heliac HJ8-50B Longitud: 70 m Impedancia: 50 Ohms Atenuación total de la línea: 0.464 dB/100 m	Potencia Radiada Potencia de salida del transmisor: 22 kW PRA: 100 kW

Tabla 3.4. Parámetros técnicos de una estación IMER.

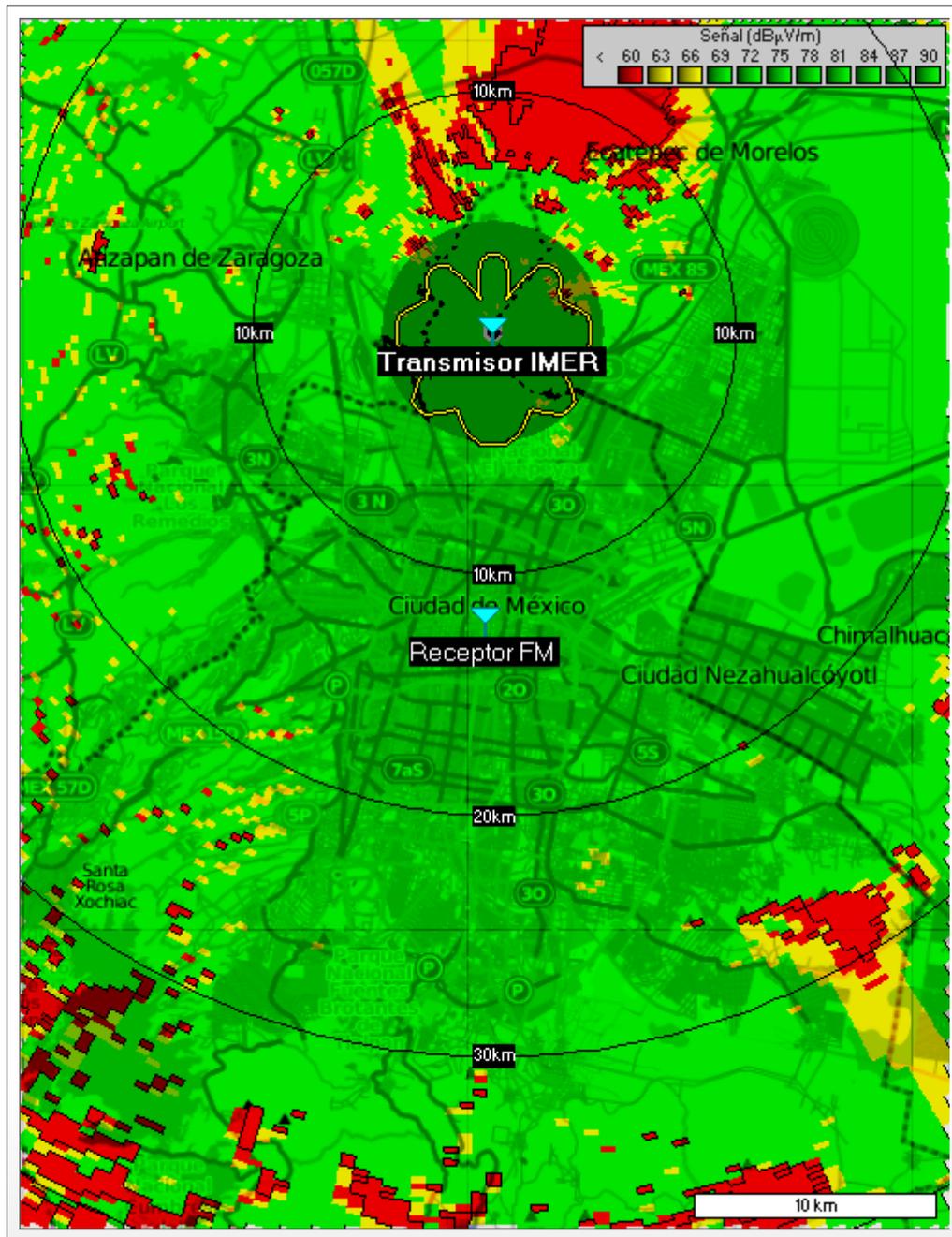


Figura 3.14. Estimación de campo para IMER.

3.4.5 Radio Universidad Iberoamericana

La universidad Iberoamericana cuenta con una estación de radio FM, la cual transmite en la frecuencia de 90.9 MHz, las características técnicas de esta estación se presentan en la tabla 3.5 y su ubicación geográfica en la figura 3.15, además se muestra en la figura 3.16 la estimación de intensidad de campo, útil para la comparación con las otras transmisoras.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE OPERACIÓN	
Radio Ibero Frecuencia: 90.9 MHz Localización de la estación: Latitud: 19°22'07"N Longitud: 99°15'42"O Altitud: 2530 m	
TRANSMISOR Fabricante: Harris Modelo: Z3.5CD Potencia Nominal: 3.5 kW Potencia de Operación: 2.45 kW Excitador FM: Harris DIGIT CD Digital FM Impedancia de carga: 50 Ohms	ANTENA Fabricante: Jampro Antennas Modelo: JLLP-3 (3 elementos) Polarización: Circular Patrón de radiación: Omnidireccional Ganancia: 1.76 dB (1.5 veces) Altura sobre la tierra: 56 m
LÍNEA DE TRANSMISIÓN Fabricante: Andrew Modelo: Heliax LDF5-50 7/8 “ Longitud: 70 m Impedancia: 50 ohms Atenuación total de la línea: 0.819%	POTENCIA RADIADA Potencia de salida del transmisor: 2.45 kW PRA: 3.04 kW

Tabla 3.5. Parámetros técnicos de Radio Ibero.

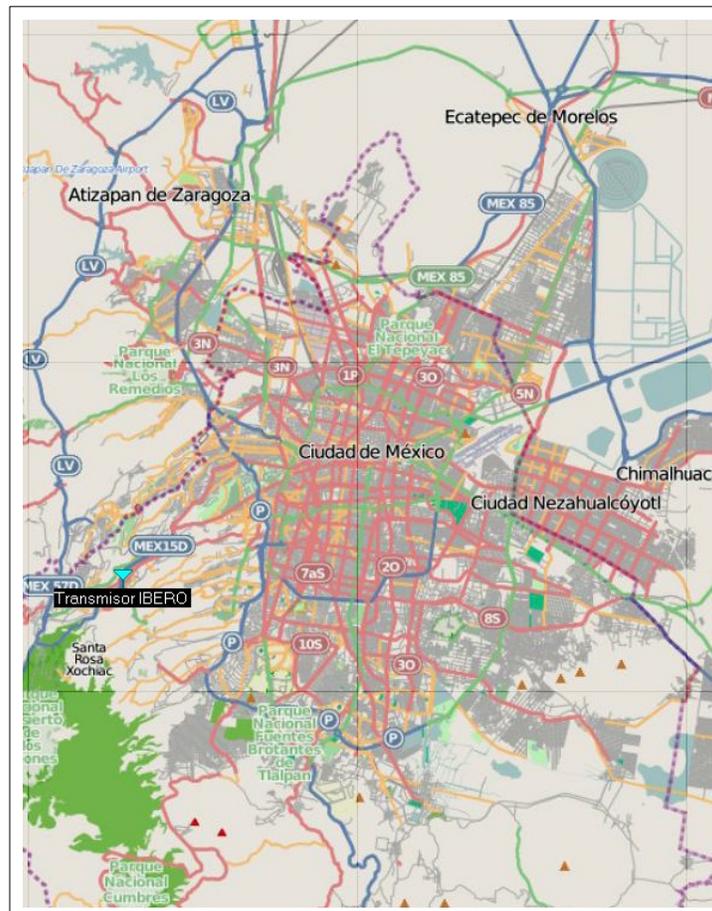


Figura 3.15. Posición geográfica Radio Ibero.

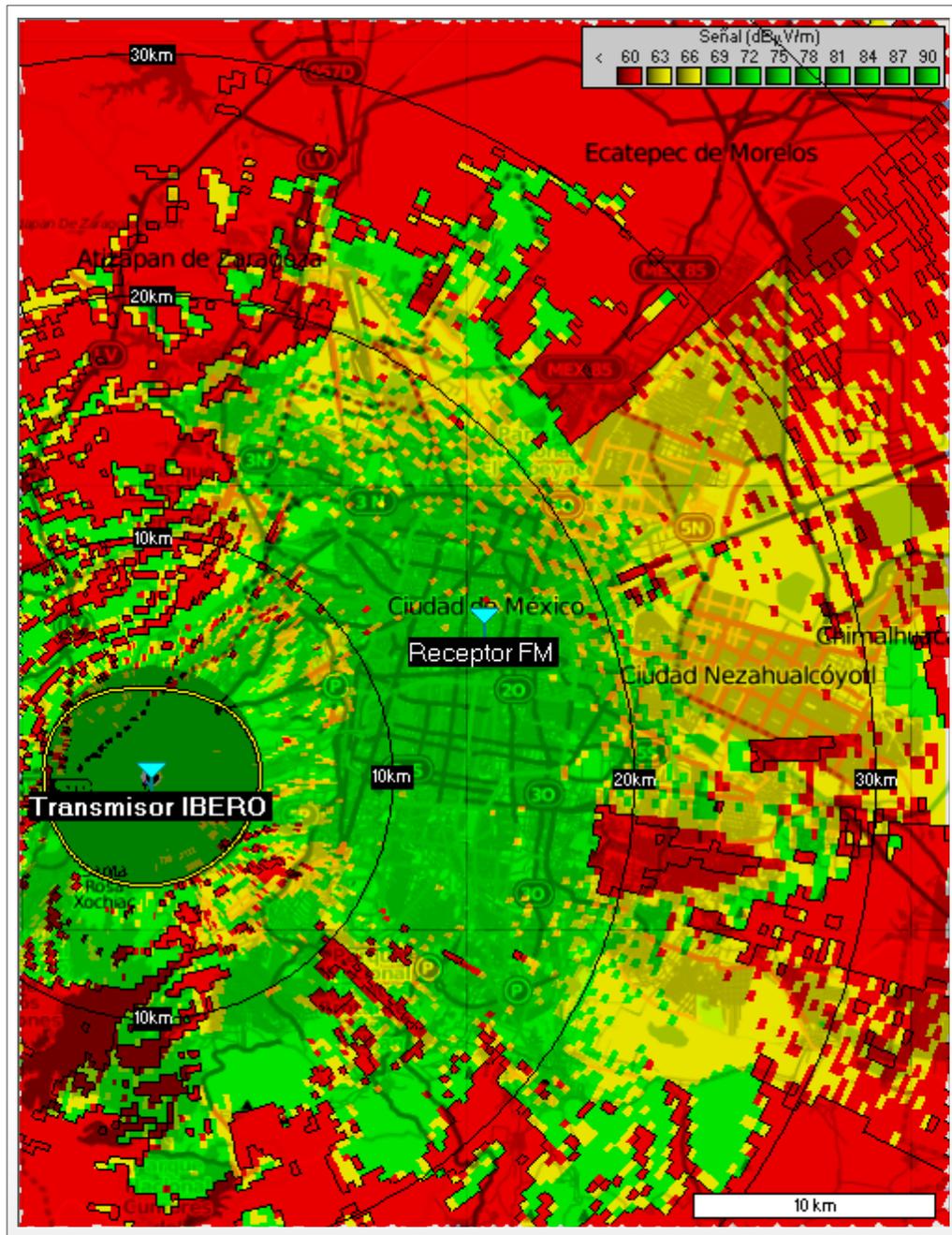


Figura 3.16. Intensidad de campo de Radio Ibero.

3.4.6 Elección de la estación transmisora

Para elegir una estación de las tres posibles, se tomarán las siguientes características:

- Patrón de radiación.
- Estimación de cobertura.
- Instalación de las antenas para DRM+.

Es importante la forma del patrón de radiación que tienen las antenas utilizadas en cada estación, esto porque tiene impacto en la interferencia de la señal digital que se pretende insertar, es necesario que tanto las antenas utilizadas para FM como para la transmisión digital tengan la misma forma del patrón de radiación, esto para mantener constante la relación de protección necesaria para que no haya interferencia FM/DRM+.

Se pretende además elegir una estación que cuente con una antena cuyo patrón de radiación sea omnidireccional o lo más cercano a esto, ya que un patrón de radiación direccional implica mayores problemas para la medición de intensidad de campo que un patrón omnidireccional cuya señal es radiada en todas direcciones con la misma intensidad. Los patrones de radiación de las 3 estaciones se muestran en la figura 3.17.

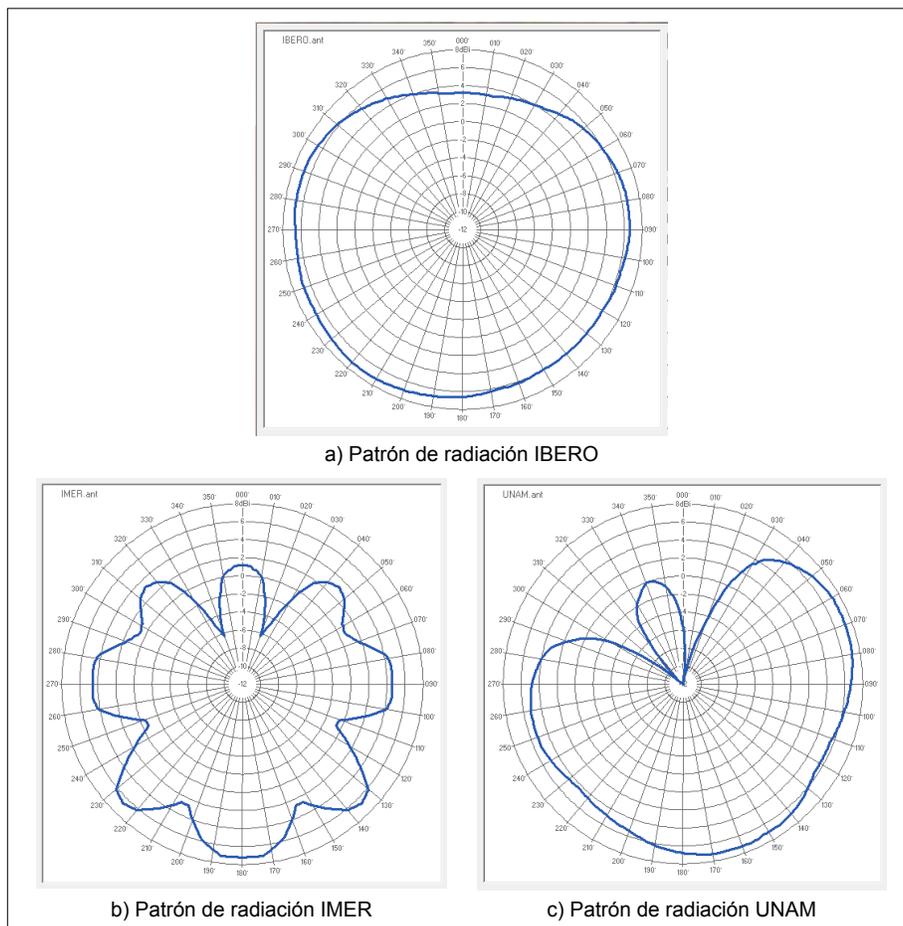


Figura 3.17. Patrones de radiación horizontales de las 3 emisoras.

Cabe señalar que de los patrones de radiación mostrados, el patrón de radiación de la antena que utilizan en Radio Ibero es el que presenta una forma más omnidireccional, sin embargo en el caso del patrón de radiación del IMER presenta también una forma casi omnidireccional, tomando en cuenta que las caídas que tiene no son mayores de 3 dB y por lo tanto el error medido estará acotado a estos 3 dB; para el patrón de radiación de la antena de Radio UNAM es evidente que está más alejado de una forma omnidireccional, sin embargo en la parte direccional del patrón que es la que nos interesa, presenta una forma casi omnidireccional, con lo cual se concluye que en términos de la forma del patrón de radiación cualquiera de las tres estaciones es elegible.

En la descripción de cada una de las estaciones se presentó su cobertura, en este caso se tomará el criterio de la estimación de cobertura considerando mejor a aquella que presente un área de cobertura mayor, considerando que las potencias de transmisión son diferentes habrá por lo tanto una cobertura diferente entre ellas, además la situación geográfica es diferente entre las estaciones. Es importante señalar que interesa la estación que presente mayor área de cobertura para de esta manera también proponer una transmisión DRM+ con una potencia mayor y también una cobertura mayor.

Al comparar las tres coberturas (figura 3.18) se nota claramente que la transmisión por parte de Radio Ibero es mucho menor, esto es debido a que transmite con una potencia mucho menor que las dos restantes. Además se aprecia que Radio IMER presenta la mayor área de cobertura, aunque no con mucha diferencia sobre Radio UNAM, la cual presenta también muy buena área de cobertura. Con ello se puede concluir que tanto Radio UNAM como IMER presentan una gran área de cobertura, cubriendo claramente la Ciudad México sin ningún problema, por lo tanto estas dos estaciones quedan para ser elegibles en la definición del protocolo.

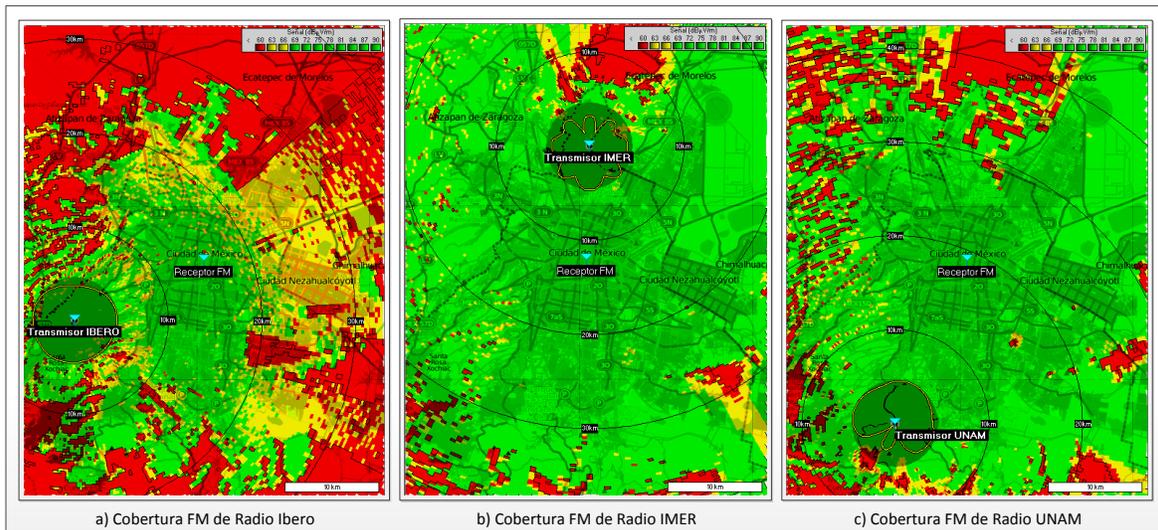


Figura 3.18. Comparación de las coberturas FM de las estaciones IMER, Ibero y UNAM.

Diseño de Pruebas

Al considerar la facilidad con la que se puede implementar DRM+ en una estación transmisora, se habla prácticamente de la posibilidad de insertar en la misma torre de transmisión la antena o antenas para transmitir DRM+, considerando además que debe haber una separación vertical para evitar interferencias. En la torre de transmisión de Radio Ibero donde sólo se tiene un arreglo de 3 antenas hay suficiente espacio para colocar más antenas. En tanto que en la torre de IMER se encuentra un arreglo de 12 elementos y no hay nada de espacio para colocar ni una sola antena más, por lo que se descarta automáticamente la posibilidad de utilizar esta estación para desarrollar el protocolo. En cuanto a Radio UNAM, se tienen en la misma torre el arreglo de 6 antenas para el sistema principal radiante y un arreglo de 5 antenas para el sistema de respaldo, considerando esto aún se tiene suficiente espacio para colocar antenas para la transmisión de DRM+.

Tomando en cuenta además otro criterio en cuanto a la facilidad de acceso a las instalaciones y al apoyo recibido, se puede decir que las personas contactadas en las tres estaciones mostraron un gran apoyo, sin embargo existió mayor facilidad para el caso de Radio UNAM de plantear el protocolo de pruebas.

Una vez analizado los criterios de selección, se tomó la decisión de implementar el protocolo de pruebas en la estación de Radio UNAM, ubicado en la zona del Ajusco.

3.5 Planificación de las pruebas

En este apartado se explican en primer lugar la propuesta de implementación de una transmisión simulcast, en donde se presenta la configuración de transmisión de DRM+, además se presentan la estimación de cobertura de DRM+ para posteriormente trazar las rutas de medidas.

3.5.1 Propuesta de la arquitectura del sistema para transmisión simulcast

Antes de presentar la arquitectura del sistema es necesario establecer la potencia de transmisión de DRM+ y la frecuencia. Para ello se hace uso de la figura 3.19 que muestra las relaciones de protección entre FM y DRM+ y que aseguran que no haya interferencia entre uno y otro. A continuación se explica la función de cada una de las curvas.

- La curva negra muestra la relación de potencia máxima de DRM+ que no dañará la señal analógica más allá de los criterios de protección recomendados.
- La curva azul muestra la relación de potencia mínima para DRM+ 16-QAM con presencia de interferencia de FM.
- La curva roja muestra la relación de potencia mínima para DRM+ 4-QAM con presencia de interferencia de FM.

Haciendo un análisis de la imagen se observa que la señal digital puede ser colocada cercanamente a la señal de FM tanto por el lado derecho como por el izquierdo. Para garantizar los niveles de protección respectivos y la calidad de audio, la distancia de frecuencia de la portadora (Δf) y la diferencia de niveles de potencia (ΔP) de las señales FM y DRM+ deben ser elegidas detalladamente. Por lo tanto se recomienda que $\Delta f \geq 150$ kHz, en tanto que ΔP puede variar flexiblemente.

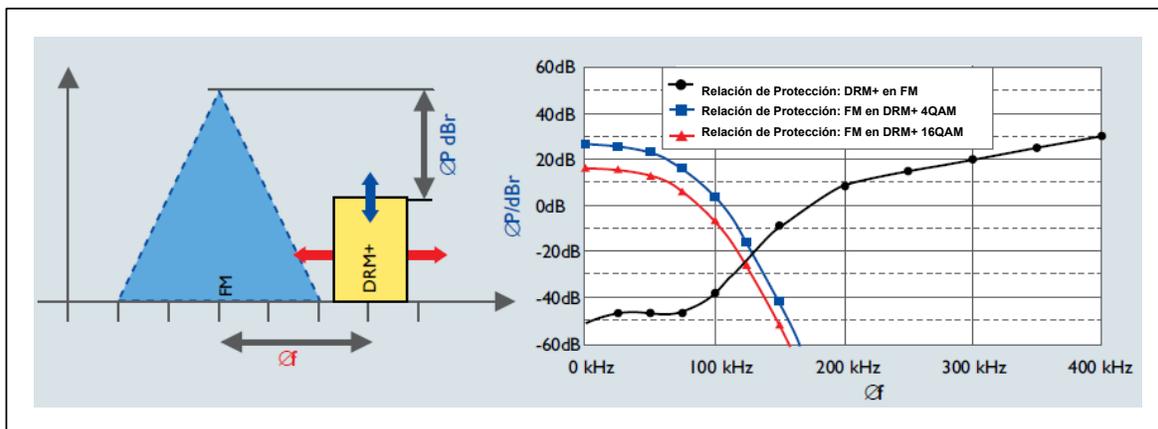


Figura 3.19. Relación de protección FM y DRM+.

Así que se optó por elegir una separación en frecuencia de 200 kHz, ya que una separación de 150 kHz podría interferir a la transmisión FM, y no podría ser una separación mayor porque entonces la transmisión quedaría fuera de la máscara de FM y podría interferir además a otras transmisiones; se eligió además una $\Delta P = 10$ dB que cumple con la

relación de protección y que resultaría en una potencia de transmisión de 10 kW que garantiza la misma cobertura que FM, además es posible cubrir esta potencia con el equipo disponible para radiodifusión digital.

Siendo la transmisión de Radio UNAM de 100 kW, se calcula la potencia a la cual transmitiría DRM+ siendo esta de 10 kW, manteniendo una relación de protección de DRM+ en FM de 10 dB, y de DRM+ en FM de -10 dB, como lo establecen las curvas de la gráfica.

De las configuraciones posibles se decidió utilizar el modo de acoplamiento de antenas, es decir, la transmisión por antenas separadas utilizando la misma torre, esto porque genera una mayor facilidad en el manejo de las señales tanto digitales como analógicas, ya que su administración es individual y no crea complicaciones como lo haría el combinar las dos señales.

Quedando el diagrama de la figura 3.20 para la transmisión de DRM+. En cuanto al transmisor a utilizar cabe señalar que se ha elegido uno de la compañía Nautel, ya que, todos sus transmisores están listos para migrar a transmisión DRM+. Se utilizarán tres elementos de antena, las cuales resisten una entrada de potencia de 25 kW y tienen una ganancia de 1.76 dBd, por lo tanto se ha elegido el transmisor V15d Nautel, que tiene una potencia de salida en modo sólo digital de 5.2 kW [NAUT-11] para tener una PRA de 7.8 kW, para transmitirse en la frecuencia de 96.3 MHz.

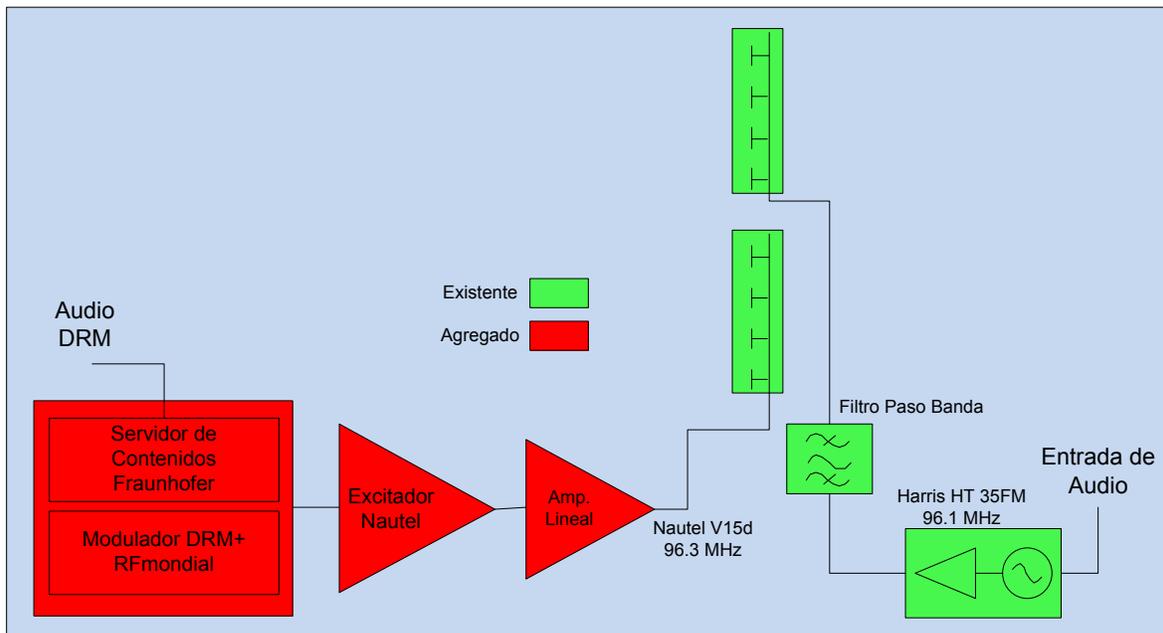


Figura 3.20. DRM+ modo combinado (acoplamiento de antena).

Es importante además, determinar la separación que habrá entre las antenas de FM y DRM+, para lo cual se utiliza la siguiente gráfica de la figura 3.21, que muestra el aislamiento vertical que debe haber entre antenas, cabe señalar que las curvas son valores aproximados basados en antenas dipolo de media onda. De acuerdo a un estudio realizado

en Brasil se determinó que con un valor de 45 dB de aislamiento era suficiente, sin embargo una vez realizada la instalación es necesario medir el aislamiento, ya que pueden ocurrir productos de intermodulación porque la señal de FM tiene una potencia mucho mayor y se encuentra en un canal adyacente provocando que la señal llegue hasta el transmisor.

En la gráfica se observa que para nuestro objetivo es necesario tener una separación mínima de aproximadamente 7 metros del centro de radiación, por lo tanto en la torre de Radio UNAM se propone colocar la antena para DRM+ a la distancia mínima posible, que es a 24 metros, mayor que la distancia requerida, lo cual asegura la no interferencia (figura 3.22).

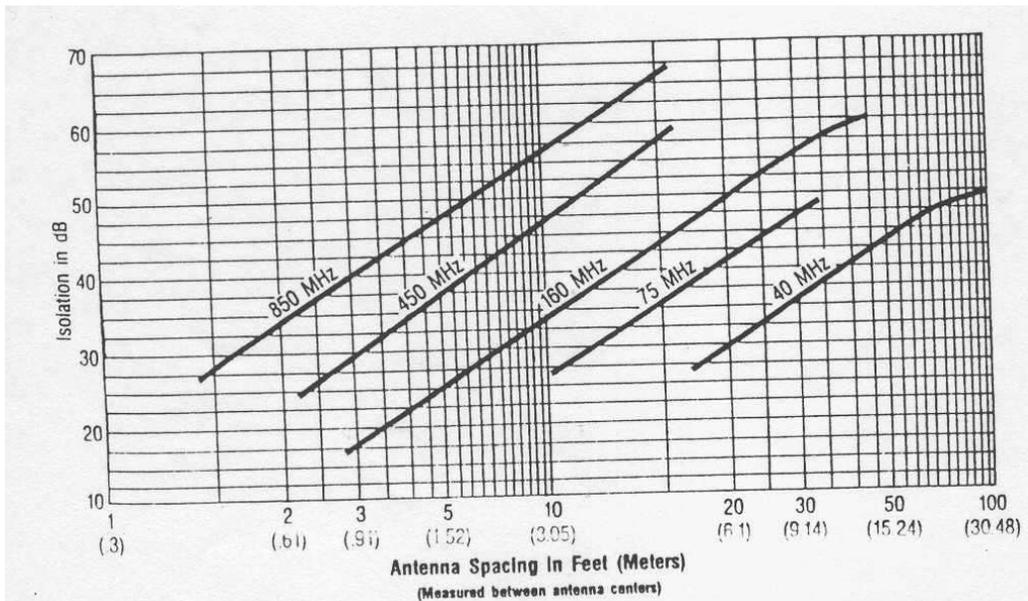


Figura 3.21. Acoplamiento entre antenas verticalmente espaciadas.

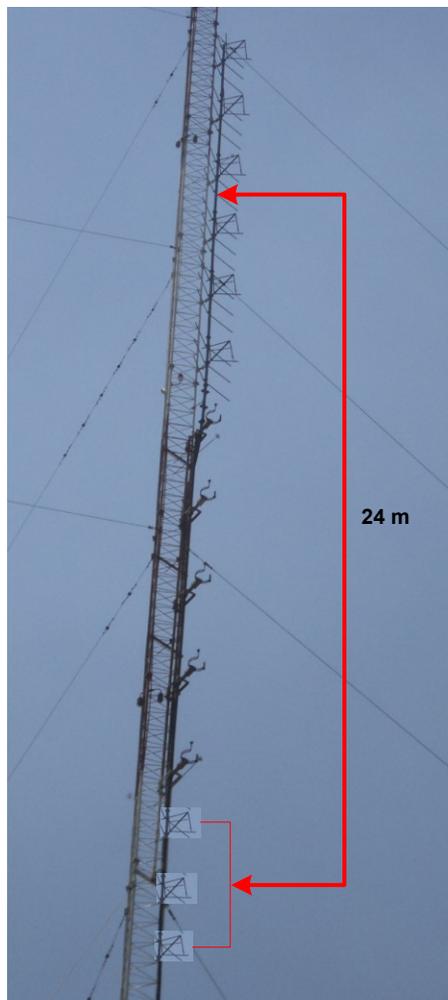


Figura 3.22. Colocación de antena DRM+.

3.5.2 Definición de rutas de medidas

Ahora se explicará la forma en la cual se determinaron las rutas de medidas, considerando la estimación de cobertura realizada con Radio Mobile. El software Radio Mobile está basado en el modelo de propagación ITS (Longley-Rice). El programa utiliza datos topográficos pero no morfológicos (SRTM del inglés Space Shuttle Radar Terrain Mapping Mission).

Se ha calculado además la zona con visión directa al transmisor (figura 3.23), se observa de color amarillo la cobertura visual de la Ciudad de México, se nota que cerca del transmisor no hay visión directa, esto es debido a que cerca del transmisor hay zonas con mayor altura que dificultan la transmisión. La estimación de cobertura de DRM+ presenta mucha semejanza a la cobertura estimada para FM, lo cual demuestra que se puede cubrir la misma cobertura con DRM+ utilizando una menor potencia, en este caso 11.07 dB por debajo.

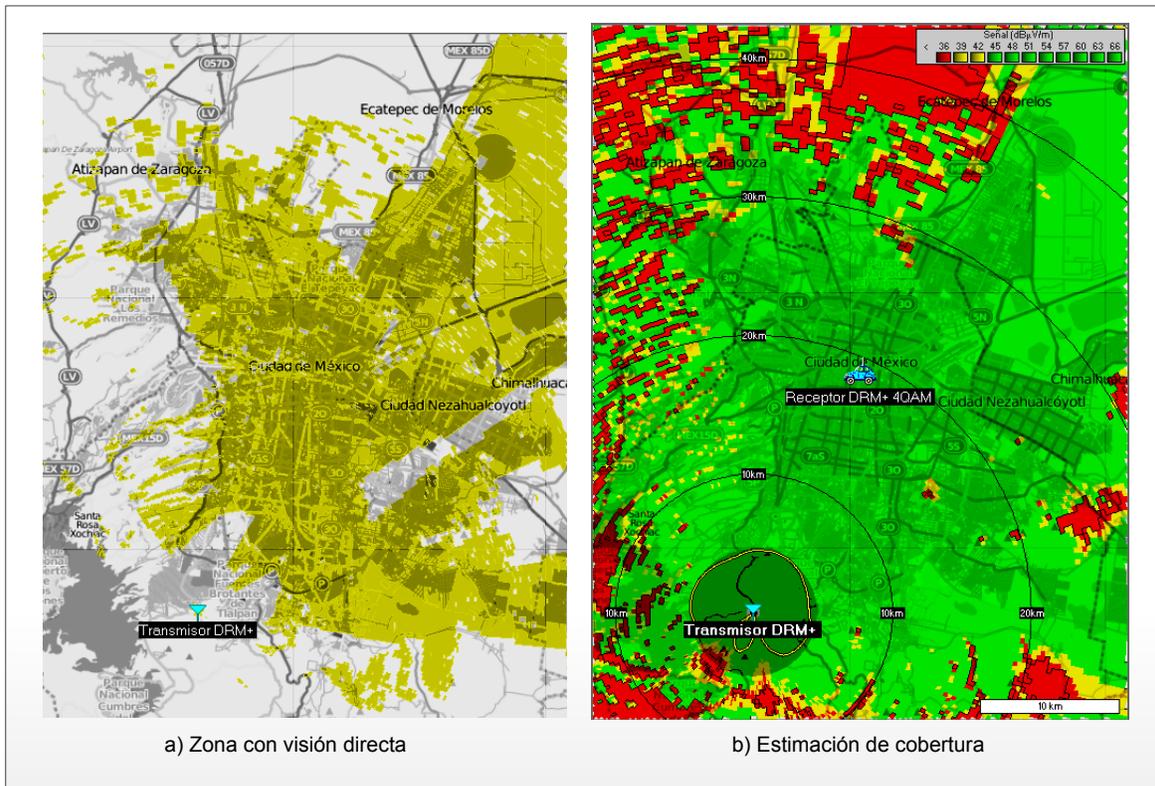


Figura 3.23. Zona con visión directa y estimación de cobertura DRM+ para una modulación 4-QAM y modo de recepción móvil.

Para el caso de la estimación de cobertura se han utilizado los siguientes parámetros:

- Niveles obtenidos para el 95% de las ubicaciones, situaciones y tiempo.
- Clima continental templado.
- Refractividad de la superficie de 301 unidades N.
- Conductividad del suelo de 5 mS/m.
- Permitividad relativa al suelo de 15.

Para llevar a cabo la estimación de cobertura es necesario que los parámetros característicos del transmisor sean considerados apropiadamente. Esto es la ubicación geográfica del transmisor, la cual será la posición geográfica de la estación de Radio UNAM; el patrón de radiación de la antena, mostrado en la figura 3.16; y la potencia de salida, la cual es de 7.8 kW. Además es necesario resaltar la importancia que tiene la altura de la antena directamente en la propagación, además debe existir un aislamiento con las antenas de FM quedando una altura de transmisión DRM+ de 52 m.

Además se puede deducir la importancia del parámetro de intensidad de campo mínimo requerido en el receptor. Esto es el valor requerido en la entrada del receptor que necesita para ser capaz de distinguir entre la señal deseada y el ruido de fondo. En la estimación de cobertura del sistema DRM+ se tiene que decidir qué tipo de recepción se llevará a cabo, es decir los modos de recepción señalados en el apartado 3.3, por ejemplo recepción móvil o portátil para hand-held.

Diseño de Pruebas

Los criterios de planeación tienen que estar ligados directamente a las características del receptor, como figura de ruido del receptor, ganancia de la antena y en particular, la intensidad de campo mínimo requerido. Para ello se utilizan los parámetros técnicos de transmisión de DRM+, basado en pruebas de laboratorio y de campo, encontrados por un grupo de expertos que trabajan en colaboración con el Consorcio de DRM que se presentan en la tabla 3.6 y tabla 3.7 para las dos modulaciones 4-QAM y 16-QAM, respectivamente [DRMT-11].

Modulación DRM		4-QAM, R = 1/3					
Tipo de recepción		FX	PI	PI-H	PO	PO-H	MO
Nivel de potencia mínimo en el receptor	$P_{s \text{ min}}$ [dBW]	-142.68	-136.68	-136.48	-136.68	-136.68	-138.48
Ganancia de antena	G_D [dBd]	0.00	-2.20	-19.02	-2.20	-19.02	-2.20
Apertura efectiva de antena	A_a [dBm ²]	0.70	-1.50	-18.32	-1.50	-18.32	-1.50
Pérdida de alimentación	L_c [dB]	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28
Densidad de flujo de potencia mínima en la recepción	φ_{min} [dBW/m ²]	-141.97	-135.17	-118.32	-135.17	-118.35	-136.69
Nivel de campo mínimo en la antena del receptor	E_{min} [dB μ V/m]	3.79	10.59	27.41	10.59	27.41	9.07
Ruido permitido hecho por el hombre	P_{mmn} [dB]	10.43	10.43	0.00	10.43	0.00	10.43
Pérdida por altura de la antena	L_h [dB]	0.00	10.00	17.00	10.00	17.00	10.00
Pérdida por penetración de edificios	L_b [dB]	0.00	9.00	9.00	0.00	0.00	0.00
Probabilidad de ubicación		70%	95%	95%	95%	95%	99%
Factor de corrección de ubicación	C_1 [dB]	3.10	10.91	7.96	9.73	6.25	12.77
Nivel de intensidad de campo medio mínimo	E_{med} [dBμV/m]	17.32	50.92	61.37	40.74	50.66	42.27

Tabla 3.6. Intensidad de campo medio mínimo E_{med} para 4-QAM, R= 1/3 en VHF banda II.

Modulación DRM		16-QAM, R = 1/2					
Tipo de recepción		FX	PI	PI-H	PO	PO-H	MO
Nivel de potencia mínimo en el receptor	$P_{s \text{ min}}$ [dBW]	-136.08	-128.58	-128.58	-128.58	-128.58	-131.18
Ganancia de antena	G_D [dBd]	0.00	-2.20	-19.02	-2.20	-19.02	-2.20
Apertura efectiva de antena	A_a [dBm ²]	0.70	-1.50	-18.32	-1.50	-18.32	-1.50
Pérdida de alimentación	L_c [dB]	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28
Densidad de flujo de potencia mínima en la recepción	φ_{min} [dBW/m ²]	-135.37	-127.07	-110.25	-127.07	-110.25	-129.39
Nivel de campo mínimo en la antena del receptor	E_{min} [dB μ V/m]	10.39	18.69	35.51	10.69	35.51	16.37
Ruido permitido hecho por el hombre	P_{mmn} [dB]	10.43	10.43	0.00	10.43	0.00	10.43
Pérdida por altura de la antena	L_h [dB]	0.00	10.00	17.00	10.00	17.00	10.00
Pérdida por penetración de edificios	L_b [dB]	0.00	9.00	9.00	0.00	0.00	0.00
Probabilidad de ubicación		70%	95%	95%	95%	95%	99%
Factor de corrección de ubicación	C_1 [dB]	3.10	10.91	7.96	9.73	6.25	12.77
Nivel de intensidad de campo medio mínimo	E_{med} [dBμV/m]	23.92	59.02	69.47	48.84	58.76	49.57

Tabla 3.7. Intensidad de campo medio mínimo E_{med} para 16-QAM, R= 1/2 en VHF banda II.

Para utilizar el valor de intensidad de campo mínimo en el Radio Mobile es necesario convertir este valor a voltaje. Para pasar de intensidad de campo mínimo al nivel de voltaje suficiente para una recepción buena en el receptor (umbral de recepción) de acuerdo a [DRMT-11] se considera una antena dipolo de ganancia 0 dBi en el receptor y una frecuencia de 100 MHz para banda II, primero se calcula la densidad de potencia radiada como sigue:

$$W_i = R_e[\vec{E} \times \vec{H}^*] = \frac{|E|^2}{\eta}$$

$$W_i = \frac{\left(10^{\frac{42.27}{20}} \times 10^{-6}\right)^2}{120\pi}$$

$$W_i = 44.74 \times 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Donde:

- W_i : Densidad de potencia radiada (W/m²)
- \vec{E} : Vector de campo eléctrico (V/m)
- \vec{H} : Vector de campo magnético (A/m)
- η : Impedancia característica del medio (Ω)

Posteriormente la potencia recibida:

$$P_{rx} = \frac{W_i \lambda^2 G}{4\pi}$$

$$P_{rx} = \frac{(44.74 \times 10^{-12})(3)^2(1)}{4\pi}$$

$$P_{rx} = 32.04 \times 10^{-12} [W]$$

Y finalmente el voltaje mínimo de recepción:

$$V_{rx} = \sqrt{P_{rx} \cdot R}$$

$$V_{rx} = \sqrt{(32.04 \times 10^{-12})(50)}$$

$$V_{rx} = 40 [\mu V]$$

Donde:

- P_{rx} : Potencia recibida (W)
- λ : Longitud de onda (m)
- G : Ganancia de la antena (dBi)
- V_{rx} : Voltaje recibido (V)

Este valor de voltaje será utilizado como el umbral del receptor para la predicción de cobertura en Radio Mobile para el modo 4-QAM y una tasa de codificación de 1/3. Ahora para definir el valor del umbral en el receptor para el modo 16-QAM, se utiliza la tabla 3.7 de donde tomamos el valor de 49.57 [dB μ V/m] para posteriormente pasarlo a nivel de voltaje, siguiendo el procedimiento anterior queda:

$$V_{rx} = 92.75 [\mu V]$$

Una vez ajustados los valores en el Radio Mobile, en la imagen 3.24 se presentan las dos coberturas de DRM+ para sus dos modos de transmisión, 4-QAM y 16-QAM. Se puede observar que la cobertura se presenta prácticamente en toda la ciudad de México, ya sea utilizando 4-QAM o 16-QAM la ciudad presenta un nivel de campo eléctrico por arriba de 42 dB μ V/m y 49 dB μ V/m, respectivamente. Por lo tanto se pueden diseñar las rutas de medidas prácticamente en cualquier trayectoria de la Ciudad de México (ver figura 3.25 y tabla 3.8).

Se han definido las rutas 1 y 2 en dos zonas conurbanas, las dos zonas exteriores de la ciudad del lado poniente y oriente, esto debido a que son zonas de diferente densidad, una con obstrucciones por montañas y la otra con pequeñas montañas y edificios de gran tamaño, y es posible por ello hacer una comparación del comportamiento de la señal. Para conocer la distancia máxima de cobertura se hace uso de una ruta radial para cada modo de modulación, la ruta 3 y 4 cumplen con este objetivo para los modos 16-QAM y 4-QAM, respectivamente.

Uno de los objetivos de las pruebas es determinar los umbrales de recepción para los dos tipos de modulación 4-QAM y 16-QAM por lo tanto se diseñaron las rutas 5 y 6, trazadas en una zona del límite de cobertura para ambas modulaciones y donde la señal presentará una alternancia de recepción y no recepción, que permite distinguir entre diferentes niveles de recepción y poder tener varias muestras para definir un umbral de recepción para cada modulación (ver figura 3.26).

Además es necesario llevar a cabo medidas que puedan arrojar resultados del comportamiento de la señal recibida en zonas dentro y fuera de edificios y centros comerciales utilizando receptores portátiles. Para ello se han trazado ubicaciones para la toma de medidas dentro de edificios a distintas distancias del transmisor, formando la ruta 7 que cruza la ciudad por el centro. Cabe señalar que las rutas que se definen para los dos tipos de modulación no se pueden realizar al mismo tiempo, por lo tanto se tienen que realizar primero las pruebas con un tipo de modulación y posteriormente el otro.

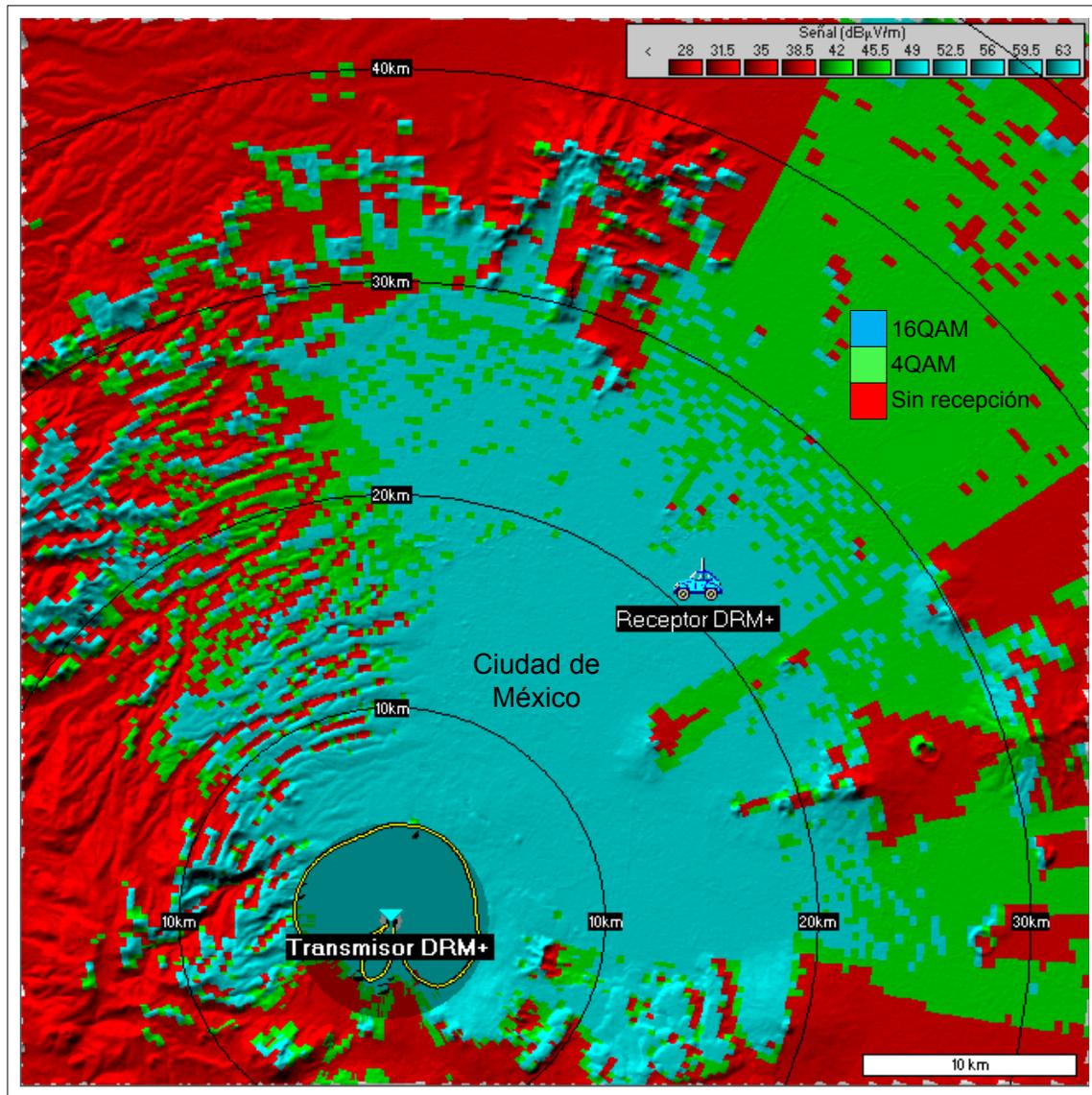


Figura 3.24. Cobertura DRM+ con 4-QAM y 16-QAM.

Denominación	Zona	Modulación
Ruta 1	Santa Fe	4QAM/16QAM
Ruta 2	Iztapalapa-México 136	4QAM/16QAM
Ruta 3	Varios-Periférico	16QAM
Ruta 4	Tlalpan-Viaducto-Av. C. Hank González	4QAM
Ruta 5	Nueva Santa Rosa-México Tepexpan	4QAM
Ruta 6	Mario Colín-Periférico	16QAM
Ruta 7	Varios-Centro de la Ciudad de México	4QAM/16QAM

Tabla 3.8. Rutas de Medidas en la Ciudad de México.

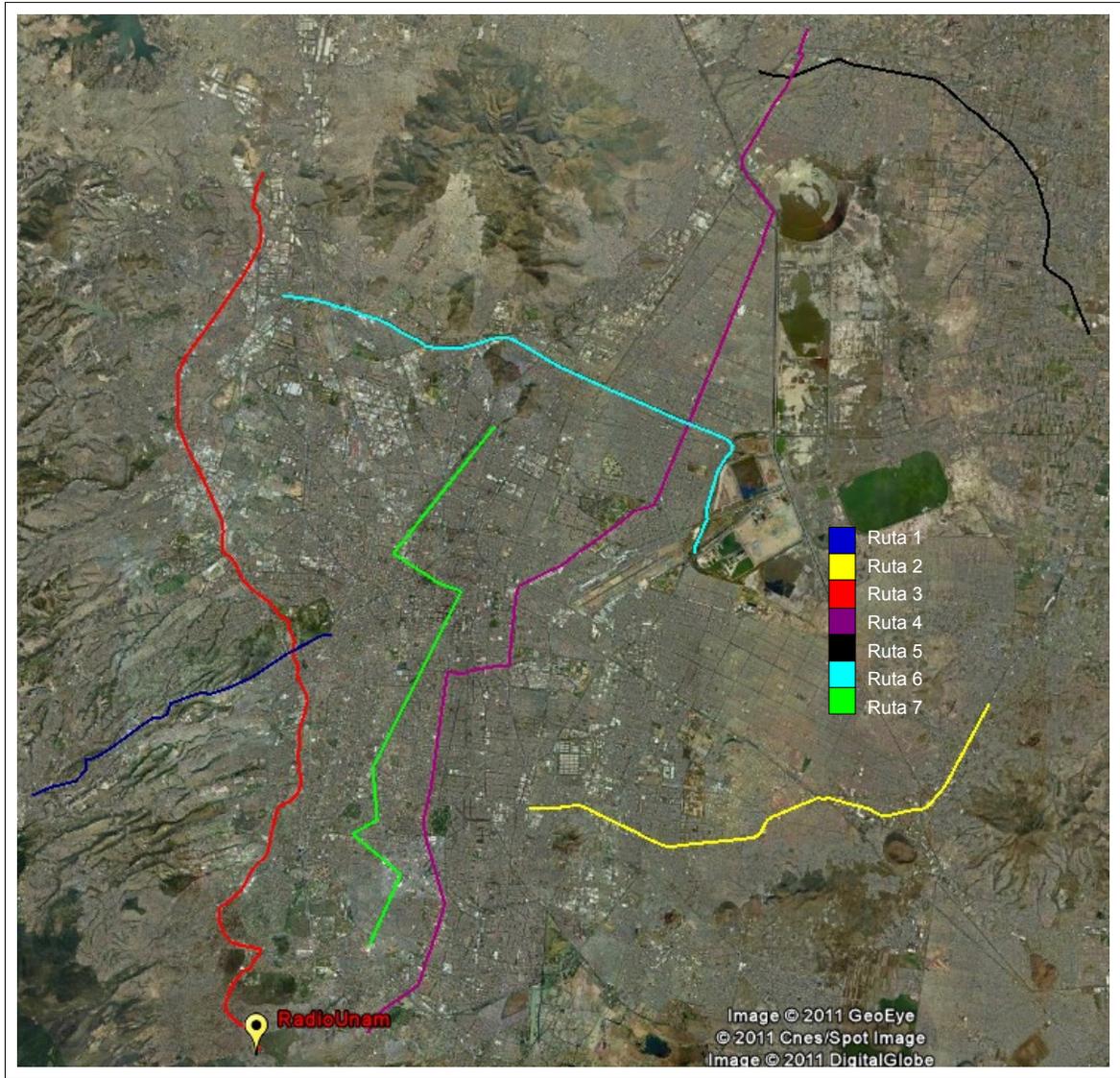


Figura 3.25. Mapa de rutas de medidas definidas en la Ciudad de México.

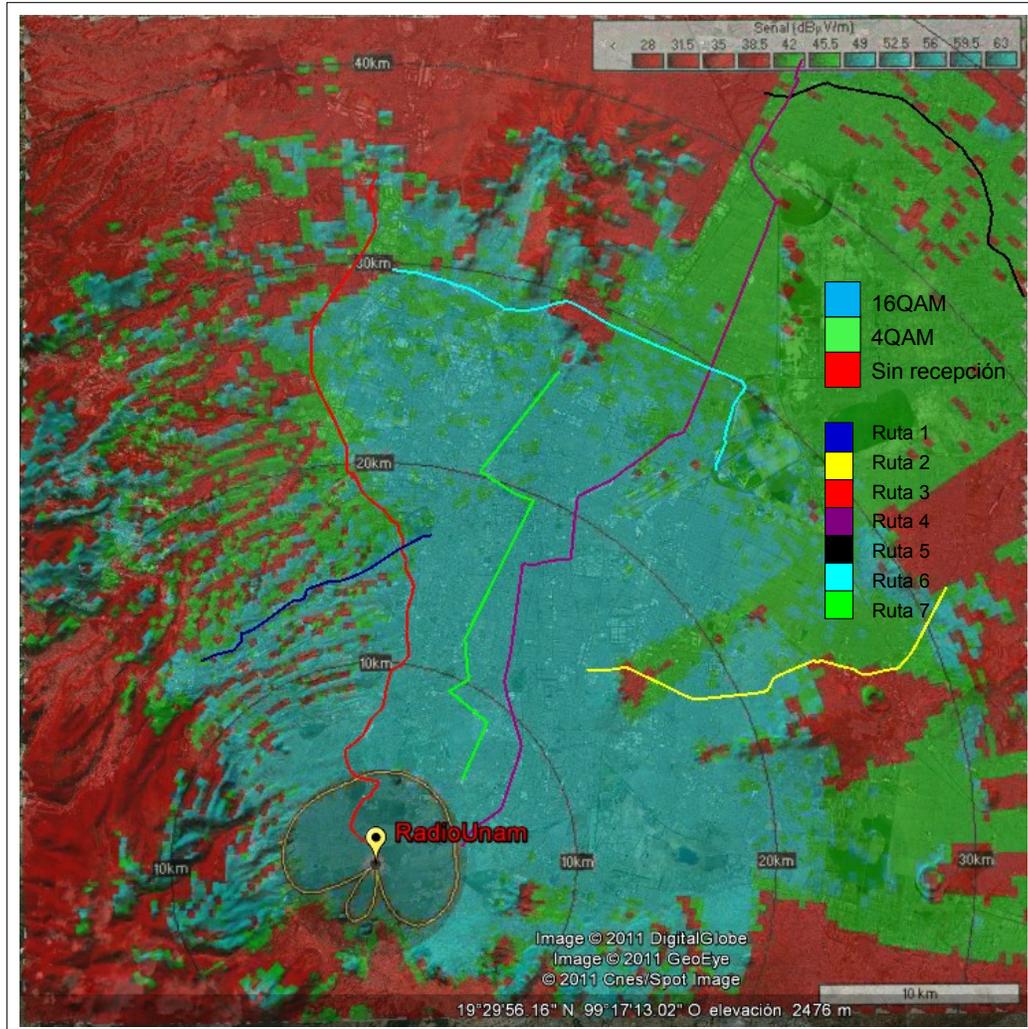


Figura 3.26. Cobertura DRM+ con 4-QAM y 16-QAM y rutas de medidas.

3.6 Metodología de medidas

En la implementación de una campaña de pruebas del sistema DRM+ con la finalidad de conocer la recepción de la señal, es necesario fijar una metodología que facilite llevar a cabo todo el proceso de medidas de una manera organizada y planificada.

Dentro de la metodología es indispensable definir los objetivos de las pruebas a realizar, los cuales han sido presentados en el apartado 3.2 porque de ello depende la finalidad y el alcance de las pruebas.

La realización de la predicción de cobertura y la propuesta de las rutas de medidas son las primeras etapas dentro del procedimiento de planificación de las pruebas, posteriormente se debe detallar el equipo a utilizar para el desarrollo de la pruebas, equipo que debe cumplir con cada uno de los objetivos de las pruebas.

Una vez que se define el equipo necesario, en cada prueba debe existir un parámetro que se ha de registrar para hacer el análisis y evaluación del desempeño del sistema DRM+. Todos los parámetros y resultados obtenidos son la base para hacer el análisis posterior y las conclusiones acerca del desempeño tanto de las pruebas como del propio sistema DRM+.

3.6.1 Definición del sistema de medidas

En este apartado se explicará detalladamente la configuración del equipo que se utilizará para realizar las medidas, además se explicarán sus características principales. El equipo que se utilice define la exactitud de los parámetros y la facilidad de poder obtenerlos y registrarlos, de ahí su gran importancia.

Descripción del sistema de medidas

Para llevar a cabo las medidas móviles y estáticas sobre las rutas establecidas es necesario utilizar un vehículo destinado especialmente para ello. Se sugiere utilizar una camioneta que cuente con fuente de energía y pueda alojar el equipo de recepción y medición, como se muestra en la figura 3.27.

El diagrama de bloques del equipo de medidas se muestra en la figura 3.28, que cuenta con los siguientes elementos:

- Antena (Kathrein K51 16 4/BN 510 351 antena de monopolo magnético).
- RFmondial DRM+ Frontend.
- RFmondial Software Receiver.
- Analizador de Espectros.



Figura 3.27. Ejemplo de camioneta para la realización de medidas.

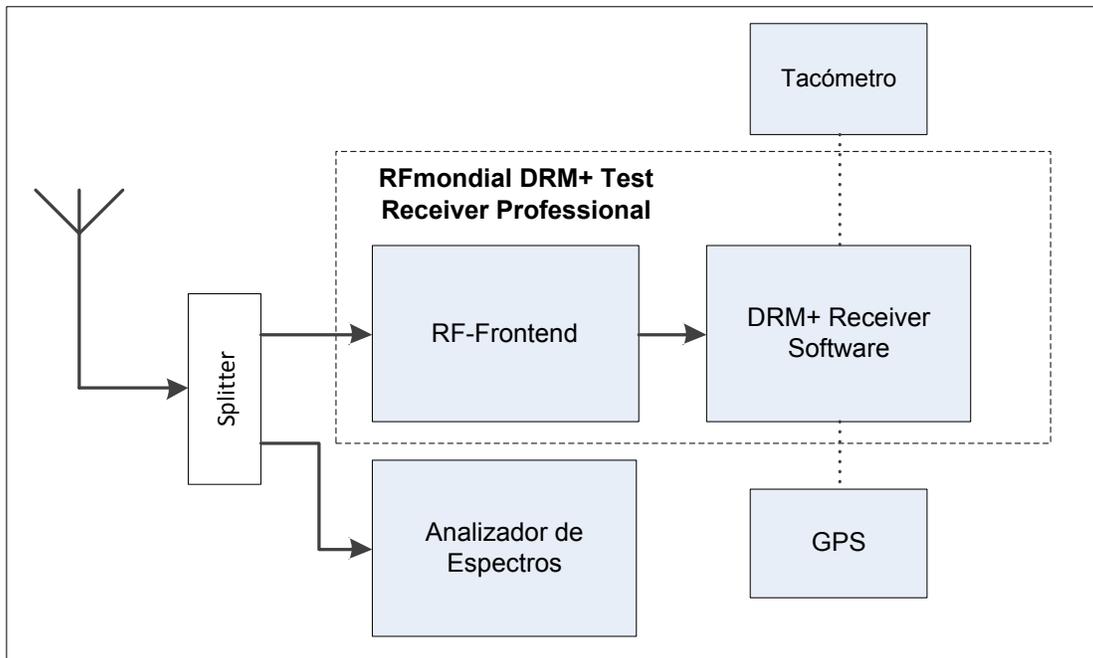


Figura 3.28. Diagrama de bloques del equipo de recepción.

La antena es montada en el techo de la camioneta a una altura aproximada de 2 metros sobre el nivel del suelo y es conectada posteriormente a un splitter de 3 dB. Una salida del splitter se conecta con el RFmondial Frontend configurado para tener un rango de frecuencia de entrada de 87-108 MHz (Banda de FM).

El Frontend es un sintonizador VHF de clase alta con salida digital, dirigido especialmente para ambientes de transmisión DRM+ y otras señales de transmisión digital. Cuenta con una arquitectura de doble superheterodino con filtros selectivos RF y una combinación de filtros FI de cristal, seguidos de un convertidor bajo digital de alta sensibilidad, excelente inmunidad al ruido y buena selectividad. La señal de salida que proporciona son muestras digitales en cuadratura de banda base. Su impedancia de entrada es de 50 Ohm y el ancho de banda de frecuencia intermedia es de 120 kHz y debe ser alimentado por 12 VDC [RFMO-11].

La salida del RFmondial Frontend es suministrada al receptor de pruebas DRM+ (figura 3.29) que proporciona la empresa RFmondial, permite investigar y demostrar el audio y la capacidad multimedia de la transmisión DRM+, así como realizar pruebas de campo y campañas de medidas intensivas. El software del receptor se ajusta a las especificaciones actuales del sistema DRM+.

El software del receptor DRM+ acepta flujos IQ en banda base a una tasa de muestreo de 192 kHz y salidas de DRM+ decodificados de flujos del MSC, así como MDI (Multiplex Distribution Interface) y RSCI (Receiver Status and Control Interface) sobre DCP (Distribution and Communication Protocol).



Figura 3.29. RFmondial Frontend (derecha) y software del receptor DRM+ (izquierda).

El software del receptor DRM+ está disponible en versión básica y profesional e incluye diferentes funciones de monitoreo y depuración de audio y datos, además de una interface de usuario (figura 3.30). El software implementa sincronización de tiempo y frecuencia, sincronización de trama, estimación de canal, demultiplexación de trama y opción de decodificador Viterbi.

El software del receptor DRM+ permite grabar los perfiles del RSCI, además con la ampliación de GPS que junto con el tacómetro permite el posicionamiento de cada parámetro medido y grabado. Además permite grabar las muestras IQ.

La otra salida del splitter es un analizador de espectros, que permite observar el espectro de canales adyacentes y poder hacer mediciones de ruido, además que presenta más precisión en cuanto a la medición de potencia que el receptor DRM+.

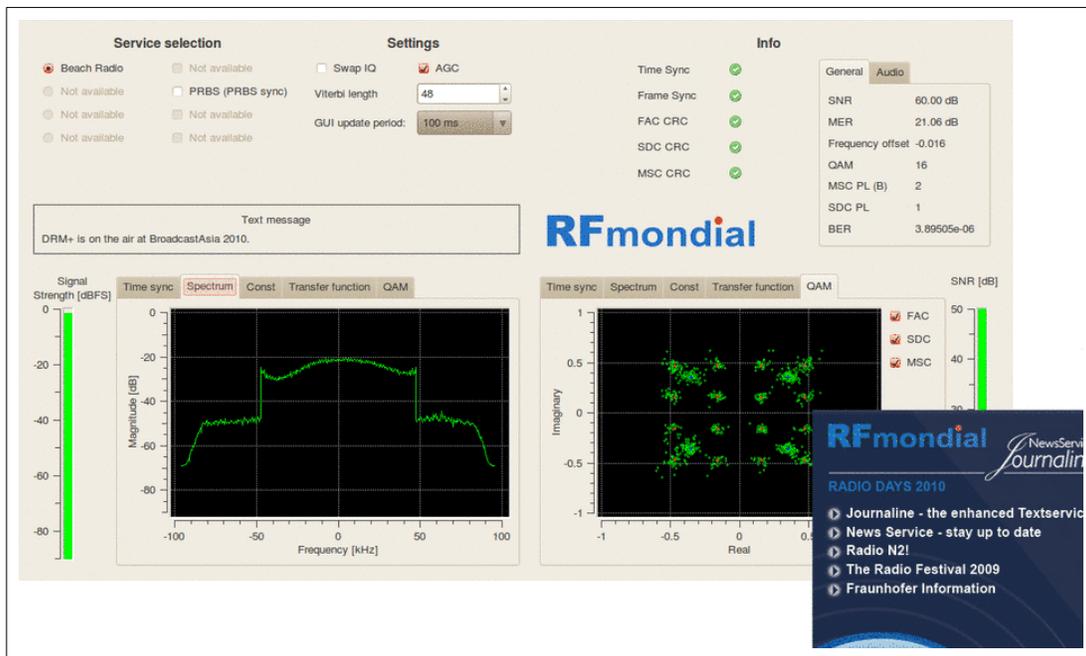


Figura 3.30. Software del receptor DRM+.

3.6.2 Parámetros necesarios a registrar

Aquí se describen los parámetros que se deben medir. Estos parámetros deben caracterizar la señal de recepción, de tal manera que ayuden a identificar los problemas que existan en la recepción. Se puede dividir en dos tipos de datos a los parámetros a registrarse, de acuerdo a la función que tienen.

- Parámetros que caracterizan la situación de recepción.
- Parámetros que caracterizan la señal DRM+ recibida.

Los parámetros que arrojan información acerca de la situación de recepción son registrados directamente por el personal encargado de realizar las medidas, tales como la realización de anotaciones y fotografías del entorno de recepción, además de los datos de posicionamiento que arrojan el GPS y el tacómetro.

Los datos para caracterizar la señal DRM+ son los parámetros directos de las especificaciones técnicas de la señal DRM+. Los datos que se deben registrar de los equipos de medidas son:

- Datos RSCI, el SNR y el estado del receptor (errores de sincronización, FAC CRC, SDC CRC y errores de audio).
- Intensidad de campo eléctrico.
- BER (Bit Error Rate).
- Tramas de audio correctas.
- Muestras IQ.

Intensidad de campo eléctrico

La intensidad de campo eléctrico es un parámetro muy útil para establecer la calidad de la señal recibida, entre otras razones porque es independiente del receptor. Es uno de los criterios que ayudan a determinar la cobertura radioeléctrica.

La intensidad de campo eléctrico en un punto se puede calcular como la suma del valor de la señal de potencia medida por el receptor y el factor k de la antena, el cual depende de la frecuencia de la señal y de la ganancia de la antena. Conociendo la tensión de salida de la antena (que normalmente se mide en $\text{dB}\mu\text{V}$), el factor de antena y la atenuación del trayecto de la señal de la antena, el valor de intensidad de campo puede calcularse utilizando la siguiente ecuación [ITUSM-1708]:

$$e = v_0 + k + a_c$$

Donde:

- e : Componente de la intensidad de campo eléctrico ($\text{dB}\mu\text{V/m}$)
- v_0 : Tensión de salida de la antena ($\text{dB}\mu\text{V/m}$)
- k : Factor de antena (dB/m)
- a_c : Atenuación del trayecto de la señal de la antena (dB)

Para la obtención del factor k se dispone de la siguiente ecuación:

$$k = 20 \log(f[\text{MHz}]) - 29.7707\text{dB} - g$$

Donde:

- k : Factor de antena
- f : Frecuencia de la señal en MHz
- g : Ganancia de la antena en dBi

Debido al efecto de las señales reflejadas, la intensidad de campo a lo largo de una ruta puede presentar fluctuaciones considerables. El resultado de una sola medición puede coincidir con el mínimo o máximo de reflexión, el cual también se ve afectado por la altura de la antena receptora y condiciones ambientales y meteorológicas. Teniendo en cuenta los factores antes mencionados, los resultados de prueba de intensidad de campo pueden calcularse a partir de un número considerable de lecturas de datos para un tratamiento estadístico posterior.

El medidor de campo se debe configurar para realizar medidas de potencia cada 100 ms, tiempo que dura una trama DRM+ con el fin de relacionar el nivel de la señal con los parámetros de la señal DRM+.

Parámetros de la señal DRM+

El receptor de pruebas DRM+ proporciona un conjunto basto de parámetros que ofrecen información de canal, de muestras IQ y de banda base. Los datos que se debe recabar han de proporcionar información sobre los siguientes parámetros:

- SNR. Es la relación señal a ruido de la señal, aunque el parámetro que arroja el receptor es el MER (Modulation Error Ratio) parámetro como el SNR pero para señales moduladas digitalmente que indica la calidad de la señal recibida a nivel de constelación IQ. El MER es una medida de la desviación de valores recibidos de la constelación IQ respecto de los ideales.
- Tramas de Audio Correctas. Definen la calidad del servicio de audio y se evalúa mediante el porcentaje de tramas de audio recibidas correctamente. Las tramas de audio pueden ser de 40 ms (24 kHz) o 20 ms (48 kHz) teniendo en esta último hasta 5 tramas de audio en una trama de transmisión.
- Datos RSCI. El protocolo RSCI define el contenido actual que debe transportarse en el protocolo DRM+, abarca el transporte el transporte de información del estado del receptor, además del multiplex DRM, así como comandos referentes al comportamiento del receptor.
- BER (Bit Error Rate). En cada caso de transmisión se ha de transmitir una secuencia PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) que permitirá medir el BER.

3.7 Metodología de análisis

Las pruebas que se proponen en este trabajo están orientadas al estudio del sistema DRM+ mediante el análisis de la recepción de la señal en los distintos modos de recepción y el estudio de cobertura. Las medidas para el modo de recepción estático y móvil se han de realizar sobre todas las rutas a excepción de la ruta 7, diseñada sólo para pruebas hand-held. Las medidas estáticas se han de realizar en puntos específicos y entre estos deben llevarse a cabo las medidas móviles.

Para estudiar la señal en el modo de recepción fijo se considera un tiempo de medida tal que permita la adquisición de varias tramas de audio, se define que sean 5 minutos, descartando para el análisis el primer minuto de medida debido al tiempo de sincronización del receptor y para que se demodule correctamente la señal.

Es conocido que la propagación de la señal presenta mayores problemas en una zona urbana que rural y por ello se propusieron las rutas 1 y 2 con el objetivo de comparar los dos resultados y conocer la diferencia real de recepción entre estas dos zonas. La primera es sobre la zona de Santa Fe, una zona urbana montañosa con una densidad de edificios grandes y donde hay dos lomas que provocan que no haya visión directa con el transmisor;

y la segunda en la zona de Iztapalapa y la Av. México 136 que asemeja a una zona rural y que es útil para distinguir la recepción fija en estas dos zonas diferentes.

El problema más común que se presenta en la toma de datos es la existencia de interferencias y ruido. Inicialmente se debe hacer una medida del ruido, para lo cual el receptor es capaz de situarse en canales adyacentes y tomar la lectura del ruido existente. Existen diferentes tipos de interferencias a lo largo de una ruta, debido a esto es necesario realizar una prueba sin transmisión de señal y recorrer la ruta registrando con el receptor el nivel de interferencia que exista, además existe la posibilidad de utilizar los perfiles RSCI que proporcionan el nivel de interferencia al mismo tiempo que se recibe la señal; esta opción puede ser considerada como única o como una opción complementaria.

Es necesario además realizar ciertos pasos que ayuden a identificar anomalías y tomar un criterio sobre los datos registrados. En cada medida se deben realizar anotaciones referentes a todas las circunstancias que pudieran afectar la recepción, de esta manera se pueden detectar fuentes probables de ruido o interferencias de otra índole; el uso de gráficas de nivel de campo, SNR y tramas de audio correctas, en función del tiempo en cada medida, de esta manera podrá identificarse una posible interferencia al notar sobre la gráfica un incremento anormal del campo; además los archivos IQ ayudan a comprobar el espectro de la señal DRM+, ya que al observar picos de ancho de banda muy pequeños se consideran como interferencias y se puede realizar una comparación con las anotaciones y graficas de nivel de campo para corroborar si es o no una interferencia.

Para determinar el umbral de recepción de campo eléctrico y de SNR se deben enfrentar estos dos parámetros con las tramas de audio correctas. Si los datos se alinean de forma creciente, el umbral es el mínimo valor sobre el cual todas las medidas son correctas. Además se han diseñado especialmente las rutas 5 y 6 para la determinación de los umbrales de recepción para las modulaciones 4-QAM y 16-QAM, respectivamente, como se observa en la figura 3.25.

La toma de medidas en el caso del modo de recepción móvil ha de realizarse sobre las rutas propuestas anteriormente, considerando también el tiempo de medidas estáticas que suceden cuando la unidad de medidas se detiene, esto porque un receptor móvil también sufre estas paradas. Los pasos para identificar anomalías en el registro de datos es muy parecido al caso de recepción fija, con excepción de los dos siguientes pasos.

- Analizar recorridos sobre el mapa. Se deben dibujar los recorridos sobre el mapa de la Ciudad de México para detectar situaciones que provoquen efectos concretos en la recepción, tales como túneles, pasos a desnivel u otras fuentes de interferencia.
- Gráficas de campo, SNR, tramas de audio correctas y velocidad. Es necesario agregar la velocidad de la unidad de medidas sobre la gráfica de los 3 parámetros.

La adquisición y análisis de los datos en las medidas referentes al modo de recepción hand-held, tanto en interiores de edificios como en exteriores necesita de diferentes requerimientos. Esto significa que es necesaria una intensidad de campo mayor para --- compensar la baja ganancia de la antena¹, la altura de la antena llevar el equipo a altura baja y la pérdida por penetración de edificio [EBU-3317].

Debido a que aún no se cuenta con dispositivos Hand-held DRM+ se trabajará con el equipo de pruebas para las medidas fijas y móviles, considerando los requerimientos anteriores para el cálculo del umbral de recepción y la adquisición de datos en general.

De esta manera las medidas se deben realizar sobre la ruta 7 definida en puntos sobre centros comerciales, ahí se ha de realizar la recepción de señal con movimiento y a una altura promedio del bolsillo al piso. Para compensar la diferencia de ganancias ha se sumarse los dBs correspondientes para que la medida sea considera Hand-held.

¹ De acuerdo a [DRMT-11] se considera una ganancia de -19.02 dBd para el modo de recepción Hand-held con antena externa y de -23.02 dBd para una antena integrada.

4 CONCLUSIONES GENERALES

- Se realizó un análisis de tres estaciones de FM sobre sus características de transmisión, logrando identificar los aspectos importantes para la posible adaptación de una transmisión simulcast de DRM+.
- Se realizó una propuesta de configuración de transmisión simulcast DRM+ y Radio UNAM FM, proponiendo el equipo necesario para el funcionamiento correcto sin interferencias.
- Se obtuvo la predicción de cobertura DRM+ mediante el software Radio Mobile, útil para la propuesta de medidas prácticas.
- Se comprobó en primera instancia que el sistema DRM+ presenta una excelente cobertura reduciendo su potencia 11.07 dB con respecto a la potencia FM.
- Se propuso una serie de rutas de medidas que cubren los objetivos directos de las pruebas propuestas.
- Se realizó una configuración de equipo de medidas para la obtención de los datos necesarios para la evaluación del sistema DRM+.
- Se realizó la propuesta de medidas y parámetros que han de determinar el desempeño del sistema DRM+.

5 DISCUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

El presente trabajo propuso una metodología de medidas necesaria para la evaluación del desempeño del sistema DRM+ con el uso de ciertos parámetros técnicos propios del sistema y bajo una configuración simulcast.

La implementación de una transmisión digital sobre una transmisión FM existente es una práctica que se está realizando en todas partes del mundo y que en México comenzará comercialmente en los inicios de este año y que atañerá en algún momento a todas las estaciones de radio. En esta investigación se ha realizado una configuración de transmisión exclusiva a la estación de FM de Radio UNAM y con el estándar de radio digital DRM+.

El trabajo realizado destaca los elementos más importantes que se tienen que considerar para que la implementación de la transmisión digital no interfiera con la transmisión analógica, pero para validar el buen funcionamiento es necesario realizar pruebas prácticas a lo largo de la cobertura estimada con anterioridad.

En esta investigación se ha desarrollado esa metodología de pruebas prácticas sobre el área de la predicción de cobertura a realizarse sobre una serie de rutas propuestas dentro de la Ciudad de México con las especificaciones de equipo y parámetros necesarios. Cabe señalar que ello implica una buena planificación de las medidas y una buena organización con el personal encargado de realizar las pruebas, además del costo que dicha campaña de pruebas implica.

Lo subsecuente a dicha investigación es la realización de las pruebas, las cuales necesariamente tendrían que llevarse a cabo en coordinación con el Consorcio DRM, interesado en la implementación del estándar de radio digital.

Se tiene la intención de que este trabajo sirva como un apoyo para la realización de pruebas futuras con la intención de implementar el sistema DRM+. Además de ser base para nuevas investigaciones acerca de transmisiones simulcast entre DRM+ y FM con la intención de ahondar más en las interferencias que se tienen entre un sistema y otro.

REFERENCIAS

Las referencias bibliográficas se presentan ordenadas alfabéticamente con el código que las identifica. El código de identificación está formado por las primeras 4 letras del primer autor y las dos últimas cifras del año de publicación. Cuando este código coincide en más de una referencia, se agrega una letra minúscula (a, b, c) para su distinción.

El código de identificación de las referencias que corresponden a documentos elaborados por organizaciones internacionales está formado por las primeras letras de la organización y las dos últimas cifras del año de publicación.

El código de identificación de recomendaciones, informes o estándares elaborados por organizaciones internacionales está formado por las primeras letras de la organización y las cifras más características del documento.

- [ARIB-10] *ISDB-T technical report. ANNEX-AA. Structure of ISDB-T system and its technical features.* (disponible en <http://www.dibeg.org/>, Octubre 2010).
- [BOWE-98] A J Bower, *Digital Radio-The Eureka 147 DAB System.* Electronic Engineering (BBC), Abril 1998.
- [BRAN-99] Karlheinz Brandenburg. *MP3 and AAC Explained.* AES 17th International Conference on High Quality Audio Coding, Agosto 1999.
- [BRIG-03] James Briggs, *Digital Broadcasting Below 30 MHz: DRM a Summary of the Field Trials.* EBU Technical Review, No.296 octubre 2003.
- [COFE-08] *Política de transición a la radio digital terrestre, de estaciones de radiodifusión sonora ubicadas dentro de la zona de coordinación de la frontera norte de México. Página web COFETEL 2010.*
- [COFE-11] *Acuerdo por el que se adopta el estándar para la radio digital terrestre y se establece la política para que los concesionarios y permisionarios de radiodifusión en las bandas 535-1705 kHz y 88-108 MHz, lleven a cabo la transición a la tecnología digital en forma voluntaria.* Junio 2011.
- [DAB-11] Tomado del sitio oficial de RFmondial en octubre de 2011.
http://www.worlddab.org/introduction_to_digital_broadcasting
- [DIBE-10] *Transmisión de Televisión Digital Terrestre. ISDB-T Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial.* DiBEG. Octubre 2010.
- [DIET-02] Martin Dietz, Stefan Meltzer. *CT-aacPlus — a state-of-the-art audio coding scheme.* EBU Technical Review N°291, Julio 2002.
- [DRM-09] Tomado del sitio oficial de RFmondial en septiembre de 2011.
http://www.drm.org/news_item/DRM%252B_successfully_trialled_in_Paris.2009.

- [DRM-10] DRM Field Trial. *Protection Ratios for FM interfered with by digital Broadcasting signals*. http://drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/drmplus-hdradio/Schutzabstaende-DRM-HD-Radio.pdf.2010.
- [DRM-11] Sitio oficial del Consorcio DRM <http://www.drm.org/summary>
- [DRM6A/503] Digital Radio Mondiale. *Results of the DRM field trial in Sri Lanka*. Document 6A/503-E, 2 de mayo del 2011.
- [DRM6A/512] Digital Radio Mondiale. *Results of the DRM field trial in Band I in Turin, Italy*. Document 6A/512-E, 3 de mayo del 2011.
- [DRM6A/532] Digital Radio Mondiale and British Broadcasting Corporation (BBC). *Results of the DRM high power field trial in the United Kingdom*. Document 6A/532-E, 5 de Mayo del 2011.
- [DRMT-11] DRM+ Technical Expert Group. *Planning Parameters for DRM Mode E (DRM+).Concerning the use in VHF bands I, II and III*. V. 3.0. Mayo 2011.
- [ETSI-401] *EN 300 401 V1.4.1, Radio Broadcast Systems: Digital Audio Broadcasting (DAB) to Mobile, Portable and Fixed Receivers*, European Telecommunications Standards Institute, Junio 2006.
- [ETSI-428] *TS 102 428 V1.2.1, Digital Audio Broadcasting (DAB); DMB video service; User Application Specification*, European Telecommunications Standards Institute, Abril 2009.
- [ETSI-563] *TS 102 563 V1.1.1. Digital Audio Broadcasting (DAB); Transport of Advanced Audio Coding (AAC) audio*, European Telecommunications Standards Institute, Febrero 2007.
- [ETSI-980] *ES 201 980 V3.3.1, Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification*, European Telecommunications Standards Institute, Agosto 2009.
- [HERR-07] Frank Herrmann, Larissa Anna Erismann, Markus Prosch, *The evolution of DAB*. EBU Technical Review, No.311, julio 2007.
- [HOFM-03] Frank Hofmann, Christian Hansen, and Wolfgang Schäfer. *Digital Radio Mondiale (DRM) Digital Sound Broadcasting in the AM Bands*. IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 43, no. 4, pp. 319-328, Septiembre 2003.
- [IEC-03] *Digital Radio Mondiale (DRM) – Part1: System Specification*, International Electrotechnical Commission, IEC 62272-1, marzo 2003.
- [ISO-11172] *Information technology -- Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s -- Part 3: Audio*. ISO/IEC 11172-3:1993, marzo 1993.
- [ISO-14496] *Information technology -- Coding of audio-visual objects -- Part 3: Audio* ISO/IEC 14496-3:2009, Septiembre 2009.
- [ITU 6E/54E] DRM. *Digital Broadcasting at Frequencies Below 30 MHz MF and HF Field- Tests Report Summary Final System Performance Report for IST-RADIATE 1999-20113 for ITU*. International Telecommunications Union ITU-R, Document 6E/54-E, febrero 2004.

Referencias

- [ITUBO-1130] *Sistemas de radiodifusión digital por satélite para receptores instalados en vehículos, portátiles y fijos en las bandas atribuidas al servicio de radiodifusión (sonora) por satélite en la gama de frecuencias 1 400-2700 MHz.* International Telecommunications Union ITU-R Recommendation BO. 1130-4, 2001.
- [ITUBS-1114] *Sistemas de radiodifusión sonora digital terrenal para receptores en vehículos, portátiles y fijos en la gama de frecuencias 30-3000 MHz.* International Telecommunications Union ITU-R Recommendation BS. 1114-6, Enero 2007.
- [ITUBS-1514] *Sistema para radiodifusión sonora digital en las bandas de radiodifusión por debajo de 30 MHz.* International Telecommunications Union ITU-R Recommendation BS. 1514-1, Octubre 2002.
- [ITUBS-1615] *“Planning parameters” for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz.* International Telecommunications Union ITU-R Recommendation BS. 1615, junio 2003.
- [ITUBS-1661] *“Signal-on-the-air” specifications of the digital system described in Annex 1 to Recommendation ITU-R BS.1514 for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30 MHz.* ITU-R BS.1661. 2003.
- [ITUBS-412] *Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF.* International Telecommunications Union ITU-R Recommendation BS.412-9, 1998.
- [ITUBS-774] *Necesidades del servicio relativo a la radiodifusión sonora digital para receptores a bordo de vehículos, portátiles y fijos, mediante transmisores terrenales, en las bandas de ondas métricas y decimétricas.* International Telecommunications Union ITU-R Recomendación BS. 774-2,1995.
- [ITU-GE06] Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06) Annex 3: Technical basis and characteristics.
- [JOHN-03] Steven A. Johnson. *The Structure and Generation of Robust Waveforms for AM In-Band On-Channel Digital Broadcasting.* iBiquity Digital Corporation. 2003.
- [KOZA-04] Franc Kozamernik; *DAB - from Digital Radio towards Mobile Multimedia.* EBU Technical Review, N° 297, Enero 2004.
- [MAIE-10] Friederike Maier. *Preliminary report: DRM+ measurements in band II.* Institute of Communications Technology. Germany. 2010.
- [MELT-06] Stefan Meltzer, Gerald Moser. *MPEG-4 HE-AAC v2 — audio coding for today's digital media world.* EBU Technical Review N°305, Enero 2006.
- [MIC-11] Ministry of Internal Affairs and Communications Government of Japan. *“Japan Completed Analog Switch Off in Terrestrial Television Broadcasting Successfully”.*
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eng/Releases/Telecommunications/110700_a.html

- [NAUT-11] Tomado del sitio oficial de Nautel en octubre de 2011.
http://www.nautel.com/v15_hdr.aspx
- [NRSC-01] *FM NRSC Report (Part 1 – FM IBOC)*, National Radio Systems Committee, Noviembre 2001.
- [NRSC-02] *AM NRSC Report (Part 2 – AM IBOC)*, National Radio Systems Committee, Abril 2002.
- [NRSC-08] NRSC-5-B, *In-band/on channel Digital Radio Broadcasting Standard*, Abril 2008.
- [PEYL-03] Paul J. Peyla. *The Structure and Generation of Robust Waveforms for FM In-Band On-Channel Digital Broadcasting*. iBiquity Digital Corporation. 2003.
- [SCHI-99] Dietmar Schill. *TC_SE029. LABTEST REPORT of DRM System Evaluation Tests*, DRM Technical Committee – System Evaluation, documento interno, marzo 1999.
- [SCHL-00] H. Schlegel, W. Schäfer, J. Mielke, D. Callonec. *TC_SE075. TC_CM_196. TC_CM_197. Laboratory Measurements II Report*, DRM Technical Committee – System Evaluation y Technical Committee – Channel Coding Modulation, documento interno, agosto 2000.
- [STEI-09] A. Steil, F. Schad, M. Feilen, M. Köhler, J. Lehnert, E. Hedrich and G. Kilian. *Digitising VHF FM sound broadcasting with DRM+ (DRM Mode E)*. 2009.
- [STOT-98] Jonathan Stott. *The how and why of COFDM*. EBU Technical Review N°278, Invierno 1998.
- [WBU-06] *Digital Radio Guide*. World Broadcasting Unions – Technical Committee, Noviembre 2006.
- [RFMO-11] Tomado del sitio oficial de RFmondial en octubre de 2001.
<http://www.rfmondial.com/index.php?id=23>
- [ITUSM-1708] *Mediciones de intensidad de campo a lo largo de una ruta con registros de las coordenadas geográficas*. International Telecommunication Union ITU-R. Recomendación 1708. 2005.
- [NOM-02] NOM-02-SCT1-04. *Especificaciones y requerimientos para la instalación y operación de estaciones de radiodifusión sonora en la banda de 88 a 108 mhz, con portadora principal modulada en frecuencia*. Mayo 2004.
- [EBU-3317] EBU-TECH 3317. *Planning parameters for hand held reception*. 2007.