



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE PRUEBAS DEL SISTEMA DRM+
EN DUQUE DE CAXIAS, BRASIL**

T E S I S

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

P R E S E N T A :

JOSÉ ALFONSO GARCÍA AVILÉS

TUTOR:

DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

2013



Ciudad Universitaria, noviembre de 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	M.I. Jesús Reyes García
Vocal:	Dr. José María Matías Maruri
Secretario:	M.I. Damián Federico Vargas Sandoval
1er. Suplente:	Ing. Margarita Bautista González
2do. Suplente:	M.I. Juventino Cuellar González

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.

TUTOR DE LA TESIS
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

FIRMA

Agradecimientos

A la UNAM, por todo lo que me ha proporcionado durante todos estos años y lo que falta. Mi Alma máter.

A la Facultad de Ingeniería, mi segunda casa, por haberme dado no solo los conocimientos y herramientas, sino haberme puesto a las personas correctas en mi camino.

Al Dr. Matías, por su paciencia y consejo durante todo el proceso, por sus charlas y regaños necesarios.

A mis sinodales, por sus comentarios y apoyos brindados, por sus buenos deseos.

A mis amigos encontrados durante la carrera, especialmente a Vinicio, Luisa y Efren, ya que sin ellos no habría sido capaz de lograr esto, gracias por haberme hecho trabajar y salir adelante. A Gerardo y Daniel, por haberme dejado entrar en este círculo y haber encontrado personas tan valiosas, ya que sabemos no todo se aprende dentro de la Facultad.

A Ellas, ya que su paso por mi vida definitivamente contribuyó a lo que soy ahora, por ese apoyo y comprensión recibidos.

A mis hermanos, Ivette y Augusto, ya que aunque no siempre nos entendamos, sus buenos deseos siempre los he sentido, porque la familia siempre esta ahí para apoyarnos.

A mis padres, Rosa María y Alfonso, porque siempre han estado ahí cuando los he necesitado, ya sea para una palabra de aliento, un abrazo, una llamada de atención o simplemente un hombro para llorar. Este logro es definitivamente trabajo suyo, 24 años de trabajo continuo han rendido sus frutos, y aún faltan más por venir. Por haber forjado en mi lo necesario para afrontar la vida sin miedos ni complicaciones, por haberme dado las armas necesarias, los amo.

Índice general

Objetivo	1
1. Introducción	2
1.1. Principios de la radiodifusión sonora	2
1.1.1. Amplitud Modulada AM	3
1.1.2. Frecuencia Modulada FM	5
1.2. La radio digital	7
1.2.1. ¿Por qué digitalizar la radio?	8
1.2.2. Sistema IBOC - HD Radio	9
1.2.3. Sistema DAB	10
1.2.4. Sistema ISDB	10
1.3. Sistema DRM y DRM+	11
1.3.1. Descripción del sistema	12
1.3.1.1. Codificación de contenido y Multiplexación de DRM	13
1.3.1.2. Codificación y Modulación de DRM	14
1.3.1.3. Tramas de la señal transmitida	15
1.3.1.4. Parámetros de Modulación y Codificación	16
1.3.1.5. Payload (Carga útil) del sistema	17
2. Descripción de las pruebas	19
2.1. Esquema de radio comunitaria	19
2.2. Justificación de las pruebas	20
2.3. Descripción de las pruebas	21
2.3.1. Equipo empleado	22
2.3.2. Obtención de los datos en el laboratorio móvil	22
2.3.3. Metodología de las pruebas	23
2.3.3.1. Rutas	23
2.3.3.2. Parámetros analizados	24
2.3.3.3. Comprobación de la aproximación del factor de antena.	26
2.3.3.4. Presentación de resultados	27
3. Resultados de recepción estática	29
3.1. Obtención de las muestras	29

3.2.	Obtención de valores de campo eléctrico	30
3.2.1.	Ordenación de valores de campo eléctrico	31
3.3.	Resultados	32
3.3.1.	Potencia baja y modulación 4 QAM	32
3.3.2.	Potencia baja y modulación 16 QAM	34
3.3.3.	Potencia alta y modulación 4 QAM	35
3.3.4.	Potencia alta y modulación 16 QAM	36
3.3.5.	Resumen	37
3.4.	Cobertura y umbrales de recepción	37
3.5.	Causas de errores en la recepción	39
3.5.1.	Modulación 4 QAM	40
3.5.1.1.	Potencia baja: 1.36 Watts	40
3.5.1.2.	Potencia alta: 4.36 Watts	40
3.5.2.	Modulación 16 QAM	40
3.5.2.1.	Potencia baja: 1.36 Watts	40
3.5.2.2.	Potencia alta: 4.36 Watts	41
3.5.3.	Conclusión de errores de recepción	41
4.	Resultados de recepción móvil	43
4.1.	Obtención de las muestras	43
4.1.1.	SNR en recepción móvil	43
4.2.	Resultados	44
4.2.1.	Potencia baja y modulación 4 QAM	45
4.2.2.	Potencia baja y modulación 16 QAM	46
4.2.3.	Potencia alta y modulación 4 QAM	46
4.2.4.	Potencia alta y modulación 16 QAM	47
4.2.5.	Resumen	48
4.3.	Cobertura y umbral de recepción	49
4.3.1.	Comparación entre recepción estática y móvil	50
4.4.	Causas de errores en la recepción	53
4.4.1.	Modulación 4 QAM	53
4.4.1.1.	Potencia baja: 1.36 Watts	53
4.4.1.2.	Potencia alta: 4.36 Watts	54
4.4.2.	Modulación 16 QAM	54
4.4.2.1.	Potencia baja: 1.36 Watts	54
4.4.2.2.	Potencia alta: 4.36 Watts	55
4.4.3.	Conclusión del estudio de los errores de recepción	55
5.	Conclusiones y resultados	57
5.1.	Recepción estática	57
5.2.	Recepción móvil	58

5.3. Resumen 59
 5.3.1. Experiencia personal 60
5.4. Colaboración en la elaboración del reporte de pruebas 60
Bibliografía 65

Objetivo

El objetivo principal de esta tesis, es obtener resultados y estimación, tanto del alcance de cobertura, como de los umbrales mínimos de recepción, de los diversos tipos de transmisión empleados en los ensayos de pruebas de radio digital, realizados en Duque de Caxias, Brasil; por medio del análisis de los datos arrojados en dichos ensayos de pruebas. Se hará una evaluación del sistema operando bajo el esquema de *estaciones de muy baja potencia*, o dicho de otra manera, el de *estaciones de radio comunitarias*.

Un objetivo secundario es el de contribuir a la publicación de un informe de las pruebas realizadas, el cual ayudará al gobierno brasileño y al Ministerio de Comunicaciones de Brasil a decidir el estándar de radio digital a adoptarse en dicho país.

1 Introducción

En este capítulo se plantea describir de manera breve los inicios de la radio como la conocemos actualmente y de la radio digital. Así mismo, se describirán varios de los sistemas de radio digital que existen actualmente, enfocándose en el sistema DRM+, el cual es el empleado en las pruebas sobre las que esta basada esta tesis.

1.1. Principios de la radiodifusión sonora

La radiodifusión sonora surge de la necesidad de comunicar un mensaje a una población o comunidad, generalmente grande y en un lugar distante, de una manera rápida y lo más natural posible, es decir, como si se diera a conocer el mensaje de persona a persona. Todo esto con la ventaja de no tener que usar cables que comuniquen a la fuente y al destino del mensaje.

Antes de la radiodifusión sonora existieron otros métodos para transmitir información de manera radiada a lugares distantes, como el telégrafo inalámbrico. Algunos de estos métodos tenían la desventaja de no poder enviar voz, debido a las restricciones propias de la época; gracias a las técnicas de modulación y al avance de la tecnología, se encontró la manera de radiar una señal que contuviera la información en sí, no una representación o código de la misma, es decir, la voz.

Las técnicas ideadas para la transmisión de voz, por medio de ondas electromagnéticas, fueron las de la modulación en amplitud y luego en frecuencia. Dichas técnicas permitieron manipular las ondas de manera tal, que la información de audio pudiera enviarse, superando problemas como el ancho de banda necesario para la transmisión o la distancia a cubrir de las mismas, es decir, la cobertura de la señal radiada.

A principios de la década de los 1900, Reginald Fessenden, a partir de los experimentos realizados por Marconi años atrás con su telégrafo inalámbrico, logra el 23 de diciembre de 1900 transmitir el primer audio de manera inalámbrica, desde Rock Point, Maryland, Estados Unidos, a una distancia aproximada de 2.57 Km. Con estos experimentos se convirtió en el padre de la radiodifusión actual.



Figura 1.1: Reginald Fessenden

Se puede decir que la radiodifusión sonora nace como medio de comunicación masivo, a partir de estos experimentos.

A continuación se explicará el principio de funcionamiento de las dos modulaciones básicas usadas en la radiodifusión sonora analógica, amplitud modulada y frecuencia modulada.

1.1.1. Amplitud Modulada AM

Para lograr la transmisión de voz empleando el espectro radioeléctrico, se hicieron varios intentos y varias ideas surgieron. Se planearon y se probaron varios métodos, es decir, se intentó con varios tipos de modulaciones.

Uno de los métodos ya probados para la transmisión de audio es la Modulación en Amplitud (AM), empleada en los sistemas telefónicos alrededor de la década de 1870. Esta técnica en un principio fue llamada como *Corrientes Ondulantes*.

Este es el método más sencillo, pero no el más eficiente. Una señal debe ser radiada al medio para que llegue hasta el destino. Para poder enviar la señal a través de dicho medio hay que adecuarla a éste, lo cual se logra modulando la señal, ya que de no hacerlo sería imposible llegar a las distancias que se requieren. La señal a enviar se hará oscilar a una frecuencia fija y la amplitud de ésta variará, en relación a la señal de voz que queremos transmitir.

La señal que contiene al mensaje será la *Moduladora*, ya que ésta modulará a la señal que se encargue de llevar la información; la señal que interactúa con la moduladora será la *Portadora*, ésta es la señal oscilante. El resultado de esta interacción, es decir, la señal radiada será conocida como *Modulada*. Dicha señal es la que viaja grandes distancias y es en donde se lleva el mensaje a su destino, para después ser interpretada por los receptores y poder recrear el mensaje original. La señal obtenida, vista como función del tiempo se aprecia en la imagen 1.2:

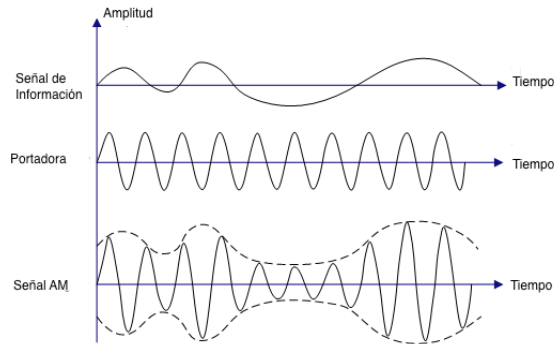


Figura 1.2: Amplitud Modulada AM

A continuación se va a explicar el fundamento matemático de la modulación en amplitud. Para ello partimos de la siguiente expresión:

$$x_c(t) = A(t)\text{Cos}[\omega_c t + \Phi(t)] \quad (1.1)$$

La ecuación (1.1) hace referencia a la portadora, la cual es una señal sinusoidal, cuya frecuencia es la frecuencia de transmisión; al igualar a cero la variación instantánea de fase, $\Phi(t)$, nos aseguramos que la modulación sea lineal, requisito para poder modular en amplitud[17]. Así obtenemos la ecuación (1.2).

$$x_c(t) = A(t)\text{Cos}\omega_c t \quad (1.2)$$

Para obtener la *doble banda lateral (DSB)* o también conocida como *AM Completa*, se necesita que la amplitud $A(t)$ sea proporcional al mensaje o sea la señal moduladora, $m(t)$. La siguiente expresión será la resultante del modulador DSB.

$$x_c(t) = A_c m(t)\text{Cos}\omega_c t \quad (1.3)$$

La doble banda lateral, recibe su nombre, debido a que en el dominio de la frecuencia, el espectro del mensaje original es trasladado a la frecuencia de la portadora $\omega_c t$, para poder ser enviado de manera más eficiente dentro del medio, este tiene dos partes o bandas, una positiva y una negativa. En la ecuación (1.4) se expresa matemáticamente esto.

$$X_c(f) = \frac{1}{2}A_c M(f + f_c) + \frac{1}{2}A_c M(f - f_c) \quad (1.4)$$

Los espectros $M(f-f_c)$ y $M(f+f_c)$ son simplemente el espectro del mensaje trasladado a cada lado de la frecuencia de la portadora f_c . La porción de $M(f+f_c)$ por encima de la frecuencia de la portadora se le conoce como *banda lateral superior* o *USB*, y la parte por debajo de la

frecuencia de la portadora se le conoce como *banda lateral inferior o LSB*. En la figura 1.3 se muestra.

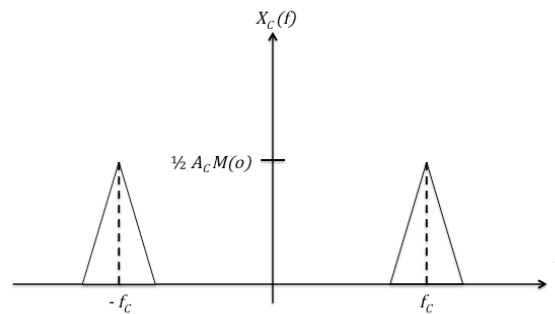


Figura 1.3: Espectro señal AM DSB

Matemáticamente existen variantes de esta modulación, pero estas variantes no se aprecian tan fácilmente en el dominio del tiempo, sino en el de la frecuencia. Estas variantes son en función de la cantidad de espectro radioeléctrico empleado para la transmisión de la señal.

Dichas variaciones en la práctica, ayudan de diversas maneras. Cuando empezó a emplearse la radiodifusión como un medio de comunicación masivo, las radiodifusoras necesitaban enviar la mayor cantidad de información posible al mayor número de personas, para ello se empleaba la modulación *AM DSB* o *AM completa*, en donde se envía en la portadora una componente de potencia muy grande. Al ir mejorando y abaratándose los equipos receptores, se pudieron emplear otras modulaciones como la *DSB-SC*, donde la portadora es eliminada, así no se desperdicia potencia por parte de la radiodifusora, es decir, existe un ahorro importante en cuanto a la energía utilizada para la transmisión.

La radio AM ha sido empleada mayormente para la transmisión de voz, debido a las limitaciones de ancho de banda, normalmente entre 9 y 20 kHz, dependiendo la región en donde se esté, la transmisión de música es posible pero no con la mejor calidad. Es por esta razón que a lo largo de los años, ha sido empleada como medio de opinión y de información, es decir su carácter es mas bien el de un servicio que el de un instrumento lúdico o con fines comerciales. Otra razón por la cual ha sido empleada de esta manera, es su cobertura, debido al comportamiento de las ondas radioeléctricas en estas frecuencias (535 kHz a 1705 kHz), el alcance puede llegar a ser en el rango de los cientos de km.

1.1.2. Frecuencia Modulada FM

Después de la modulación AM, se siguió investigando y se descubrió que hay maneras mas eficientes de transmitir voz, incluso de mejorar la calidad de la misma.

La Frecuencia Modulada (FM), es un tipo de modulación inventada por Edwin Howard Armstrong (1890 - 1954), quien entre otras cosas, patentó en 1914 el *Circuito Regenerativo*, en 1918

el *Receptor Superheterodino* y en 1922 el *Circuito Super-Regenerativo*. La técnica inventada es en realidad el *FM de banda ancha* (WBFM), en la que como su nombre se indica se emplea una banda de operación ancha, para la transmisión de mas información sobre la onda.



Figura 1.4: Edward Howard Armstrong

A diferencia de la modulación en amplitud, la frecuencia modulada utiliza una onda de amplitud fija.

La señal que contiene al mensaje es la llamada *Moduladora*; la señal que se hará variar de acuerdo a los cambios de la moduladora, es la señal *Portadora*, esta señal es una onda de amplitud y frecuencia fija; el resultado de esta interacción es una señal llamada *Modulada*, la cual varía su frecuencia proporcionalmente a las variaciones de voltaje de la señal moduladora. En la siguiente imagen se aprecia la relación en la desviación de frecuencia de la portadora y el voltaje de la señal moduladora.

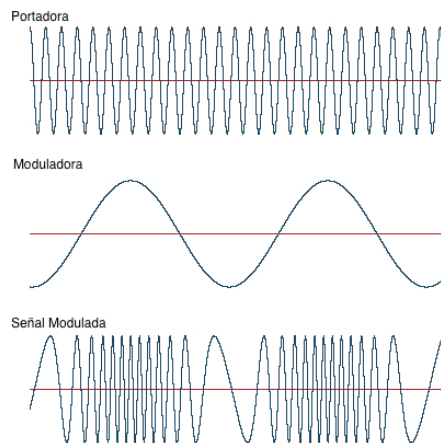


Figura 1.5: Frecuencia Modulada FM

La ecuación (1.1) representa a una portadora sinusoidal, pero esta vez la componente de la desviación de fase, $\Phi(t)$, no será igual cero. La componente $A(t)$, será constante, ya que la amplitud no varía. Sin embargo la *desviación de frecuencia (angular)* debe ser proporcional al mensaje, $m(t)$.

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = k_f m(t) \quad (1.5)$$

En donde $k_f \left[\frac{\text{Rad/S}}{\text{V}} \right]$ representa a la *constante de desviación de frecuencia*, la cual hará variar al señal transmitida (*modulada*), de acuerdo al voltaje del mensaje. Esta componente se puede expresar de la siguiente forma.

$$k_f = 2\pi f_d \quad (1.6)$$

Al combinar las ecuaciones (1.5) y (1.6) en la ecuación (1.1), se obtiene la siguiente expresión.

$$x_c(t) = A_c \text{Cos} \left[\omega_c + \int_{-\infty}^t m(\lambda) d(\lambda) \right] \quad (1.7)$$

La ecuación (1.7) expresa completamente el comportamiento de una portadora modulada en frecuencia o FM[11].

La radio FM, a diferencia de la AM, ocupa mucho mayor ancho de banda en su transmisión, 200 kHz, por lo que la calidad del audio recibido es mucho mayor. La radio FM utiliza, típicamente, la banda de frecuencias de los 88 MHz a los 108 MHz. Debido a las características propias de la modulación, el uso que se le ha dado es mayormente para la transmisión de música

1.2. La radio digital

La radio digital es el siguiente paso en la evolución de la radio. Es una conversión, en donde en lugar de enviar el mensaje de forma analógica, es decir, se emplean modulaciones digitales, las cuales suelen ser mucho más complejas en su implementación e interpretación que las analógicas.

En esta forma, lo que es enviado, son *bits*. Estos bits son los mismos que se emplean al grabar un *Compact Disc*, al reproducir una canción desde nuestro reproductor mp3, al escribir un documento en un procesador de textos o al ver un video desde internet. Es decir, al realizar esta conversión a lo digital, no habrá diferencia en la naturaleza de la señal, es decir se manejarán bits, lo cual hace posible mandar diferentes contenidos (música, imágenes, contenido multimedia) por el mismo canal lógico.

1.2.1. ¿Por qué digitalizar la radio?

Como se mencionó anteriormente, la digitalización de la radio tiene la ventaja de la transmisión del mismo tipo de datos, pero no es la única. Al emplear una señal digital, lo que se hace es que se pueden aprovechar tecnologías de codificación y compresión de audio de otros sistemas, para la emisión de la radiodifusora.

Las ventajas de esta evolución las podríamos agrupar en dos tipos: Aquellas que benefician al radioescucha y aquellas que benefician a las radiodifusoras y a sus respectivos dueños y socios.

Los beneficios para el radioescucha, entre las de mayor importancia se encuentran las siguientes:

- Mayor calidad de audio. Dependiendo de la banda que se digitalice, es decir AM o FM, se pueden obtener calidades de audio equivalentes al FM o al Compact Disc, respectivamente.
- Mayor contenido. Esta es tal vez, la mayor ventaja de los sistemas de radio digital, la posibilidad de enviar contenido multimedia como imágenes, páginas web, información del tráfico en tiempo real, etc.
- Protección de la emisión. Es decir mayor robustez en la transmisión, debido a la naturaleza de la señal y a los nuevos equipos necesarios para la recepción, la relación entre el ruido y la señal puede ser menor, sin perder calidad del audio.
- Receptores de bajo costo. A largo plazo los receptores bajarán de precio, como toda tecnología nueva, entre más personas la adopten más se abaratará.

Los beneficios para la radiodifusora, por listar algunos, son los siguientes:

- Garantizar la recepción en dispositivos móviles. Debido a la técnica empleada, varios efectos físicos como el multitrayecto o los desvanecimientos, no causan grandes perjuicios en la señal recibida.
- Optimización del espectro radioeléctrico. Debido a que se emplean señales comprimidas, se pueden enviar varias emisiones a la vez en el mismo canal o frecuencia.
- Configuración de redes en frecuencia única. Es posible la creación de una red con la misma frecuencia, para proporcionar cobertura a una región amplia o complicada geográficamente, una diferencia notoria respecto a la FM y la AM.
- Proporcionar servicios de valor agregado. Debido a que es un canal digital y no hay distinción en el tipo de datos enviado, es posible multiplexar varios servicios dentro de la misma emisión para enviar imágenes, datos del cantante, páginas web, reportes del tráfico, etc. Es decir, puede ser más competitiva dentro del mismo medio, al proporcionar servicios que antes pertenecían a otros mercados.

Estas ventajas actualmente ya son ofrecidas por diversos consorcios y organismos a nivel mundial. Cada uno tiene como fin el mismo, digitalizar la radio para ofrecer nuevos y mejores servicios, las diferencias radican en el tipo de tecnología empleado así como el origen de los mismos.

Todos los estándares funcionan de la misma manera, al menos en cuanto al concepto. La señal analógica de audio, es digitalizada y luego comprimida (para esto utilizan algún *codec* de audio,

el cual permite reducir considerablemente la tasa de bits empleada en la transmisión, sin perder calidad de audio; esto es lo que hace posible la multiplexación de varias señales en el mismo canal) luego la señal es radiada y recibida por el usuario, para después poder ser reconstruida y recuperar el mensaje original.

1.2.2. Sistema IBOC - HD Radio

IBOC (In Band - On Channel) o En Banda y En Canal, es un sistema de radio digital de origen estadounidense, creado por la empresa *Ibiquity Digital Corporation*.

La principal característica de este sistema es que permite la transmisión en modo *Híbrido o Simulcast*, es decir, la convivencia de la señal analógica con la señal digital en la misma frecuencia. Esto es una ventaja ya que permite la adopción del sistema de manera paulatina y de manera muy amigable con los usuarios finales.

También tiene la posibilidad de *Multicast*, es decir, el envío de varias emisiones sobre el mismo canal.

Al ser un estándar propietario, cada estación que quiera emplear el sistema debe pagar una tarifa al consorcio *iBiquity* por uso de la tecnología. Todo el sistema está comercializado bajo la marca de *HD Radio*, nombre que da la idea de un audio de mucha mayor calidad.

El sistema contempla tanto la banda de AM convencional, o de onda media; así como la de FM. Se suelen presentar algunas interferencias con los canales adyacentes al emplear el modo híbrido, sin embargo estos desaparecerán al adoptarse por completo el sistema digital. La señal analógica de FM emplea un ancho de banda de 200 kHz, su contraparte digital emplea una señal con un ancho de banda de 400 kHz.

México adoptó oficialmente el estándar el 16 de junio de 2011[6]. Actualmente existen varias estaciones que transmiten la señal analógica a la par de la señal digital, una parte de ellas son las que se encuentran en la zona fronteriza, a no más de 320 km de ésta[7], la otra parte se encuentra en la Ciudad de México; Grupo Imagen y el IMER son algunos de los concesionarios que emplean esta tecnología.

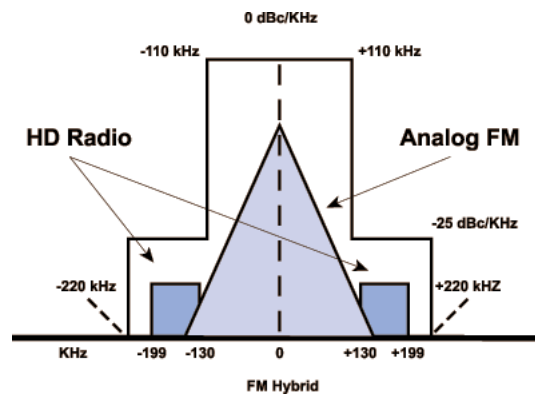


Figura 1.6: Espectro del modo FM Híbrido de IBOC-HD Radio

1.2.3. Sistema DAB

DAB (Digital Audio Broadcasting) o Radiodifusión de Audio Digital, es un estándar europeo desarrollado en un proyecto de investigación dentro del programa europeo *EUREKA*, se le conoce por lo tanto como *Eureka 147*. Como los demás estándares, esta diseñado para aumentar la calidad del audio y poder ofrecer servicios de valor agregado, servicios multimedia, etc. Este sistema, a diferencia de otros, no funciona en las bandas de la radio analógica, sino que funciona en la Banda III (174 MHz – 240 MHz) y en Banda L (1,452 MHz – 1,492 MHz) y además soporta no solo la difusión de radio digital terrestre, sino también satelital.

Existen 4 modos de de transmisión, diseñados específicamente para ciertas condiciones, como la transmisión en banda L o en banda III, dependiendo de las necesidades de la región o de los encargados de implementar el servicio, se elegirá un modo u otro..

El proyecto de desarrollo comenzó en 1980. La *Corporación Noruega de Radiodifusión (NRK)* lanzo en junio 1 de 1995 la primera estación que implementaba DAB en el mundo, la *NRK Klassisk*. Los reproductores han estado en el mercado desde finales de los años 90's.

Se utiliza el codec *MPEG-1 Audio Layer II (MP2)* para enviar el audio, pero se ha decidido sacrificar un poco la calidad del audio para poder hacer el protocolo más robusto y asegurarse de tener una buena recepción en sistemas móviles. En octubre de 2005 el Comité Técnico del *World DMB Forum*, organismo que regula lo referente al estándar, recomendó que se adoptara el codec de audio AAC+, con lo cuál la calidad de audio aumentaría notablemente y será posible el envío de más programas de sobre el mismo canal digital, es así como nació una extensión del estándar, el DAB+.



Figura 1.7: Logo DAB Radio digital

En America del Norte existen problemas por el uso del estándar en la banda L, debido a que el uso de ese espectro esta restringido para aplicaciones militares o de seguridad, sobre todo en Estados Unidos; Canadá llego a un acuerdo para no emplear esta banda en el sistema DAB.

1.2.4. Sistema ISDB

El *ISDB (International Services Digital Broadcasting)* es un estándar japonés tanto para televisión como para radio digital creado por el *DiBEG (Digital Broadcasting Expert Group)*. Dependiendo de como se transmita la señal, existen variantes del estándar. Una de las ventajas de éste sistema, es que facilita la implementación de redes en frecuencia única o SFN.

ISDB-S, hace referencia a la transmisión satelital de televisión; ISDB-C especifica la transmisión mediante el uso de un medio guiado o cable; mientras que el ISDB-T especifica la transmisión *terrestre*, esta variante rige en cuanto a especificaciones tanto a la televisión (DTV) como al radio digital. Es decir que trabajan y conviven en la misma banda de frecuencias de operación.

Se emplea la modulación de multiplexación por división de frecuencias ortogonales u *OFDM*.

ISDB-Tsb (Terrestrial Sound Broadcasting) es la variación del estándar general que explica y define de manera precisa como enviar señales digitales de radio. En ISDB-T la señal se divide en 13 segmentos o bloques, para poder suministrar el servicios de radio digital se emplean solo 3 de estos segmentos.

La banda de operación del sistema es en lo que actualmente es el canal 7 en televisión analógica, 188 MHz - 192 MHz en VHF; al igual que DAB pero a diferencia de los demás sistemas, la transmisión de las señales analógicas de AM y FM aún continúan.

ISDB-T ha sido adoptado ampliamente en Centro y Suramérica, con algunas excepciones; Brasil fue el primero en hacerlo con una ligera modificación al estándar.

1.3. Sistema DRM y DRM+

El sistema *DRM (Digital Radio Mondiale)* es un estándar promovido desde Europa; además es el nombre del consorcio que administra todo lo referente al propio estándar.

A diferencia de otros sistemas como HD Radio, este estándar es libre, lo que significa que cualquier radiodifusor puede adoptarlo sin necesidad de pagar una renta o tarifa al consorcio por usarlo, no así los fabricantes de equipo, los cuales deben pagar regalías al consorcio. Esto representa una clara ventaja sobre los competidores, pero a la vez un gran problema, pues no se logra llegar a un consenso sobre cómo fabricar los receptores.

La documentación técnica ha sido publicada por la *ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones)* y ha recibido las recomendaciones necesarias por parte de la UIT.

DRM se crea para digitalizar la radio en frecuencias por debajo de los 30 MHz, es decir las bandas de LF, MF y HF (Frecuencias baja, media y alta) en las cuales se encuentra el AM analógico y la radio de *Onda Corta* o *Short Wave*. Es el único sistema que plantea la digitalización de las bandas entre los 3 y 30 MHz, es decir, la digitalización de la Onda Corta; estas señales debido al comportamiento de la ionósfera pueden tener un alcance de varios cientos o miles de kilómetros, incluso pueden llegar a darle la vuelta a la Tierra.

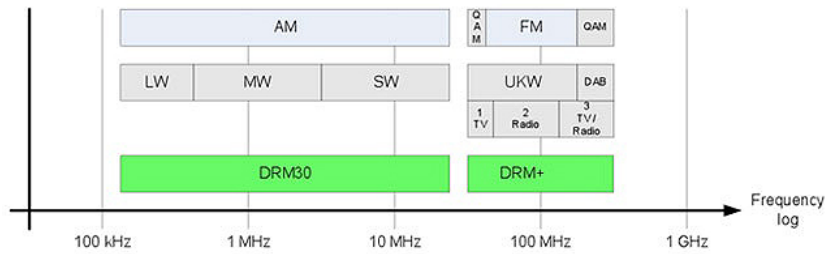


Figura 1.8: Banda de operación de DRM y DRM+

En la figura 1.8 se observan las bandas de operación del sistema DRM, se divide en dos modos principales de operación, el llamado DRM 30 debido a que trabaja debajo de los 30 MHz; y una actualización del estándar llamado DRM+, el cual opera desde los 30 MHz hasta los 300 MHz, centrado en la Banda II, la cual es la banda de operación del FM analógico[8, 9].

1.3.1. Descripción del sistema

El sistema (DRM30) puede operar con canales de 9 ó 10 kHz, o múltiplos y submúltiplos de estos. Las diferencias radican en que tanto del flujo de bits está destinado para el audio, para la protección y corrección de errores o para la transferencia de datos multimedia.

La estructura del sistema se puede dividir en subsistemas, cada uno con un propósito específico, como la codificación del contenido, la compresión del audio, la generación de la señal o la parte de radiofrecuencia. Se puede apreciar en la figura 1.9, la cadena de radiodifusión de la señal, con un transmisor de servicio único.

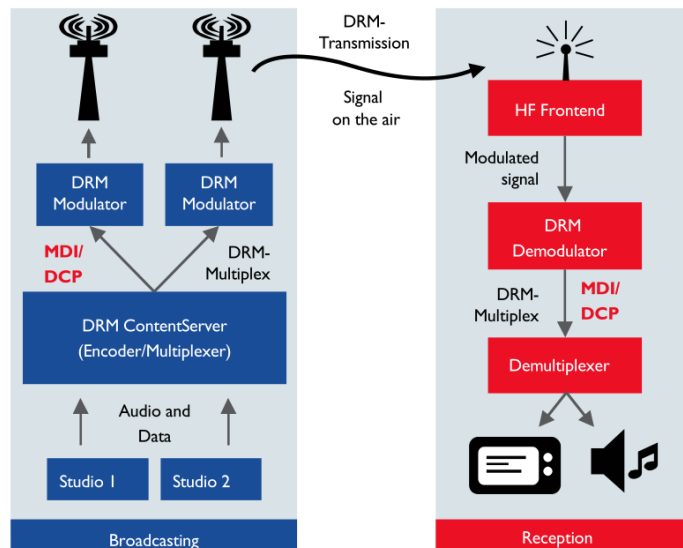


Figura 1.9: Cadena de radiodifusión de DRM

1.3.1.1. Codificación de contenido y Multiplexación de DRM

Como se aprecia en la imagen 1.10, esta parte del proceso la realiza un equipo conocido como *Content Server* o *Servidor de contenido*, el cual trabaja con distintos tipos de información que generan un tipo específico de contenido de canal:

- El audio y datos codificados que son combinados en el primer multiplexor, este canal lógico es conocido como *MSC (Main Service Channel o Canal de Servicio Principal)*[16].
- El segundo tipo de información se refiere a dos canales lógicos; el *FAC (Fast Acces Channel o Canal de Acceso Rápido)* y el *SDC (Service Description Channel o Canal de Descripción del Servicio)*. El propósito de estos datos dentro del flujo de la señal principal de DRM, es de identificación y control del transmisor y para la decodificación en el receptor[16].

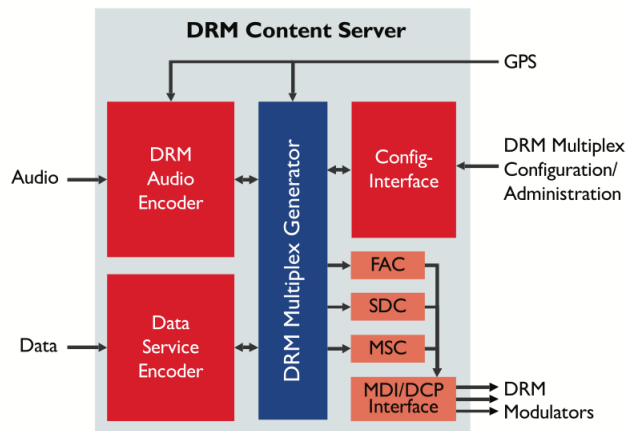


Figura 1.10: Codificación y Multiplexación de DRM

Los codificadores de audio y datos aseguran que la información recibida por estos, sean convertidas a un formato digital adecuado, estas salidas pueden ser modificadas más adelante en el proceso a fin de obtener mayor o menor protección, esto se realiza en los codificadores de canal. Una vez se tienen estos flujos de datos se envían al multiplexor, el cuál se encarga de darles la estructura de *frame o cuadro* necesarios en el flujo de bits.

Uno de los aspectos mejor aprovechados de DRM es la posibilidad de escoger el tipo de codificación de audio empleado, según las necesidades del radiodifusor. En DRM existen tres codificadores:

AAC: Advanced Audio Coding. Es el estándar de compresión más usado por este sistema, es especialmente usado para las transmisiones con contenido musical, donde se necesita una buena calidad del audio, con la gran ventaja de proporcionar un flujo de bits relativamente bajo sin sacrificar la calidad de la transmisión.

CELP: Code-Exited Linear Prediction. Es un algoritmo empleado mayoritariamente para voz, no música. Ésta característica lo hace idóneo para la transmisión de programas basados

en voz, como lo son los de discusión o debate. Genera un flujo de bits bastante pequeño, por lo que se puede emplear con modos robustos para evitar y corregir errores o se pueden enviar varios canales de audio sin sacrificar calidad.

HVXC: Harmonic Vector Excitation Codec. Es un algoritmo de predicción lineal, empleado al igual que CELP, para voz que genera tasas de bits muy bajas.

También es posible escoger el tipo de modo de transmisión de los cinco posibles: *A, B, C, D o E*. Estos modos hacen referencia a los parámetros de la modulación OFMD, como la duración del intervalo de guarda o la separación entre subportadoras.

Una vez se conforman los canales de acceso rápido, de descripción de servicio y el canal principal, el flujo debe pasar por el protocolo de distribución de DRM.

La generación de un flujo de datos con los parámetros e información requeridas para la correcta transmisión de la señal combinada (audio y datos multimedia) se lleva a cabo mediante la distribución de los canales de contenido a través de dos procesos. La *MDI Interface de Distribución Multiplexada* y el *DCP Protocolo de Comunicaciones y Distribución*. Estos protocolos sirven para obtener una correcta comunicación entre los distintos pasos del proceso.

1.3.1.2. Codificación y Modulación de DRM

En la siguiente imagen se aprecia el diagrama a bloques de la codificación y modulación de las señales de los distintos canales generados en la etapa anterior del proceso.

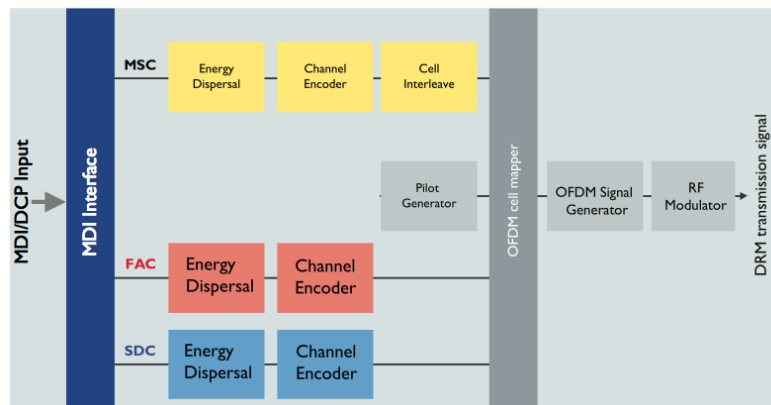


Figura 1.11: Diagrama a bloques de un modulador DRM

Los *dispersores de energía* reordenan los bits de forma aleatoria de manera que reducen la posibilidad de *regularidades* no deseadas en la señal transmitida, es decir, encontrar cadenas de bits con el mismo valor lógico, *uno o cero*, lo que puede ocasionar errores en la recepción de la señal debido a la pérdida de sincronía.

El *codificador de canal*, añade bits de redundancia para otorgar protección y corrección de errores. En este bloque también se realiza el mapeo de la información digital a las *celdas QAM*, que es el tipo de modulación básica empleado en la transmisión.

El *entrelazado de celdas* reordena la secuencia de bits en el tiempo a manera de *revolver* la señal, de manera que esta sea afectada lo menos posible por los efectos de *desvanecimiento rápido*.

En la parte derecha del diagrama de bloques, se aprecia el *generador de portadoras piloto*, el cual introduce portadoras con fases y amplitudes preestablecidas para la posterior demodulación en el receptor.

El *mapeador de celdas OFDM* recolecta la información de los datos a enviar y los ordena en una malla de tiempo-frecuencia, para distribuir la información a través de las *subportadoras*. En estos dos últimos bloques se introduce información que le permite al receptor demodular de manera correcta la información recibida.

El *generador de la señal OFDM*, como su nombre lo indica, es el que genera la señal DRM, es el equivalente a la señal generada en *Frecuencia Intermedia (IF)*, en el radio convencional. Este flujo es montado al *modulador*, no tiene que ser uno especial para la señal digital, puede ser el mismo empleado para la transmisión de la señal analógica, para después poder radiarse por la antena de la estación.

1.3.1.3. Tramas de la señal transmitida

La señal transmitida de DRM esta conformada por *frames o tramas*, en las cuales la información tanto del servicio de audio o multimedia, como de los propios parámetros del sistema, son transmitidos.

En la imagen 1.11 se aprecia la relación de tiempo entre los tres tipos de datos principales, es decir los canales de acceso rápido, de descripción del servicio y el de servicio principal.

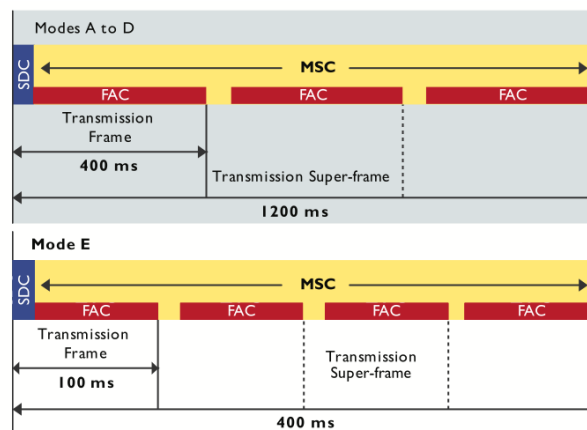


Figura 1.12: Estructura de Bloques de DRM30 y DRM+

Como se ha mencionado antes, los modos de la A a la D pertenecen a DRM30 mientras que el modo E pertenece exclusivamente a DRM+. En estos modos el tiempo de duración de la *super-trama* es de *1,200 ms* (modo A, B, C y D) y de *400 ms* (modo E), mientras que el tamaño por trama es de *400 ms* y *100 ms*, respectivamente.

Estructura del FAC

Gracias a que el FAC se encuentra en apenas una trama, el receptor puede obtener información de manera rápida de él. Contiene información del canal como el espectro ocupado o la profundidad del entrelazado. También presenta información acerca de los servicios.

Una de las características del sistema es que se logra la rápida sincronización para poder determinar los parámetros de demodulación en el SDC, esto se obtiene ya que el FAC no está entrelazado en tiempo y es asignado a un grupo específico de portadoras.

Estructura del SDC

La información que se encuentra en el SDC permite la correcta lectura y decodificación del MSC, contiene datos acerca de dónde y cómo obtener la misma información de distintas fuentes, ya que esta información se presenta de maneja periódica. La periodicidad del canal corresponde a la longitud de la súper trama, como se muestra en la imagen.

La transmisión del SDC se realiza sobre todas las portadoras en un periodo de dos símbolos, al principio de cada super-trama, los datos son por lo general estáticos y repetitivos, lo que permite una completa sincronización del receptor, usando este intervalo de tiempo.

1.3.1.4. Parámetros de Modulación y Codificación

Modos de robustez

Al hablar de robustez, se hace referencia a que tan bien la señal soporta problemas como el ruido, multitrayectos, desvanecimientos, etc. Los modos de transmisión no son la única manera de determinar esta robustez, ya que parámetros como el ancho de banda, la compresión de audio o el nivel de entrelazado también influyen.

Para poder optimizar el funcionamiento del sistema, los parámetros de la señal OFDM, deben ajustarse a los del canal de RF. El sistema DRM ha sido diseñado para poder operar en medios ionizados y no-ionizados, sobre un amplio rango de frecuencias que llega hasta los 300 MHz.

Cuando se transmite en las bandas de AM, se pueden presentar varios efectos de propagación de la señal; desde la onda terrestre (*ground wave*) donde se presenta mucho ruido eléctrico hasta la onda celeste (*sky-wave*) donde la complejidad del canal aumenta considerablemente. Cada variante en la propagación presenta diferentes *retrasos* y *desplazamientos Doppler*. Es posible que en algunos lugares la recepción de la señal venga por estos dos métodos de propagación de las ondas.

Mode	MSC QAM options	Bandwidth options (kHz)	Typical uses	
A	16, 64	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	LF & MF ground-wave, 26MHz band line-of-sight	DRM30 modes
B	16, 64	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	HF & MF transmission on sky-wave	
C	16, 64	10, 20	Difficult sky-wave channels on HF	
D	16, 64	10, 20	NVIS sky-wave (highest Doppler & delay spread)	
E	4, 16	100	VHF transmissions in the bands above 30 MHz	DRM+

Figura 1.13: Modos de transmisión de DRM

La figura 1.13 condensa las diferentes configuraciones que se pueden obtener con los diferentes tipos de modos en la transmisión.

- Modo A: Se obtiene la mayor tasa de datos posible siempre y cuando la transmisión sea por onda terrestre o con línea de vista
- Modo B: Primera opción al tratarse de ondas celestes
- Modo C y D: Cuando la propagación sea por onda celeste y la señal tenga que viajar una larga distancia o tenga muchos saltos, incluso cuando la incidencia de la señal sea casi vertical.
- Modo E: Para transmisiones arriba de los 30 MHz en VHF y hasta la Banda III

Se puede decir que el modo A es empleado para su similar analógico de AM convencional durante el día, el modo B durante la noche y junto con los modos C y D para las transmisiones de Onda Corta, las cuales pueden llegar a ser internacionales. Finalmente el modo E es empleado para las transmisiones de FM.

Parámetros de Modulación

Otro aspecto a considerar en la transmisión de la señal de DRM, es la modulación empleada en el canal de servicio principal MSC y las tasas de codificación (Viterbi).

Para los modos de DRM30 se emplea 16QAM o 64QAM. La elección de uno u otro dependerá bastante de la *relación señal a ruido (SNR)* requerida para recibir correctamente. Se escoge una modulación más robusta como la 16QAM cuando el SNR tienda a ser baja. Para el modo E de DRM+ se puede emplear tanto 4QAM como 16QAM, al igual dependiendo de la mínima SNR requerida para el área donde se desee hacer llegar la señal.

1.3.1.5. Payload (Carga útil) del sistema

Al realizarse varias combinaciones tanto de los modos de transmisión con los anchos de banda empleados se pueden obtener los parámetros de carga útil del sistema, es decir, la cantidad de

información que puede transportar, este parámetro irá expresado en bits por segundo *bps*.

- Modo A: Empleando 16 QAM se obtienen velocidades de transmisión desde los 6.3 kbps hasta los 38.2 kbps; empleando 64QAM desde los 9.4 hasta los 72 kbps.
- Modo B: Empleando 16QAM desde 4.8 hasta 29.8 kbps; empleando 64QAM desde 7.2 hasta 56.1 kbps.
- Modo C: Empleando 16QAM desde 9.2 hasta 24.1 kbps; empleando 64QAM desde 13.8 hasta 45.5 kbps.
- Modo D: Empleando 16QAM desde 6.1 hasta 16.2 kbps; empleando 64QAM desde 9.1 hasta 30.6 kbps.
- Modo E: Empleando 4QAM desde 37.2 hasta 74.5 kbps; empleando 16QAM desde 99.4 hasta 186.3 kbps.

2 Descripción de las pruebas

En este capítulo se describirá a detalle la metodología de la realización de las pruebas, las herramientas empleadas y los organismos involucrados. Se definirá además, el esquema de radio comunitaria que es el objetivo del ensayo de pruebas.

2.1. Esquema de radio comunitaria

Hasta ahora se ha hablado de lo que es la radio, pero enfocado al tipo de radio más común del planeta, la radio comercial; se define principalmente como aquella que suele pertenecer a una gran cadena de medios, la que requiere y por lo general vende espacios publicitarios para generar ganancias como principal fin, y por último su cobertura la cual suele abarcar hasta ciudades completas, con la cual puede llegar a miles e incluso millones de personas.

La radio comunitaria por otro lado tiene objetivos muy diferentes. Suelen identificarse por estos parámetros:

- **Audiencia:** Como su nombre lo indica, esta enfocada a un sector reducido de la población, a comunidades o pequeños grupos de personas con un interés común. Puede ser para un sector religioso, una comunidad aislada, sindicatos, universidades, colonias dentro de una ciudad, etc. Es decir, no tiende a ser masiva, por lo cuál un fin comercial no es el principal, pero puede ayudarse de éste para seguir funcionando.
- **Cobertura:** A diferencia de la radio comercial, la comunitaria no se enfoca en llegar a cuantas más personas pueda, sino a un grupo específico, es por esta razón que la cobertura suele ser pequeña, no más allá de los 5 km, querer alcanzar mayores distancias implica costos de operación mayores y regulaciones distintas.
- **Contenido:** Dado que su fin principal no es el lucro con espacios publicitarios, el contenido esta dirigido al grupo de interés, suele ser de tipo social o informativo, también puede llegar a ser lúdico, pero siempre enfocado a las necesidades de la comunidad a la que se contempla enviar el mensaje o del grupo que tiene control sobre la radiodifusora.

El gobierno brasileño, en conjunto con la *Agencia Nacional de las Telecomunicaciones (ANATEL)*, especifica que una radio comunitaria deberá ser de baja potencia, no mayor a 25 Watts de PRA (Potencia Radiada Aparente), tener una cobertura no mayor a 1 km, no contar con espacios publicitarios y sin posibilidad de financiamientos.[5, 4]

Los procedimientos burocráticos para autorizar una estación comunitaria son largos y complicados, pueden llegar a tomar hasta 10 años, es por eso que en 2011 se aprobó una mejora a la ley de 1998.

La radio comunitaria según la *Asociación Mundial de Radios Comunitarias (AMARC)* es:

“Radio comunitaria, radio rural, radio cooperativa, radio participativa, radio libre, alternativa, popular, educativa. . . Si las estaciones de radio, las redes y los grupos de producción que constituyen la Asociación Mundial de Radios Comunitarias se refieren a ellos mismos por medio de una variedad de nombres, sus prácticas y perfiles son aún más variados. Algunas son musicales, otras militantes y otras musicales y militantes. Se localizan tanto en áreas rurales aisladas como en el corazón de las ciudades más grandes del mundo. Sus señales pueden ser alcanzadas ya sea en un radio de un kilómetro, en la totalidad del territorio de un país o en otros lugares del mundo vía onda corta.

Algunas estaciones pertenecen a organizaciones sin ánimo de lucro o a cooperativas cuyos miembros constituyen su propia audiencia. Otras pertenecen a estudiantes, universidades, municipalidades, iglesias o sindicatos. Hay estaciones de radio financiadas por donaciones provenientes de su audiencia, por organismos de desarrollo internacional, por medio de la publicidad y por parte de los gobiernos.”[3]

2.2. Justificación de las pruebas

El 22 de mayo de 2009, el Ministerio de Comunicaciones de Brasil publicó en su Diario Oficial[1], un escrito en donde se especifica que es posible realizar pruebas de radio digital con el fin de establecer cuál será el esquema que se adoptará. En junio de 2011, se publicó un nuevo documento ampliando las fechas para poder realizar las pruebas[2].

Es por eso que se organizó un ensayo de pruebas con varios representantes interesados de los distintos esquemas de radiodifusión sonora digital disponibles. En este trabajo se aborda uno de estos ensayos, el realizado en Duque de Caxias, Brasil, organizado por INMETRO (*Instituto Nacional de Metrología, Qualidade e Tecnologia*), el Ministerio de Comunicaciones y apoyado en parte por la Universidad Nacional Autónoma de México a través de la Facultad de Ingeniería por el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Los resultados de éste, y los demás ensayos de pruebas llevados a cabo en el periodo antes mencionado, ayudarán al Ministerio a la elección del mejor esquema de radio digital para sus necesidades específicas.

El objetivo de las pruebas es el de determinar bajo condiciones específicas, en este caso la potencia del transmisor, así como el tipo de modulación empleada, la cobertura o alcance de la estación, en base al voltaje inducido en el equipo receptor por la señal y también en base a la calidad de la señal recibida.

Al obtener los resultados, un comité evaluará y comparará éstos con otros resultados de distintos ensayos de pruebas, y determinará para finales de 2012 qué esquema será el adoptado en Brasil. Para así comenzar con el camino hacia la digitalización de la radio, desde el punto de vista legal como ingenieril.

2.3. Descripción de las pruebas

Las pruebas se realizaron con personal de INMETRO, empleando sus instalaciones ubicadas en el Parque Ecológico Xerém, en Duque de Caxias, Brasil.



Figura 2.1: Duque de Caxias, Brasil

La duración de las pruebas fue de dos semanas, divididas en dos etapas, cada una de una semana. La primera se realizó del 8 al 15 de octubre de 2010, la segunda del 11 al 17 de diciembre de 2010.

La ubicación del lugar, que se encuentra en lo alto de un cerro, facilita la realización de las pruebas, ya que la señal puede viajar “sin obstrucciones” a los lugares en los que interesa sea recibida.

Dichas instalaciones se emplearon como si fuera una radiodifusora comunitaria, en formato digital para ser recibido por un radio digital. Éste se encontraba en un laboratorio móvil, donde se recibía la señal y era procesada y almacenada para después realizar los estudios correspondientes. Se trabajó en la Banda II de VHF (Banda de FM) en la frecuencia de 93.7 MHz durante el día. Se escogió esta frecuencia debido a que no interfería con otras señales analógicas presentes en el área. El transmisor utilizó dos niveles de potencia, 1.36 W y 4.36 W, además de poder variar la modulación de la señal DRM+ empleando un modo robusto, 4QAM y uno con mayor capacidad de datos pero menor protección, 16QAM.

Es decir, se trabajó con 4 diferentes casos de potencia y modulación empleada, lo cuál arroja suficientes datos para poder obtener mejores resultados. También se trabajó bajo dos esquemas de recepción, la móvil y la estática. Para lograr esto, se trazaron 4 distintas rutas alrededor de las instalaciones de INMETRO, que debían ser recorridas por el laboratorio móvil, mientras éste recibía la señal digital, logrando así obtener resultados de la señal tanto en puntos fijos (el laboratorio móvil se detenía en algún punto especificado en la ruta) y en movimiento (la señal se recibía mientras el laboratorio se desplazaba de un punto de la ruta al siguiente).

Con esta configuración, se plantea obtener tres parámetros importantes de la señal, el *porcentaje de tramas de audio decodificadas o AQ*, el *voltaje inducido* y la *relación señal a ruido (SNR)*, con estos es posible estimar una cobertura de la emisión.

2.3.1. Equipo empleado

Para el desarrollo de las pruebas se utilizó el siguiente equipo:

- Antena de transmisión: Tipo monopolo, polarización vertical con una ganancia de 2 dB, colocada a una altura de 24 metros sobre el terreno.
- Modulador: *DRM+ Modulator* fabricado por *RF Mondial*
- Transmisor: Fabricado por *Nautel Limited* con una potencia nominal de 80 W
- Línea de transmisión: Modelo *RG 213* fabricada por *DataLink*, de 50 metros de largo, con una atenuación de 3 dB incluidos los conectores
- Laboratorio móvil: Éste fue proporcionado por INMETRO y consiste de una camioneta equipada con un Analizador de Espectro (Anritsu modelo MS2711D), un *front-end* receptor de DRM+ , una Laptop con el software de demodulación DRM+ y una Antena monopolo K51164 fabricada por *Kathrein*.



Figura 2.2: Laboratorio móvil INMETRO

2.3.2. Obtención de los datos en el laboratorio móvil

Para poder estimar la cobertura de la estación es necesario contar con algún parámetro mensurable de la señal digital, el parámetro elegido para este fin fue el voltaje inducido en la línea del receptor, así como la *Calidad de Audio o AQ* que es la relación entre las tramas recibidas correctamente y las enviadas

Para lograr tener una medida clara se necesitó elaborar un arreglo con el equipo empleado, en donde la señal es captada por la antena para después poder verla directamente con el analizador de espectro a la vez que era propiamente decodificada por el receptor DRM+. A la vez este flujo de información quedaba registrado en un *testigo*, se almacenaron datos de la velocidad y posición del laboratorio móvil mediante un sistema GPS.

El siguiente diagrama especifica el arreglo elaborado para realizar las mediciones y almacenar los datos.

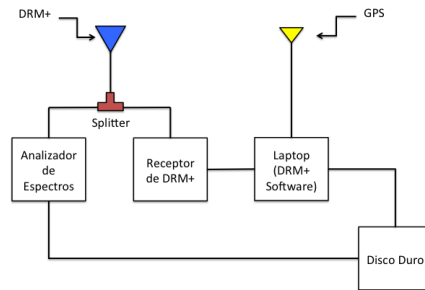


Figura 2.3: Diagrama de conexiones del laboratorio móvil

2.3.3. Metodología de las pruebas

2.3.3.1. Rutas

Se trazaron 4 rutas distintas para ser recorridas y sobre ellas hacer las mediciones, se escogieron así dado que eran los caminos más cercanos al edificio y se alejan lo suficiente del transmisor para poder evaluar los resultados. Debido a problemas con la recepción de las señales, algunos puntos de las rutas no fueron tomados en cuenta para el estudio.

Cada ruta consta de 20 puntos en los que se realizaron mediciones estáticas, las mediciones móviles se realizaron mientras el laboratorio avanzaba entre un punto de la ruta y el siguiente especificado.

Cada punto se aleja 250 metros de manera radial del transmisor, hasta cubrir una distancia de 5 km.

Las rutas propuestas fueron las siguientes:

R1 Radial Noreste - Petrópolis

R2 Radial Suroeste - Duque de Caxias

R3 Radial Suroeste - Xerém

R4 Radial Noreste - Petrópolis

La nomenclatura empleada para identificar a cada punto fue la siguiente: RxPxx

Donde x representa un valor numérico. En el caso del que acompaña a la letra R puede tomar valores del 1 al 4, estos valores representan la ruta a la que se refiere este punto; para los valores que acompañan a la letra P estos pueden tomar un valor del 01 al 20, estos hacen referencia al punto dentro de la ruta, entre más pequeño sea el valor el punto se encontrará más cercano al origen, es decir, al transmisor.

Siendo así, que al expresar R3P04, se hace referencia al punto 4 de la ruta 3. Dicha nomenclatura se usará tanto para las mediciones en recepción estática, como para las mediciones en recepción móvil.



Figura 2.4: Rutas radiales para el laboratorio móvil

Se hizo recorrer al laboratorio móvil por estas rutas, para así poder recibir y evaluar la señal, las rutas no son radiales exactos, debido a la orografía del terreno.

2.3.3.2. Parámetros analizados

Se ha mencionado que uno de los parámetros necesarios para la evaluación de la señal, es el llamado AQ o la calidad del audio, la cual queda definida por la siguiente expresión:

$$AQ(\%) = \frac{\text{Número de tramas de audio correctamente recibidas}}{\text{Número de tramas transmitidas}} \times 100$$

Para que el audio pueda ser escuchado, es decir que las tramas de audio fueron correctamente recibidas y decodificadas, es necesario el AQ sea mayor o igual al 98 %, esto significa que si en el transcurso de 100 tramas de audio 3 se reciben de manera incorrecta, el oyente notará la ausencia de audio durante un tiempo que le será molesto. Esta es una de las razones por las cuales se busca tener la mayor robustez y protección posible, para no perder información.

Una vez se tiene la señal recibida por la antena en laboratorio móvil, esta es analizada. El primer parámetro que podemos analizar, es el de la AQ, ya que se obtiene directamente del receptor DRM y no es necesario un equipo extra para obtenerlo.

Los siguientes parámetros son la relación señal a ruido (SNR), la cuál también es obtenida del propio receptor DRM y el software que este lleva consigo.

Para el parámetro final es donde ha sido necesario el arreglo mostrado anteriormente, debido a que lo que se analiza es el Campo Eléctrico. Este no es arrojado directamente por el analizador de espectros, así que es necesario calcularlo.

Una vez se tiene la señal en el analizador de espectro, esta es evaluada en un ancho de banda de 100 kHz (Ancho de banda que emplea DRM+ para su transmisión) donde es fácil obtener el voltaje inducido en ese instante de tiempo en ese punto específico de la ruta.

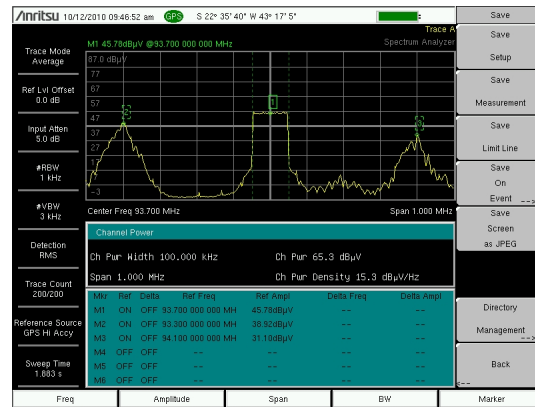


Figura 2.5: Señal en analizador de espectro, correspondiente al punto R2P01

En la imagen anterior es posible apreciar la señal de DRM+ centrada en la frecuencia 93.7 MHz, así como las señales analógicas aledañas. Con base en esta imagen se puede estimar el campo eléctrico recibido a partir del voltaje detectado.

La razón por la cual se emplea el valor del campo eléctrico y no el voltaje inducido es simple. El voltaje inducido en la línea es un parámetro que depende, entre otras cosas, del arreglo mismo de los equipos, las antenas utilizadas, etc; mientras que el campo eléctrico no, es un parámetro independiente del receptor. Si se deseara repetir estas pruebas en otro lugar, deberían contarse con exactamente los mismos equipos si se trabajara con el voltaje inducido, pero debido a que se emplea el campo eléctrico es posible repetirlos con algún equipo similar y obtener resultados que sean válidos.

Para poder estimar el campo eléctrico, se utilizó la siguiente relación matemática:

$$E[\mu V/m]_{dB} = P[\mu V]_{dB} + K[1/m]_{dB} \quad (2.1)$$

En donde E se refiere al campo eléctrico, P al voltaje inducido en la línea recibido por el equipo y K al factor de antena obtenido del arreglo de los equipos empleados.

Para estimar el valor del factor de antena, se usó una aproximación empleada para impedancias de 50 ohms[10], cuya expresión matemática es la siguiente:

$$K[1/m] = \frac{f[MHz]}{39.47 * \sqrt{G_d}} \quad (2.2)$$

En donde f es el valor de la frecuencia donde se desea evaluar el factor de antena y G_d es el valor de la ganancia respecto al dipolo de la antena la receptora.

2.3.3.3. Comprobación de la aproximación del factor de antena.

A continuación se comprobará que la aproximación expresada en la ecuación (2.2) es correcta. Se sabe que una señal (campo eléctrico) induce un voltaje en una antena y en la línea conectada a esta, misma que genera un potencia en el equipo al que está conectado.

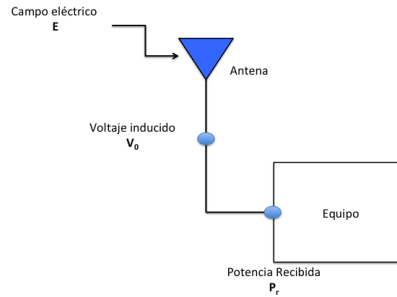


Figura 2.6: Voltaje inducido en la línea

Para obtener el valor del factor de antena, en función del campo eléctrico y el voltaje inducido en la línea, se emplea la siguiente ecuación.

$$K[1/m] = \frac{E[\mu V/m]}{V_o[\mu V]} \quad (2.3)$$

De la teoría de antenas se sabe que la potencia recibida en un equipo es igual a la densidad de campo eléctrico [Watts/m²] multiplicada por el área efectiva [m²] de la antena que recibe la señal, esto se expresa mejor de la siguiente forma.

$$P_r = W_i A_{ef} \quad (2.4)$$

La densidad de campo eléctrico se puede obtener a partir de la siguiente expresión matemática.

$$W_i = \frac{|E^2|}{\eta_0} \quad (2.5)$$

Donde $|E^2|$ representa el valor del campo eléctrico al cuadrado, mientras que η_0 representa el valor de impedancia del medio, en este caso del aire.

También de teoría de antenas se sabe que la manera de obtener el área efectiva de una antena se expresa de la siguiente manera.

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (2.6)$$

Donde λ representa el valor de la longitud de la onda recibida, mientras que G es la ganancia numérica de la antena receptora.

Se despeja el valor de la densidad del campo eléctrico de la ecuación (2.4) y se sustituyen en esta, los valores del área efectiva de la ecuación (2.6) se obtiene la siguiente ecuación intermedia, que expresa el valor de la densidad de campo eléctrico en función de la potencia recibida, longitud de onda y ganancia de la antena receptora.

$$W_i = \frac{4\pi P_r}{\lambda^2 G} \quad (2.7)$$

Por extensión de la Ley de Ohm se puede obtener el voltaje en la línea a partir de la los parámetros de impedancia y potencia recibida. La siguiente expresión

$$V_0 = \sqrt{P_r Z_{in}} \quad (2.8)$$

Donde V_0 es el voltaje en la línea, P_r es la potencia recibida en el equipo y Z_{in} se refiere a la impedancia de entrada del equipo.

Se toma el valor del voltaje inducido de la ecuación (2.8) y el valor de la magnitud del campo eléctrico de la ecuación (2.5) y se sustituyen ambos en la ecuación (2.3), se realiza el álgebra necesaria y se obtiene la siguiente expresión.

$$K = \frac{1}{30.82} \frac{f[MHz]}{\sqrt{G}} \quad (2.9)$$

Como se aprecia, la ecuación anterior no es la que intentamos comprobar, esto es debido a que esta expresión emplea la ganancia referida a la antena isotrópica, es necesario hacer la conversión para que esté referida al dipolo.

Esta conversión viene dada por el siguiente factor: $[G_d]_{dB} = [G_i]_{dB} - 2.15[dB]$

Integrando este factor a la ecuación (2.9) y realizando las operaciones necesarias, se confirma que la expresión es correcta.

$$K = \frac{f[MHz]}{39.47 * \sqrt{G_d}}$$

2.3.3.4. Presentación de resultados

El parámetro más importante a analizar es el campo eléctrico, por lo que este estará en todas las representaciones. Los resultados serán presentados en forma de gráficas.

La manera de ordenar los datos en estas gráficas, será de dos formas distintas:

- Campo eléctrico vs SNR (Relación señal a ruido)
- Campo eléctrico vs Distancia al transmisor

Además de estas divisiones, se tiene que separar en relación a la modulación empleada y a la potencia del transmisor. No se separa de acuerdo a las rutas recorridas, debido a que se quiere obtener la cobertura en radiales, no en cada ruta, es por eso que se juntan todos los puntos en las gráficas.

Es decir, la evaluación del sistema depende de que tan bien se soporte el ruido en la señal (SNR) y que tanto se atenúe la señal al viajar por el aire, todo esto dependiendo de que la calidad del audio sea de un 98 % o más, con estos dos parámetros y referenciándolos a un valor de campo eléctrico, se pueden establecer los umbrales necesarios para una correcta recepción.

3 Resultados de recepción estática

En este capítulo se hablará de los resultados obtenidos de las mediciones con recepción estática, empezando por la obtención de las muestras en las mediciones, se buscarán posibles causas de error, y se obtendrá la estimación de la cobertura y los umbrales de recepción óptimos de la señal de DRM+.

3.1. Obtención de las muestras

Ya se ha hablado de cómo se obtienen los valores de campo eléctrico a partir de los valores de potencia o voltaje inducido del canal de DRM+, solamente como método. A continuación se explicará a detalle el procedimiento empleado para obtener los valores de interés.

Lo primero que tuvo que realizarse fue la clasificación y separación de los datos. Debido a que el testigo grabó gran cantidad de información, no toda fue necesaria para el estudio. Existen medidas tanto de puntos fijos como en movimiento, es por eso que esta fue la primer depuración de muestras, se tomaron solo los valores de los puntos fijos, descartando los demás. Para lograr esto fue necesario capturar los valores de cada punto y vaciarlos en una hoja de cálculo.

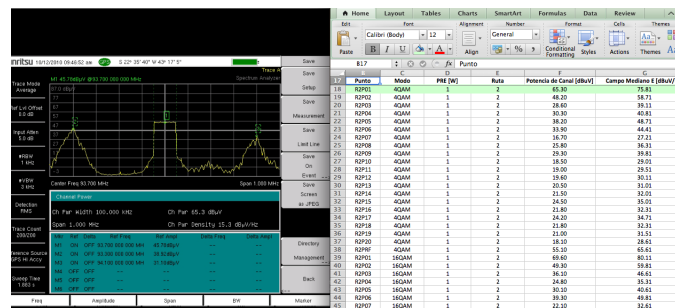


Figura 3.1: Captura de voltajes

Una vez que todos los valores de voltaje de los puntos fijos, de todas las rutas fueron capturados, se realizó la conversión a valores de campo eléctrico, para esto, como se explicó anteriormente son necesarios los parámetros del sistema para obtener el valor del factor de antena K . Dichos parámetros son los siguientes:

- Ganancia de la antena receptora: 0 dB;
- Frecuencia de transmisión: 93.7 MHz

- Impedancia característica del sistema: 50 Ω
- Pérdida del splitter: 3 dB

Tomando estos datos y sustituyéndolos en la ecuación (2.2) se obtiene lo siguiente:

$$K[1/m] = \frac{93.7}{39.47 * \sqrt{1}}$$

$$K[1/m] = 2.3739539$$

Éste es el valor del factor de antena obtenido, dato necesario para poder realizar el cálculo del campo eléctrico. El factor de antena es un factor que expresa la relación entre la intensidad del campo eléctrico y el voltaje en la entrada del receptor.

La ganancia sustituida en la ecuación, corresponde a la ganancia expresada de manera lineal, es por eso que se emplea el valor de 1.

Para los cálculos, se acota el valor del factor de antena a solo dos decimales, ya que así se puede obtener la precisión necesaria para el estudio.

3.2. Obtención de valores de campo eléctrico

Una vez que se ha obtenido el valor del factor de antena para el arreglo empleado en el laboratorio móvil, este será invariable para todas las pruebas de los resultados estáticos, ya que se usó el mismo sistema de recepción y la misma frecuencia de transmisión. El siguiente paso a realizar es la obtención de los valores del campo eléctrico. Para eso es necesario emplear la ecuación (2.1).

En dicha ecuación los valores se expresan en forma de decibeles o mejor dicho, en su forma logarítmica. Este cambio se debe a que manejar y realizar los cálculos empleando los valores en forma lineal, resulta mucho más complicado y a veces impráctico, que emplear la forma logarítmica.

Tomando como ejemplo el punto *R2P01* (imagen 3.1) en el modo 4QAM:

- Voltaje inducido: 65.30 dB _{μ V}
- Factor de antena: 2.3739539 1/m
- Factor de antena (logarítmico): 7.50944929 dB_{1/m}
- Pérdida del splitter: 3 dB

Tomando estos valores como ejemplo y acotando los resultados hasta dos decimales, al sustituir en la ecuación (2.1) se obtiene lo siguiente:

$$E[dB_{\mu V/m}] = 65.30[dB_{\mu V}] + 7.50[dB_{1/m}] + 3[dB]$$

$$E[dB_{\mu V/m}] = 75.80$$

Al haber convertido el voltaje inducido detectado por el receptor en el canal DRM+ a un valor de campo eléctrico, se obtiene un valor con el cual es posible trabajar independientemente del equipo empleado. Se realizó esta conversión para todos los puntos fijos de la ruta.

Se debe mencionar un aspecto de la conversión, el valor obtenido corresponde al campo eléctrico *mediano*, esto se debe a que los efectos de propagación, la atenuación, entre otros factores provocan variaciones en el canal de DRM+, por lo que la señal no se percibe plana como se esperaría, es por esta razón que se toma un valor estadístico significativo, en el dominio del tiempo que es donde se aprecia las variaciones, que en propagación suele ser el valor mediano. Este proceso se realizó para todos los puntos de las rutas.

3.2.1. Ordenación de valores de campo eléctrico

El siguiente paso fue ordenar los datos de acuerdo a la modulación empleada así como a la potencia del transmisor.

Ordenar los valores de campo eléctrico de acuerdo a estos dos atributos, no es cosa trivial, se hace ya que no es posible comparar todos los datos a la vez. Debido a que se emplean dos potencias de transmisión el alcance variará por esta razón, no propiamente a los efectos de propagación. Así mismo, al emplear dos modulaciones, una más robusta que la otra, los efectos en la propagación como el ruido, las zonas de sombra o el multitrayecto, afectan de manera distinta las transmisiones, lo que presentará diferencias en cuanto a la cobertura y umbrales, pero debido a las propias características de la señal transmitida, no del medio.

Los umbrales de recepción son los límites, en este caso técnicos, del equipo (Radio DRM+) con los cuáles puede operar de manera normal. Es decir, son los valores de la intensidad de campo eléctrico o la relación señal a ruido *SNR* necesarios debido a la sensibilidad y selectividad del receptor, para que la señal sea correctamente detectada e interpretada. Existen más parámetros implicados, pero para el estudio aquí mostrado, estos son suficientes.

En los siguientes apartados se presentarán las gráficas resultantes después de la ordenación de los datos, de dichas gráficas es posible interpretar los umbrales de recepción.

Se ha mencionado que se es necesaria una AQ de al menos 98 % [15] para que la señal sea decodificada de manera correcta, en las gráficas se ha clasificado dicho parámetro en tres posibilidades. Con rojo una $AQ < 90\%$, en amarillo $90\% \leq AQ < 98\%$ y en verde una $AQ > 98\%$. Esto con la finalidad de identificar posibles causas de errores. Esta separación de colores solo es para fines ilustrativos, ya que toda trama que llegue con una calidad de audio menor a 98 % no podrá ser decodificada correctamente.

3.3. Resultados

En los siguientes apartados, del 3.3.1 al 3.3.4 se mostrarán solo las gráficas (campo eléctrico en función de la SNR, y campo eléctrico en función de la distancia al transmisor), en el apartado 3.3.5 se explicarán con más detalle la interpretación de estos resultados.

Como se explicó anteriormente, los resultados se dividieron para su estudio de acuerdo a la modulación empleada y a la potencia del transmisor, de esta manera es como se han dividido también para ser mostrados.

3.3.1. Potencia baja y modulación 4 QAM

Potencia de transmisión empleada: 1.36 Watts.

Modulación empleada: 4 QAM

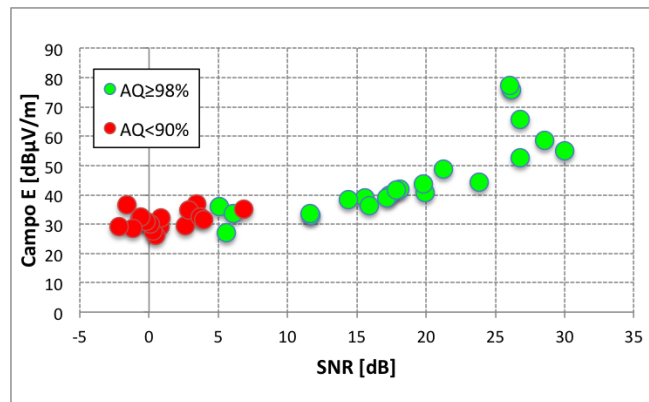


Figura 3.2: Campo eléctrico en función de la SNR

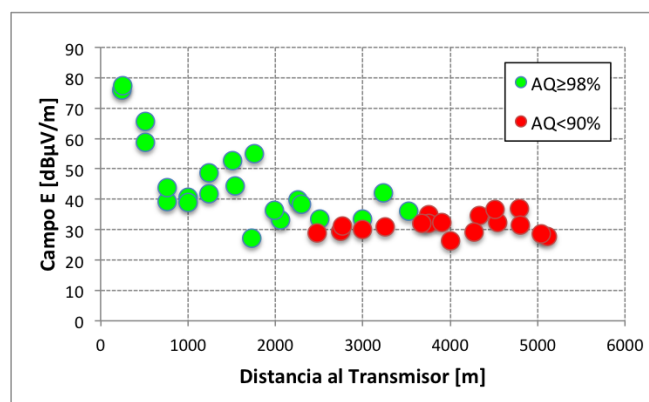


Figura 3.3: Campo eléctrico en función de la distancia al transmisor

Para estas mediciones no se contó con datos proporcionados de la Ruta 4, debido a que el aire acondicionado del laboratorio móvil generaba muchas interferencias, es por esto que se decidió no tomar en cuenta estas mediciones.

Para apreciar mejor el resultado de la calidad de audio, se expresa de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Puntos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	22	55 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	0	0 %
$AQ < 90 \%$	18	45 %
Total de puntos	40	100 %

3.3.2. Potencia baja y modulación 16 QAM

Potencia de transmisión empleada: 1.36 Watts

Modulación empleada: 16 QAM

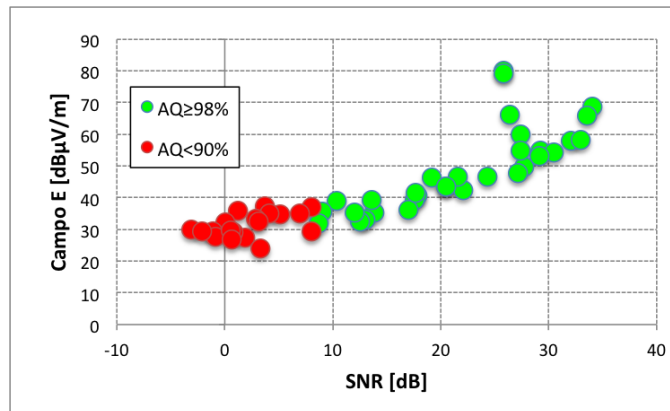


Figura 3.4: Campo en función de la SNR

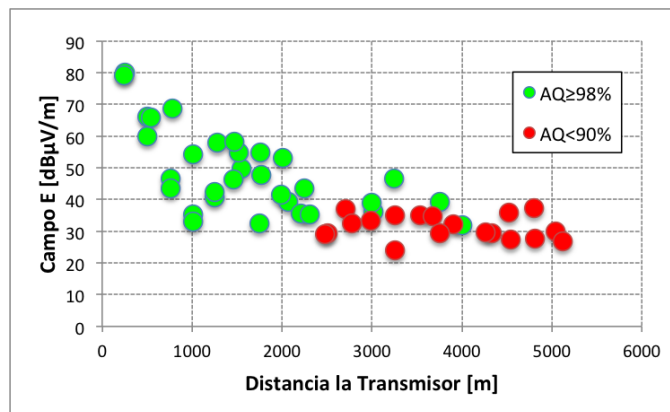


Figura 3.5: Campo en función de la distancia al transmisor

Estas mediciones, si presentan algunos puntos de la Ruta 4, debido al mismo problema que el apartado anterior.

Para apreciar mejor el resultado de la calidad de audio, se expresa de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Puntos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	32	62.7 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	0	0 %
$AQ < 90 \%$	19	37.3 %
Total de puntos	51	100 %

3.3.3. Potencia alta y modulación 4 QAM

Potencia de transmisión empleada: 4.36 Watts

Modulación empleada: 4 QAM

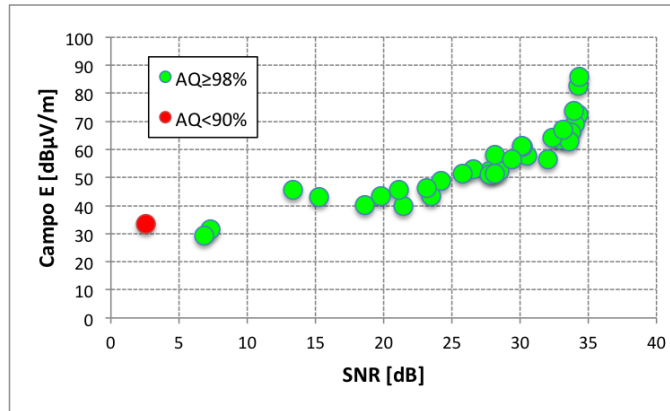


Figura 3.6: Campo en función de la SNR

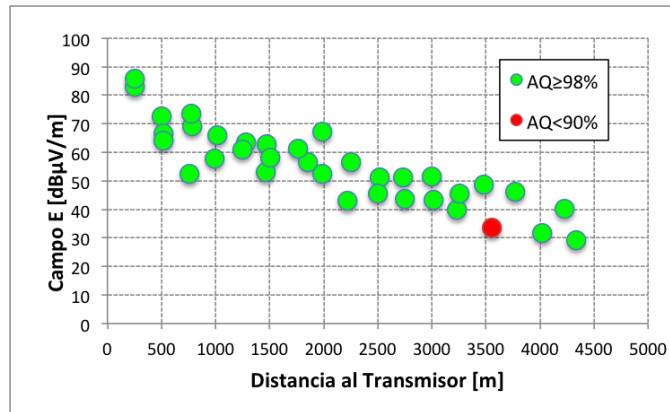


Figura 3.7: Campo en función de la distancia al transmisor

Para estas mediciones no se cuentan con datos de la Ruta 2.

Para apreciar mejor el resultado de la calidad de audio, se expresa de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Puntos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	34	97.2 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	0	0 %
$AQ < 90 \%$	1	2.8 %
Total de puntos	35	100 %

3.3.4. Potencia alta y modulación 16 QAM

Potencia de transmisión empleada 4.36 Watts

Modulación empleada: 16 QAM

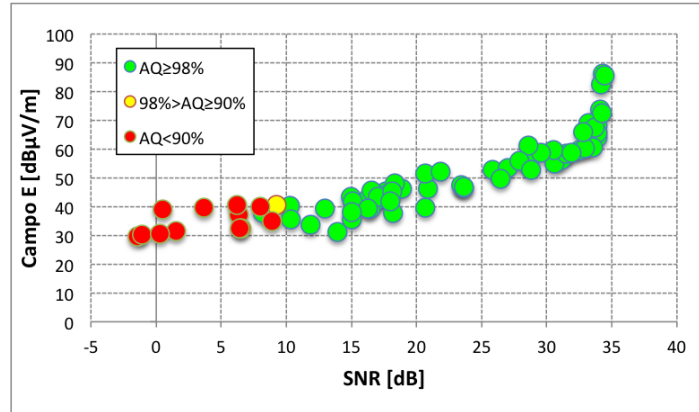


Figura 3.8: Campo en función de la SNR

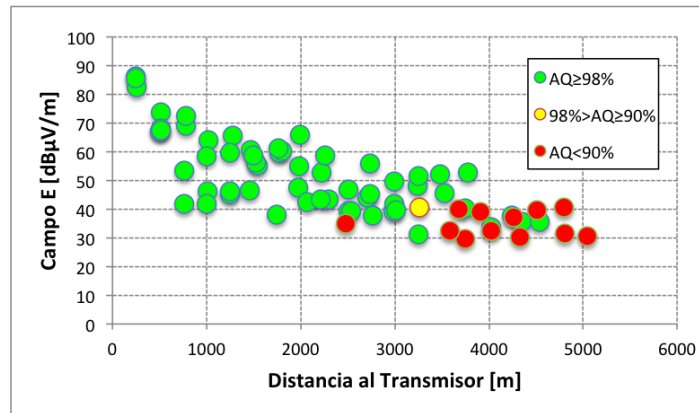


Figura 3.9: Campo en función de la distancia al transmisor

Esta es la medición que cuenta con más muestras.

Para apreciar mejor el resultado de la calidad de audio, se expresa de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Puntos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	58	81.7 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	1	1.4 %
$AQ < 90 \%$	12	16.9 %
Total de puntos	71	100 %

3.3.5. Resumen

En este apartado se muestra una conclusión a los resultados mostrados anteriormente en las gráficas.

- 1.36 Watts y 4 QAM: Para esta configuración se obtuvo que la señal logró ser recibida de manera correcta a una distancia de hasta 3.5 km, lo cuál es un buen resultado, tomando en cuenta la potencia empleada para la transmisión, la cuál es muy pequeña.
- 1.36 Watts y 16 QAM: Para esta configuración la cobertura resulta un poco menor que el caso anterior, debido a que es una modulación menos robusta y es más susceptible a interferencias, el alcance obtenido es de 3.3 km.
- 4.36 Watts y 4 QAM: Se ha logrado tener una cobertura de 4.5 km, la cual, una vez más al ser comparada contra las modulaciones analógicas resulta mucho mejor que estas. Se presenta un solo punto con mala recepción, en los siguientes apartados se analiza las posibles causas de error.
- 4.36 Watts y 16 QAM: Para esta configuración, al emplear una modulación menos protegida que el caso anterior, se observan más errores en la recepción, siendo esta la única que presenta puntos con una calidad de audio entre el 90 % y 98 %. La cobertura lograda fue de 3.5 km, a partir de esa distancia la recepción presenta bastantes problemas.

Todos estos resultados mostrados son bastante buenos en cuanto a la cobertura, ya que empleando potencias muy bajas se logra tener recepción a distancias considerables. Esta es una de las principales características a contrastar con la radio analógica, ya que requiere de mucho mayor potencia para obtener las mismas coberturas. La mínima intensidad de campo utilizable empleando FM estereofónico para un ambiente rural o suburbano, es de $54 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ [14], en la normativa mexicana se establece que el contorno protegido de una estación en estas condiciones esta entre $54 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ y $60 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ [13]. Esto es casi 20 dB por encima que los resultados obtenidos. Esto significa que la potencia necesaria para lograr la misma cobertura, empleando FM, eso mucho mayor que la aquí reportada empleando el sistema DRM+.

3.4. Cobertura y umbrales de recepción

Una vez se tienen los resultados de las mediciones presentados de manera gráfica, es posible la determinación de los umbrales de recepción a partir de las gráficas de campo eléctrico y de las de la relación señal a ruido. Dichos umbrales son una estimación en base a los datos que se tienen y se obtuvieron al comparar las gráficas, viendo hasta que niveles de campo eléctrico y relación señal a ruido, la emisión era bien recibida.

Se espera que no existan diferencias significativas en cuanto a los umbrales, empleando la potencia baja o alta, debido a que un cambio en la intensidad de la señal enviada solo afecta que tan lejos se recibe la señal, no la intensidad del campo necesaria para la recepción. No así para las diferentes modulaciones, ya que en una modulación menos robusta los efectos como el ruido o el multitrayecto la afectan más fácilmente, es por esto que el umbral de recepción

deberá ser menor con una modulación mas robusta, en cuanto a nivel de campo eléctrico y también en cuanto a la SNR.

Cuadro 3.1: Umbrales de recepción estática

		Modulación			
		4 QAM		16 QAM	
Potencia	1.36 Watts	Cobertura:	3.5 km	Cobertura:	3.3 km
		Umbral:	SNR: 5 dB CE: 30 dB _{μV/m}	Umbral:	SNR: 9 dB CE: 34 dB _{μV/m}
	4.36 Watts	Cobertura:	4.5 km	Cobertura:	3.5 km
		Umbral:	SNR: 5 dB CE: 32 dB _{μV/m}	Umbral:	SNR: 9 dB CE: 35 dB _{μV/m}

Con base en la tabla anterior se llega a las siguientes conclusiones:

- SNR: La primera y más notoria es el umbral de la relación señal a ruido necesaria para una correcta recepción. Como se ve en el cuadro, entre más información lleve la señal, es decir, sea más compleja la modulación para poder tener una tasa de bits mayor, es necesario que la señal llegue más “limpia” para no generar errores. Cuando se empleó la modulación 4 QAM la correcta recepción se logró a partir de 5 dB de SNR, mientras que para la modulación 16 QAM fue necesario al menos 9 dB de SNR. Con esto se comprobó lo anterior, que las diferencias en cuanto al valor mínimo requerido, no varía significativamente en relación a la potencia empleada, sino a la modulación.
- Campo eléctrico: Para este parámetro, se observó que la mínima intensidad requerida para la correcta recepción de la señal es de 30 dB_{μV/m} cuando se trata de la modulación 4 QAM. Mientras que al emplearse la modulación menos robusta, 16 QAM, la mínima intensidad de campo requerida es de 35 dB_{μV/m}.
- Cobertura: La cobertura de emisión varia dependiendo de la modulación y de la potencia empleada. Para el mejor de los casos (Potencia de 4.36 W y modulación 4 QAM) se logró un alcance de 4.5 km; mientras que para el peor de los casos mostrados en este estudio (Potencia de 1.36 Watts y modulación de 16 QAM) se obtuvo un alcance de 3.3 km. Hay que resaltar que aunque se utilice la misma potencia en la transmisión, al cambiar de modulación los alcances también varían debido a que el campo eléctrico necesario para la correcta decodificación se ve alterado. Las siguientes imágenes se refieren a la cobertura lograda tanto en el mejor como en el peor de los casos de la transmisión, respectivamente.

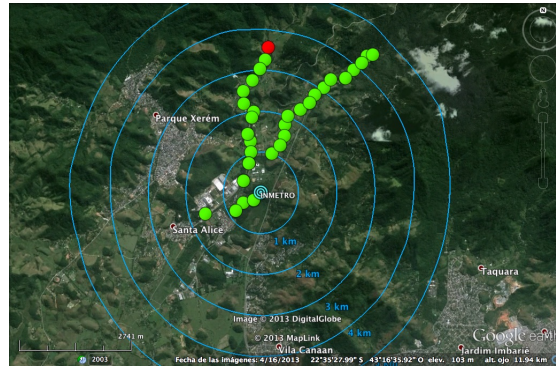


Figura 3.10: Cobertura 4.36 Watts y 4 QAM

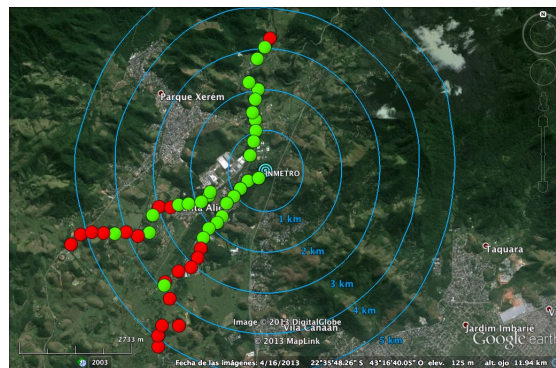


Figura 3.11: Cobertura 1.36 Watts y 16 QAM

Hay que resaltar que no se emplean todas las rutas en todos los casos, debido a que como se ha mencionado, algunas presentaron efectos no previstos en el estudio. La determinación de la cobertura se basa en el uso de dichas rutas, es posible que de haberse empleado las demás rutas en donde no se tomaron en cuenta, la cobertura haya variado, pero no de manera significativa, ya que es posible que alguna presente más vegetación, sea más elevado respecto a las demás o tenga mas asentamientos urbanos.

3.5. Causas de errores en la recepción

Resulta curioso que algunas mediciones estando más cerca del transmisión no puedan ser correctamente recibidas, o que algunas ya bastante lejos del mismo se reciban mejor que algunas muy próximas a la antena de transmisión. Estos efectos pueden tener diversas causas, como que la línea de vista directa entre el transmisor y el receptor se obstruya debido a la orografía del terreno, la presencia de líneas de alta tensión cerca del lugar donde se realizó la medición, el paso de algún vehículo causante de ruido eléctrico, etc.

A continuación se intentará definir las posibles causas de dichos errores en la recepción, dividiéndolas por modulación y potencia empleada.

Algunos de los posibles problemas de recepción son los siguientes:

- Bajo nivel de campo eléctrico: Debido a zonas de sombra por la ocultación de la línea de vista, debido a cerros o edificios altos.
- Ruido alto: Debido a zonas urbanas o a la presencia de líneas de alta tensión.
- Multitrayecto: Efecto presentado principalmente en zonas urbanas, debido a edificios y construcciones reflejantes.

Se analizará por rutas, las diversas causas de los errores en la recepción.

3.5.1. Modulación 4 QAM

3.5.1.1. Potencia baja: 1.36 Watts

- Ruta 2: En esta ruta, no se tiene recepción a partir del punto R2P10 hasta el final de ésta, es decir, el punto R2P20, debido a que se presenta una zona de sombra debido a unos cerros, que impiden que la presencia de una línea de vista con la antena transmisora y el laboratorio móvil.
- Ruta 3: Esta ruta en comparación con la anterior tiene más puntos de buena recepción, el punto R3P11 no recibe bien la señal, ya que se encuentra en una zona urbana. Los puntos del R3P15 al R3P20, al igual que en la ruta 2, presenta una zona de sombra debido a la elevación de un cerro, lo cual impide tener línea de vista directa con el transmisor.

3.5.1.2. Potencia alta: 4.36 Watts

- Ruta 4: En todos los puntos de la ruta se presenta una buena recepción, a excepción del último, R4P14, ya que se encuentran en un valle lo cuál impide una línea de vista directa con el transmisor, además de estar rodeado por una fuerte vegetación a los lados.

3.5.2. Modulación 16 QAM

3.5.2.1. Potencia baja: 1.36 Watts

- Ruta 2: Los casos de mala o nula recepción en esta ruta, se dan a partir del punto R2P10 hasta el punto R2P14, y de nuevo del punto R2P16 hasta el final de la ruta. Esto debido a que se elevan cerros bloqueando la línea de vista entre el transmisor y los puntos mencionados.
- Ruta 3: Los puntos R3P01 al R3P09, R3P12, R3P13 y R3P16 son los que presentan buena recepción. Los puntos R3P10 y R3P11 se esconden detrás de una elevación del terreno creando una zona de sombra. Los puntos R3P14 y R3P15 presentan vegetación

abundante a los lados de la ruta, además de tener cerca líneas de distribución de la red eléctrica. Los puntos del R3P17 al R3P20 no presentan recepción, debido a la atenuación de la señal y a que se presentan elevaciones en el terreno lo que bloquea la línea de vista.

3.5.2.2. Potencia alta: 4.36 Watts

- Ruta 2: En esta ruta, el punto R2P10 presenta una mala recepción debido a una zona de sombra ocasionada por un cerro, no es una ocultación total. Los puntos de R2P14 al R2P20 presentan el mismo problema, a excepción del punto R2P18 que se encuentra en una zona despejada y elevada respecto a los demás puntos, lo cuál le garantiza una buena recepción.
- Ruta 3: Desde el punto inicial hasta el punto R3P15 se obtiene buena recepción. A partir del punto R3P16 hasta el final de la ruta, es decir, el punto R3P20, no se recibe la señal, debido a que estos puntos se encuentran directamente detrás de una zona elevada con bastante vegetación, lo cual dificulta la recepción.
- Ruta 4: Al igual que en el caso de la modulación 4 QAM, el punto R4P14 no tiene recepción debido a la orografía del terreno. Los demás puntos se recibieron de manera correcta.

3.5.3. Conclusión de errores de recepción

Después de analizar las posibles causas de errores en los distintos puntos de recepción estática y de clasificarlas, se ha observado lo siguiente.

La principal causa de errores en este estudio, en cuanto a la recepción, son las zonas de sombra, ocasionadas por la orografía del terreno. La mayoría de los puntos con mala recepción se ocultan detrás de algún cerro o elevación. En cuanto a los errores al atravesar la ruta por una zona urbana, son pocos los que se presentan, esto significa que el entorno urbano no afecta en su mayoría la transmisión y su correcta recepción, algunos errores también presentes en zonas urbanas se deben a la presencia de líneas de distribución eléctrica, esto no significa que la presencia de dichas líneas de distribución genere en todos los casos errores en la recepción de la señal.

Existen también algunos puntos en las rutas en donde no se ha podido determinar una causa concreta del error, pese a que en estos se esperaría que el comportamiento de la señal fuera distinto. Para estos puntos solo se puede suponer posibles causas, algunas como elementos tan imprevistos o transitorios como el paso de algún vehículo que genere ruido eléctrico o inclusive genere también multitrayectos en la señal.

Con esto se demuestra que el estándar DRM+ opera de manera satisfactoria en ambientes tanto rurales como suburbanos, empleando el esquema de radio de muy baja potencia. Las causas de errores no se deben al sistema, es más bien producto de la implementación e infraestructura disponibles. La ocultación de la línea de vista y la consiguiente mala recepción, pueden mejorarse

al elevar la altura de la antena transmisora, pero esto no siempre es posible y obedece a los recursos disponibles para la implementación de la radiodifusora.

Debido a que se trata con el usuario final, el mejorar el receptor no es factible, debido a que los radios se fabrican directo para consumo, por lo que modificarlos no es recomendable. Es por esta razón que el mejoramiento de los posibles problemas en la recepción debe ser manejado por la estación de radio, no por el radioescucha.

4 Resultados de recepción móvil

En este capítulo se hablará de los resultados obtenidos de las mediciones con recepción móvil, empezando por la obtención de las muestras en las mediciones, se buscarán posibles causas de error, y se obtendrá la estimación de la cobertura.

Además se compararán los resultados de los dos tipos de recepción, para poder visualizar la afectación, tanto en los umbrales como en la cobertura, al pasar de uno a otro.

4.1. Obtención de las muestras

De manera similar al capítulo anterior, lo primero que debe hacerse es la captura y vaciado de las muestras a una hoja de cálculo, para poder ser separadas de acuerdo a las necesidades del estudio.

Para este caso, no se cuenta con mediciones de la potencia o voltaje recibida por el equipo, debido a un problema técnico en el arreglo del laboratorio móvil, que impidió realizar más de una medición a la vez. Las medidas con la que se cuenta es la *relación señal a ruido* a lo largo del trayecto.

Aunque el valor del factor de antena fue calculado anteriormente y se emplea el mismo arreglo en el laboratorio móvil, no es necesario para los cálculos en recepción móvil, ya que no se tienen valores de voltajes en la línea para convertir a campo eléctrico. Sin embargo de ser así, se seguiría un proceso similar al empleado anteriormente.

4.1.1. SNR en recepción móvil

Las mediciones se realizaron por *tramos*, es decir, dichas mediciones suceden entre los puntos fijos de las rutas del apartado anterior. Las mediciones en movimiento no son más que varias mediciones de la SNR, mientras el laboratorio móvil se traslada entre estos puntos.

Las mediciones de la SNR y la calidad del audio, AQ, se realizan cada 100 milisegundos debido a que el receptor arroja dichas mediciones en ese intervalo de tiempo y a que esta es la duración de una trama de transmisión de la señal DRM+, como se ha explicado en apartados anteriores. Las mediciones geográficas, es decir, la información de en qué puntos específicos de la ruta se realizaron las mediciones de SNR, fueron hechas cada segundo, debido a que el GPS actualiza dicha información en ese periodo de tiempo. Es decir, por cada medición de geolocalización, se han realizado 10 mediciones de la *relación señal a ruido*.

Debido a este hecho, se tiene que encontrar una forma de representar lo mejor posible a las 10 muestras de SNR, con una sola. Promediarlas no es la mejor manera de tratar a las muestras, además de que para los efectos de la estimación de los umbrales no se obtienen resultados aceptables, es por esto que se ha tomado el valor *mediano* de las 10 mediciones. Este valor mediano es el que mejor representa las mediciones de la SNR a lo largo del intervalo de un segundo que toma al GPS realizar la medición de la localización del laboratorio móvil, ya que se obtiene un valor que representa a la medición el 50 % del tiempo.

Este proceso se realiza cada segundo hasta cubrir la totalidad del espacio de la ruta entre dos puntos fijos, a este espacio le llamamos *tramo*. No está de más aclarar que el número de mediciones por tramo va a depender de la velocidad a la que haya circulado el laboratorio móvil entre los puntos de la ruta, es por esta razón que en algunos tramos de las gráficas que se mostrarán en apartados siguientes, la densidad espacial de las mediciones varía.

En la siguiente imagen se aprecia como entre las mediciones de puntos fijos (puntos grandes) se tienen varias mediciones de SNR del punto 13 al punto 14 de la ruta 2. Las mediciones de esta imagen pasan por un asentamiento urbano.



Figura 4.1: Tramo R2P13 al R2P14 con 1 Watt y 4 QAM

4.2. Resultados

De manera similar a lo hecho anteriormente, primero se presentarán las gráficas obtenidas, esta vez de la relación señal a ruido en función de la distancia al transmisor, ya que sólo se contaban con estos datos, la estimación de campo eléctrico no se pudo realizar. Las gráficas serán mostradas y en apartados siguientes se les dará la explicación e interpretación correspondiente. Nuevamente fue necesario dividir los resultados de acuerdo a la calidad del audio obtenida en la recepción. Para esta clasificación se sigue usando el código de tres colores.

Se emplea el color rojo con los puntos que registran una $AQ < 90\%$, el amarillo con aquellos que su calidad de audio sea entre $90\% \leq AQ < 98\%$ y con verde todos aquellos tramos con una $AQ > 98\%$.

De manera análoga, se han separado las gráficas que reúnen a las mediciones de los tramos, por su potencia y modulación empleada, ya que los efectos de propagación tienen una afectación en menor o mayor grado, dependiendo de las condiciones de transmisión empleadas.

Cabe mencionar que estas mediciones heredan los mismos problemas que las mediciones estáticas. Si no se cuentan con mediciones de ciertas rutas en puntos estáticos, debido a problemas como el ruido eléctrico generado por el aire acondicionado del laboratorio móvil, tampoco se contarán con estas mediciones en los tramos recorridos para las mediciones móviles.

Existen también tramos no considerados, pero que fueron recolectados para el estudio, como algunos en los que el laboratorio móvil tuvo que hacer una parada en una gasolinera o alguna otra parada no planificada. Se tienen esos datos, pero debido a que no están contemplados en la planeación del estudio, no se toman en cuenta para las gráficas o los procesos de estimación de la cobertura de la emisión.

A continuación se presentan los resultados.

4.2.1. Potencia baja y modulación 4 QAM

Caso 1.

Potencia de transmisión empleada: 1.36 Watts

Modulación empleada: 4 QAM

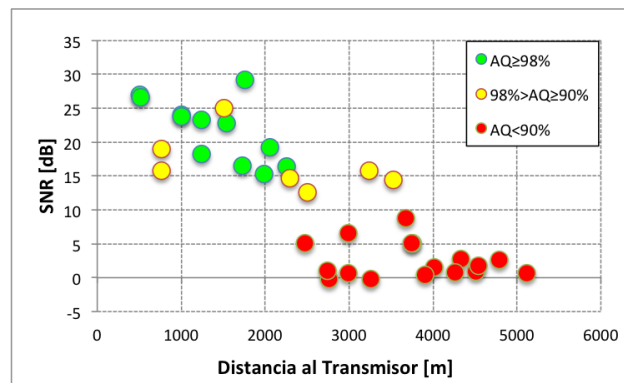


Figura 4.2: Caso 1. SNR en función de la distancia al transmisor

Para estos resultados no se contó con datos proporcionados de la Ruta 4 ni de la Ruta 1, debido a que el aire acondicionado del laboratorio móvil generaba demasiado ruido eléctrico, es por esto que se decidió no tomar en cuenta estas mediciones.

Los resultados globales de la calidad de audio obtenida, también se pueden expresar de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Tramos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	12	33.3 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	7	19.5 %
$AQ < 90 \%$	17	47.2 %
Total de tramos	36	100 %

4.2.2. Potencia baja y modulación 16 QAM

Caso 2.

Potencia de transmisión empleada: 1.36 Watts

Modulación empleada: 16 QAM

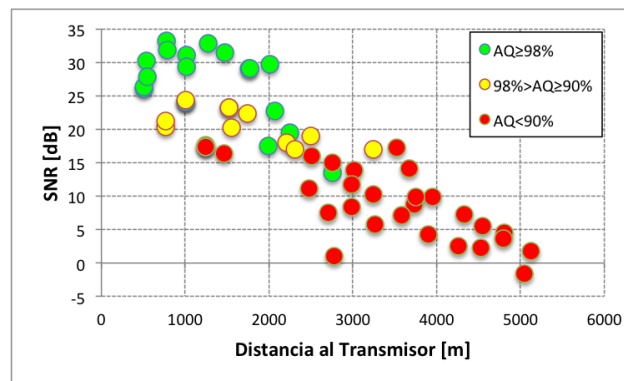


Figura 4.3: Caso 2. SNR en función de la distancia al transmisor

Estos resultados no presenta muestras de la Ruta 1, pero si algunos de la Ruta 4, los de las Rutas 2 y 3 están completos, nuevamente la falta de datos corresponde a la interferencia provocada por el aire acondicionado del laboratorio móvil.

Los resultados globales de la calidad de audio obtenida, también se pueden expresar de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Tramos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	19	32.2 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	11	18.6 %
$AQ < 90 \%$	29	49.2 %
Total de tramos	59	100 %

4.2.3. Potencia alta y modulación 4 QAM

Caso 3.

Potencia de transmisión empleada: 4.36 Watts

Modulación empleada: 4 QAM

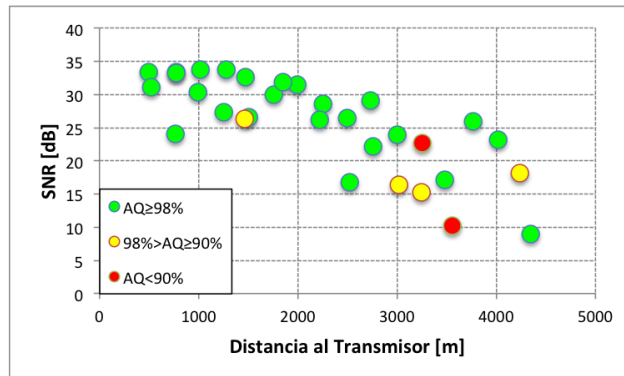


Figura 4.4: Caso 3. SNR en función de la distancia al transmisor

Los resultados mostrados de esta configuración no presentan datos de la Ruta 2.

Los resultados globales de la calidad de audio obtenida, también se pueden expresar de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Tramos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	25	80.6 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	4	12.9 %
$AQ < 90 \%$	2	6.5 %
Total de tramos	31	100 %

4.2.4. Potencia alta y modulación 16 QAM

Caso 4.

Potencia de transmisión empleada: 4.36 Watts

Modulación empleada: 16 QAM

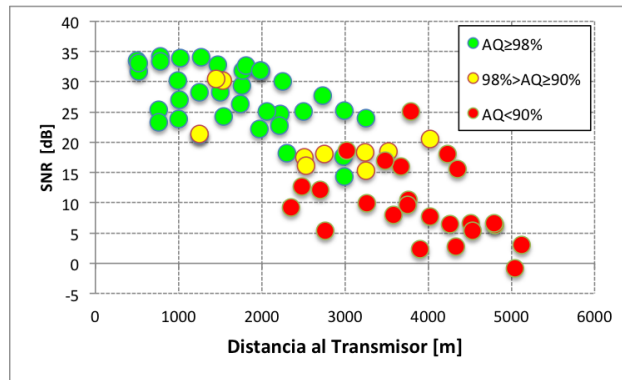


Figura 4.5: Caso 4. SNR en función de la distancia al transmisor

Esta es la configuración con más datos, aparecen resultados de todas las rutas recorridas por el laboratorio móvil.

Los resultados globales de la calidad de audio obtenida, también se pueden expresar de la siguiente forma:

Parámetro AQ	Tramos	Porcentaje
$AQ \geq 98 \%$	34	48.6 %
$90 \% \leq AQ < 98 \%$	12	17.1 %
$AQ < 90 \%$	24	34.3 %
Total de tramos	70	100 %

4.2.5. Resumen

Una vez que se han mostrado y acomodado las gráficas y tablas, es posible interpretar los resultados de estas.

Se puede resaltar de las tablas, los porcentajes de los tramos. En todas las configuraciones realizadas, la suma de los puntos verdes, es decir aquellos tramos con una calidad de audio (AQ) mayor al 98 %; más los tramos en color amarillo, aquellos con una AQ entre 90 % y 98 %, fue mayor al 50 % de los casos del estudio.

Es decir, en más de la mitad de los tramos del estudio, la calidad del audio fue mayor al 90 %. Si bien es cierto que la calidad mínima de audio requerida para una buena recepción, debe ser mayor al 98 %, lo importante a resaltar es que las mediciones hechas tienden hacia el valor alto (la buena recepción).

En casi todas las configuraciones, las mediciones con una AQ entre el 90 % y 98 % son las menos abundantes. Esto significa que aunque se presenten errores, estos deben ser efectos transitorios, debido a causas fuera del control del estudio. Cuando se trata con señales digitales, el umbral entre una recepción correcta y una recepción mala, es de pocos dB de diferencia.

Debido a su importancia, dichas causas se analizarán en un apartado siguiente.

Analizando las gráficas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- 1.36 Watts y 4 QAM: Empleando esta configuración en el transmisor, se obtuvo que la señal logró ser recibida de manera correcta a una distancia de 2.5 km. Al comparar con las mediciones en recepción estática, se observa que el alcance se redujo en 1 km, pero se debe tener en cuenta que la recepción móvil presenta fuentes y causas de errores no existentes en la recepción de manera estática.
- 1.36 Watts y 16 QAM: Con esta configuración el alcance de la transmisión de la estación fue alrededor de 2.2 km. Como era de esperarse es menor que el caso anterior, ya que la modulación empleada juega un factor importante, por ser esta menos robusta y más susceptible a los efectos nocivos durante la propagación de la señal. En este caso la diferencia entre móvil y estática, también fue de 1 km.
- 4.36 Watts y 4 QAM: La cobertura lograda con esta configuración es visiblemente mayor que cuando se emplea la potencia baja. El alcance obtenido fue alrededor de los 4 kilómetros, que comparada con su contraparte en recepción estática, solo difieren por 0.5 km.
- 4.36 Watts y 16 QAM: Al emplear esta última configuración, se obtuvo que el alcance de la emisión fue alrededor de 3 km, lo cual difiere en 1 kilómetro con la configuración anterior, y hasta 0.5 km de su contraparte en recepción de manera estática.

Resulta evidente que al emplear una potencia baja de transmisión, la cobertura lograda se reduce hasta casi la mitad de la obtenida de manera estática. Mientras que al emplear la potencia de transmisión alta, la variación no es tan significativa en proporción, ya que en cantidades resultan muy similares.

Con esto se aprecia que mientras de manera estática, los efectos adversos a la transmisión son muy parecidos al emplear una potencia alta o baja, para la recepción móvil, los efectos son más pronunciados. La transmisión con potencias bajas, en este caso de 1.36 Watts, es mucho más susceptible a errores en la recepción móvil.

Al no tener datos con los cuales comparar las transmisiones de DRM+ con las hechas con FM en el caso móvil, no se puede dar una conclusión clara sobre la ventaja o desventaja de un sistema sobre el otro. Pero basándose en lo visto en el caso de recepción en situación estática, si las tendencias se mantienen, se entiende que el empleo del sistema DRM+ puede lograr las mismas coberturas que su contraparte analógica, pero utilizando una potencia de transmisión significativamente menor.

4.3. Cobertura y umbral de recepción

Como se ha explicado en apartados anteriores, debido a un problema técnico durante la instalación del arreglo para la recepción de la señal dentro del laboratorio móvil, no fue posible realizar mediciones simultáneas de el campo eléctrico y la relación señal a ruido. Por esta razón,

el único umbral que se estimará será el de la SNR mínima necesaria para obtener una recepción correcta en el receptor DRM+.

De manera similar al caso de recepción estática, se espera que no existan diferencias significativas independientemente de la potencia de transmisión empleada. Lo que si se espera es que el valor del umbral de SNR sea un tanto mayor al obtenido en la recepción estática, ya que el movimiento agrega más efectos que afectan la señal.

A continuación se muestra un cuadro mostrando los resultados obtenidos de las gráficas.

Cuadro 4.1: Umbrales y coberturas en recepción móvil

		Modulación			
		4 QAM		16 QAM	
Potencia	1.36 Watts	Cobertura:	2.5 km	Cobertura:	2.2 km
		Umbral:	SNR: 12 dB	Umbral:	SNR: 17 dB
	4.36 Watts	Cobertura:	4 km	Cobertura:	3 km
		Umbral:	SNR: 15 dB	Umbral:	SNR: 18 dB

Una vez se tienen agrupados los resultados de esta manera, se puede concluir lo siguiente:

- SNR: La relación señal a ruido necesaria para una correcta recepción de manera móvil, es de al menos 12 dB. Se requieren entre 3 y 5 dB más , para poder recibir de manera correcta los datos al emplear la modulación 16 QAM, que es menos robusta que 4 QAM. Al comparar estos resultados con los obtenidos en recepción estática, se aprecia que la estabilidad del sistema baja al moverse el receptor, es por esta razón que se requieren de entre 5 a 9 dB más de SNR para realizar la correcta recepción, estos valores dependen de la configuración empleada en el transmisor.
- Cobertura: Como se explicó brevemente en el apartado anterior, el alcance máximo obtenido para el mejor caso, fue de 4 km., mientras que el peor de los casos fue de 2.2 km. Los resultados son ligeramente inferiores a los obtenidos de manera estática, cuando se emplea la potencia alta, mientras que al emplear la potencia baja, los resultados tienen más variación. Esto significa que los efectos adversos al estar en movimiento el receptor son bastante más pronunciados al emplear bajas potencias, presentando variaciones en la cobertura de hasta 1 kilómetro.

4.3.1. Comparación entre recepción estática y móvil

Se ha mencionado las diferencias entre los mismos parámetros, al cambiar en el tipo de recepción empleada, ya sea la móvil o la estática. En este apartado se mostrarán de mejor manera dichas diferencias.

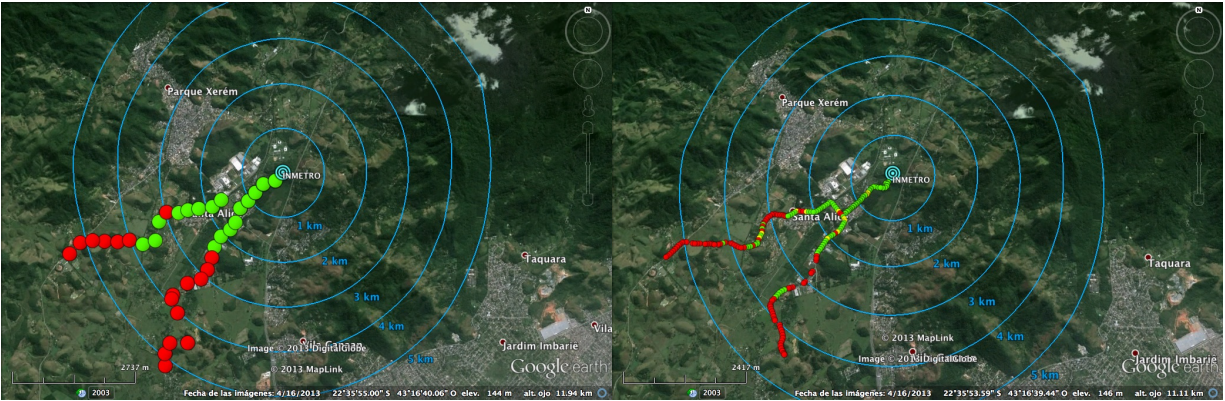


Figura 4.6: Cobertura: Empleando 1.36 Watts y 4 QAM, recepción estática y móvil.

Ya que mostrar solo números, no es suficiente a veces, con estas comparaciones es posible ver mejor las diferencias entre los tipos de recepción.

Los parámetros de la estación no cambiaron, son los mismos, lo que cambia es que el receptor ahora se encuentra en movimiento.

En este caso se observa que la señal de manera estática logró una cobertura de hasta 3.5 kilómetros, mientras que de manera móvil apenas logró los 2.5 kilómetros. Si bien hay tramos más adelante que reciben la señal, no lo hacen de manera constante, aunado a que son muy pocos para poder considerarlos como una cobertura extendida.

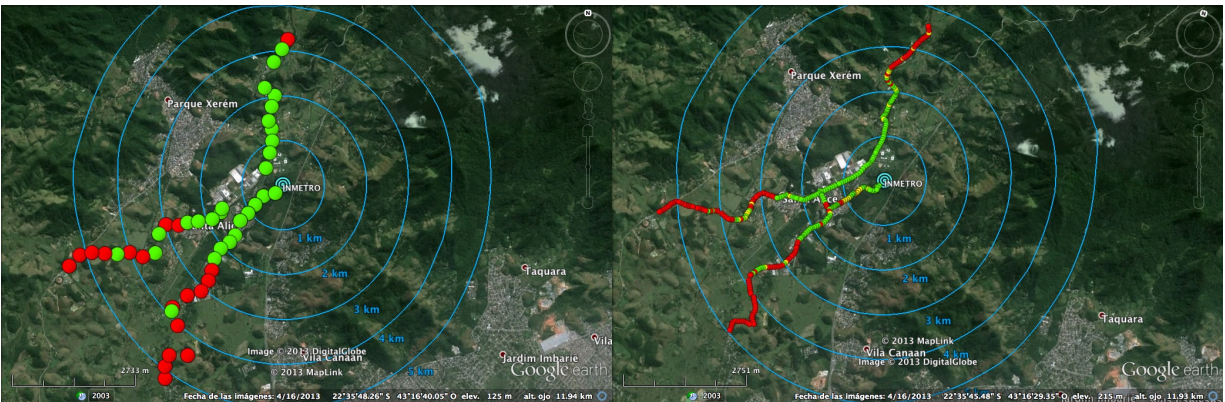


Figura 4.7: Cobertura: Empleando 4.36 Watts y 16 QAM, recepción estática y móvil.

En estas imágenes se ve como afecta la modulación a la cobertura. La recepción estática logró unos 3.3 km. de cobertura, mientras que la móvil se redujo a unos 2.2 km. Tanto para este caso como el anterior, se redujo en un kilómetro la recepción al mover el receptor.

Cuadro 4.2: Comparación de cobertura con recepción estática y móvil

Cobertura		Estática		Móvil	
		Modulación empleada			
		4 QAM	16 QAM	4 QAM	16 QAM
Potencia	1.36 Watts	3.5 km	3.3 km	2.5 km	2.3 km
	4.36 Watts	4.5 km	3.5 km	4 km	3 km

Una característica que se debe destacar en estas diferencias son las proporciones. Una variación de hasta un kilómetro entre la recepción móvil y la estática parece bastante, si se considera que la máxima cobertura en recepción estática fue de 3.5 kilómetros. Es decir, el alcance de la señal varía casi un tercio de la cobertura. Pero al pasar a la potencia alta, la variación es de al rededor de 500 metros, es decir, que en proporción en la recepción móvil se *pierde* casi un octavo de la cobertura en el caso estático, lo cuál ya no parece tan grande.

Ahora se comparará el umbral de SNR en ambos casos, la recepción estática y la móvil. Como se esperaba y como se ha apreciado, el umbral en recepción móvil es mayor al conseguido en recepción estática, debido que el receptor se encuentra en movimiento, esta única razón hace que se necesite más inmunidad al ruido, los demás factores también contribuyen, pero esos se analizarán en el siguiente apartado.

Cuadro 4.3: Comparación de SNR con recepción estática y móvil

Relación señal a ruido: SNR		Estática		Móvil	
		Modulación empleada			
		4 QAM	16 QAM	4 QAM	16 QAM
Potencia	1.36 Watts	5 dB	9 dB	12 dB	17 dB
	4.36 Watts	5 dB	9 dB	15 dB	18 dB

La tabla anterior muestra que el umbral de la relación señal a ruido es afectada mucho más que otros parámetros de la transmisión.

La SNR tuvo que subir entre 7 y 10 dB respecto a su contraparte de manera estática. Dado que la potencia de la señal no varía, es la misma en ambos casos, lo que aumentó de manera drástica fue el umbral mínimo necesario para una buena recepción, es decir, al encontrarse el receptor en movimiento la señal recibida variará mucho más que en caso de la recepción estática., considerando que un aumento de 3 dB sugiere un incremento del doble de la intensidad de la señal.

Aún con este aumento del umbral de la SNR necesaria, sigue siendo muy bajo en relación a la requerida por el FM, tanto de manera estática como móvil. La desventaja respecto a la modulación analógica, es que si la relación señal a ruido cae por debajo de estos valores límite, se pierde toda la información, mientras que en la modulación FM, la calidad de audio se irá degradando poco a poco hasta que se desvanezca por completo.

4.4. Causas de errores en la recepción

Se plantea analizar las posibles causas de errores en la recepción por tramos. La búsqueda de estos errores, resulta ser más complicada que la de la recepción estática, ya que se buscan las causas no en solo un punto sino en varios, además de que en el intervalo de medición pueden haber ocurrido bastantes transitorios, los cuáles pueden no estar todos registrados en el relatorio de las pruebas.

Las posibles causas de error son las siguientes:

- Bajo nivel de campo eléctrico: Debido a la ocultación de la línea de vista con el transmisor por algún cerro o edificio. Aunque no se pueda medir este efecto, es evidente que también afecta en la calidad de la recepción.
- Ruido alto: Debido a asentamientos urbanos o la presencia de líneas de transmisión eléctricas.
- Multitrayecto: Debido a los rebotes perjudiciales de la señal, principalmente en zonas urbanas donde existen mayor número de superficies reflejantes.

Nuevamente se dividirá el análisis por ruta, así como por modulación y potencia empleada.

Cabe mencionar que la nomenclatura cambia un poco cuando se hablan de los tramos, ya que no se tratan con puntos fijos. Es decir, ahora se expresa el tramo entre puntos de la siguiente manera. *R2P01toR2P02* esto significa el tramo comprendido entre el punto 01 y el punto 02 de la ruta 2.

4.4.1. Modulación 4 QAM

4.4.1.1. Potencia baja: 1.36 Watts

- Ruta 2: Los tramos iniciales hasta el *R2P07toR2P08* tienen buena calidad de audio, en este tramo sólo una de las mediciones de las cinco realizadas tuvo mala calidad de audio, por lo que al tomar la mediana de los valores, ese tramo no presenta problemas, esto debido a que se trabaja con valores estadísticos. Los tramos *R2P09toR2P010* y *R2P10toR2P11* presentan en su mayoría puntos con mala calidad de audio, se debe a que atraviesan una zona urbana, bodegas y naves comerciales, y a que existe un ocultamiento por una zona con vegetación abundante. Al igual que en recepción estática, a partir del punto *R2P10* no se tiene buena recepción.
- Ruta 3: Los tramos iniciales no tienen problemas. En el tramo *R3P05toR3P06* se tiene dos de las cinco muestras con mala calidad de audio, debido a una pequeña elevación en el terreno, con vegetación abundante que generan una zona de sombra, pero en este tramo al tomar la mediana no se tiene problema. En el tramo *R3P08toR3P09* tres de las cinco mediciones presentan mala calidad de audio, al tomar la mediana de las mediciones se obtiene una AQ de apenas mayor a 90 %, este resultado se debe a que el tramo atraviesa una zona urbana y justo las tres mediciones con mala calidad de audio están

en la zona de sombra ocasionada por un cerro. A partir del tramo *R3P11toR3P12* al tramo *R3P14toR3P15* se tiene buena recepción de manera intermitente, principalmente por elevaciones en el terreno, tanto zonas de sombra como elevaciones benéficas, más adelante de estos tramos se tiene mala recepción de la señal.

4.4.1.2. Potencia alta: 4.36 Watts

- Ruta 4: Esta ruta presenta casi en su totalidad recepciones con buena calidad de audio, a excepción del tramo *RAP11toRAP12* donde la calidad del audio baja, debido a que se tiene una gran elevación de terreno llena de vegetación a un lado del tramo, además de que la orografía ya no le permite tener una línea de visión el transmisor, es decir, es una pequeña zona de sombra dentro de la ruta.

4.4.2. Modulación 16 QAM

4.4.2.1. Potencia baja: 1.36 Watts

- Ruta 2: Los tramos iniciales no presentan problemas, a partir de los tramos comprendidos entre el punto R2P04 al R2P07 se tiene solo una medición mal en cada tramo, esto significa que no hay problemas significativos en estos tramos. De los tramos comprendidos entre el punto R2P09 al R2P14, podríamos considerarlo como una zona de transición, debido a que una elevación del terreno ocasiona una zona de sombra parcial sobre estos tramos, ya que la recepción varía intermitente entre buena y mala, a partir del tramo *R2P14toR2P15* en adelante se tiene una mala recepción, debido a lo mencionado antes, además de presentarse aún más elevaciones del terreno y una forestal muy abundante.
- Ruta 3: El primer tramo con problemas es el *R3P2toR3P03* debido a que atraviesa una zona con vegetación abundante. En el tramo *R3P05toR3P06* la ruta da una vuelta, justo en ese punto una elevación de terreno se eleva y provoca una zona de sombra en el principio del tramo. En el tramo *R3P08toR3P09* sólo una de las seis mediciones realizadas presenta problemas, esto debido probablemente a multitrayectos por edificios o vehículos, ya que atraviesa una zona urbana. Los tramos comprendidos entre el punto R3P09 y el R3P12 presentan mala recepción, debido a que se encuentran en una zona de sombra producida por la elevación de un cerro. A partir de dicho tramos en adelante se presenta de manera intermitente, en su mayoría, casos de mala recepción
- Ruta 4: En esta ruta se cuenta con una buena recepción de la señal hasta llegar a los tramos comprendidos más allá del punto R4P08, ya que se presentan varias elevaciones de terreno, generando así varias zonas de sombra, por lo que la señal no puede ser correctamente recibida.

4.4.2.2. Potencia alta: 4.36 Watts

- Ruta 2: Para esta ruta se presenta buena recepción hasta la casi la mitad, en los tramos *R2P09toR2P10* y el *R2P10toR2P11* debido a una elevación del terreno, se presenta una zona de ocultación, por lo que la señal no puede ser correctamente recibida. De igual manera, para los tramos *R2P12toR2P13* y el *R2P14toR2P15*, la misma elevación de terreno obstruye la línea de visión directa con el transmisor, los tramos siguientes presentan una mala recepción, principalmente por la misma razón, además de presentar vegetación abundante.
- Ruta 3: Como ya se ha mencionado anteriormente, el tramo *R3P05toR3P06* de la ruta, da un giro y se esconde por una pequeña elevación del terreno, lo que provoca una zona de sombra. El tramo *R3P10toR3P11* presenta mala recepción, éste se encuentra en un pequeño valle, además de estar entre dos zonas urbanas, es posible se generen zonas de ocultamiento entre éstas . A partir de los tramos comprendidos después del punto R3P14 la recepción no es la correcta, debido en su mayoría a las zonas de sombra generadas por elevaciones del terreno.
- Ruta 4: Esta ruta presenta en su mayoría buena recepción, exceptuando en los tramos finales, donde las elevaciones del terreno generan zonas de ocultamiento, además de la presencia de vegetación abundante lo impiden.

4.4.3. Conclusión del estudio de los errores de recepción

Una vez realizado en análisis de las posibles causas de errores en la recepción de las pruebas, se aprecia lo siguiente.

Si bien es cierto que la cobertura de la recepción móvil se ve reducida en comparación de la estática, estas siguen los mismos patrones. La principal causa de errores en ambos casos han sido por un bajo nivel en el campo eléctrico recibido por el equipo, debido principalmente a las elevaciones del terreno que se presentan en los trayectos de las diversas rutas. Todas las zonas de sombra que afectan a la señal en recepción estática, afectan a la recepción móvil. En algunos puntos de las rutas, el efecto es mínimo de estas zonas de sombra, pero considerablemente mayor que en caso de la recepción estática. Las elevaciones naturales no son la única fuente de zonas de sombra, también los edificios o construcciones cercanas pueden generar zonas de sombra pequeñas que afecten a ciertos receptores en particular, pero no a toda una zona.

En menor medida, el multitrayecto es otra causa de errores en la recepción, éste se presenta casi exclusivamente en los asentamientos urbanos, donde existen más áreas reflejantes que afectan la calidad de la señal recibida. Debido a que esta es una zona rural, no se aprecia tanto la afectación.

Un efecto notorio, es que la cobertura se ve reducida hacia el sur del transmisor, ya que al compararlo con la parte norte, se obtiene una cobertura ligeramente mayor. Esto se debe principalmente a que las rutas que van al sur, presentan más elevaciones de terreno, las cuales generan más zonas de sombra y ocultamiento.

Por último, al igual que en el caso de recepción estática, aquellos lugares donde la señal, ya sea el campo eléctrico o la relación señal a ruido, caen drásticamente y momentáneamente, se presume que es causado por efectos transitorios, algunos como los desvanecimientos de la señal, otros pueden deberse a más multitrayectos pero generados por vehículos, o algunas otras fuentes de ruido eléctrico.

Para este caso, es aún más complicado mejorar el sistema en cuanto a la recepción, al menos en lo que respecta al usuario final, ya que al ser móvil la recepción, cambiar las características del equipo como las antenas, o algún parámetro de estas resulta muy complejo. La mejoría en la calidad de la señal recibida por el usuario final, debe de venir del radiodifusor, ya que para este es más factible el cambiar o adecuar su infraestructura disponible.

5 Conclusiones y resultados

Al principio de este trabajo se habló del objetivo del mismo, que básicamente se resume en lo siguiente: Mediante el análisis y la evaluación del sistema DRM+, empleando el esquema de radio comunitaria de muy baja potencia, determinar los umbrales de operación del sistema y la cobertura, así como la implantación del mismo y su viabilidad.

Como se ha expresado a lo largo del trabajo, la determinación de estos umbrales de operación del sistema se dividió en dos casos de estudio, la recepción de manera estática y la recepción de manera móvil. Aunque en ambos casos el equipo empleado es el mismo y las condiciones de operación no varían, al agregar la movilidad en el receptor, se introduce más variabilidad al estudio, es por esta razón que no pueden compararse directamente dichos casos.

A continuación se muestran las conclusiones de los estudios en recepción estática y móvil.

5.1. Recepción estática

Resumiendo el trabajo del estudio en recepción estática en el cuadro 5.1, se concluye lo siguiente.

Cuadro 5.1: Umbrales y cobertura de recepción estática

		Modulación			
		4 QAM		16 QAM	
Potencia	1.36 Watts	Cobertura:	3.5 km	Cobertura:	3.3 km
		Umbral:	SNR: 5 dB CE: 30 dB _{μV/m}	Umbral:	SNR: 9 dB CE: 34 dB _{μV/m}
	4.36 Watts	Cobertura:	4.5 km	Cobertura:	3.5 km
		Umbral:	SNR: 5 dB CE: 32 dB _{μV/m}	Umbral:	SNR: 9 dB CE: 35 dB _{μV/m}

Se determinó que el umbral mínimo necesario de SNR es de 5 dB, para poder recibir la señal de manera correcta empleando la modulación 4 QAM; no así para el caso de la modulación 16 QAM, donde se necesitan al menos 9 dB. Es decir, al cambiar la modulación a una con mayor flujo de información, se incrementa en 4 dB la relación señal a ruido.

Por otro lado, la intensidad mínima de campo eléctrico para la correcta recepción de la señal, como se demostró, no depende de la potencia empleada, sino únicamente de la modulación. Como se muestra en la tabla, son necesarios entre 30 y 32 dB_{μV/m} al emplear 4 QAM, mientras

que al emplear la modulación 16 QAM, son necesarios entre 34 y 35 dB_{μV/m}. Como se aprecia, al cambiar de modulación, hubo un incremento de 3 a 4 dB en el valor mínimo de campo eléctrico, lo cual es congruente con el incremento del umbral de la SNR.

Que la diferencia entre la modulación 4 QAM y la modulación 16 QAM no sea la misma, no significa haya algo malo con la determinación de los umbrales, más bien se debe a precisión del estudio. Si se hubieran contado con más muestras, sería menos significativa la diferencia.

La cobertura es el último parámetro analizado, la cual depende más de la potencia de transmisión empleada, que de la modulación. Como se observa en el cuadro 5.1, la cobertura lograda al emplear 1.36 watts, se vio reducida en 0.2 km al cambiar de la modulación 4 QAM a 16 QAM, dando así un alcance de 3.5 y 3.3 km, respectivamente.

Al observar la cobertura utilizando una potencia de 4.36 watts en la transmisión, se encuentra una variación de 1 km, la cual en primera instancia parece ser demasiado grande, pero al haber analizado esta diferencia, se observa que no se debe al cambio de modulación, sino a las rutas empleadas para el estudio. Al emplear la modulación 4 QAM se recorren las rutas que van hacia el norte del transmisor, logrando una cobertura de 4.5 km, al emplear la modulación 16 QAM se emplean las rutas norte, pero también las que se dirigen al sur, siendo en estas últimas donde debido a la orografía del terreno la cobertura no supera los 3.5 km. Es decir, que con la modulación 16 QAM la cobertura puede ser mayor, pero debido al terreno, no a la elección de la modulación, la cobertura se ve reducida. En este caso, la determinación de los umbrales y la cobertura, se dificultó bastante, por el problema de las rutas con dirección sur.

5.2. Recepción móvil

Para resumir el estudio en recepción móvil, se presenta el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2: Umbrales de recepción móvil

		Modulación			
		4 QAM		16 QAM	
Potencia	1.36 Watts	Cobertura:	2.5 km	Cobertura:	2.2 km
		Umbral:	SNR:12 dB	Umbral:	SNR: 17 dB
	4.36 Watts	Cobertura:	4 km	Cobertura:	3 km
		Umbral:	SNR: 15 dB	Umbral:	SNR: 18 dB

Como se explicó anteriormente, no se cuentan con mediciones de el campo eléctrico, por lo que este valor no se comparó entre los dos tipos de recepciones.

Se determinó que el umbral de SNR mínima para poder recibir la señal de manera correcta empleando la modulación 4 QAM es de entre 12 y 15 dB con una potencia de 1.36 watts, mientras que es de 15 dB para una potencia de 4.36 watts.

Al cambiar la modulación a 16 QAM, los valores son más consistentes. Se determinó que se necesitan entre 17 y 18 dB de SNR para la correcta recepción. El incremento de la SNR mínima necesaria para la recepción es alrededor de 3 a 5 dB, lo cuál no dista mucho de lo obtenido en la recepción estática, es decir, es congruente con lo obtenido anteriormente.

En el caso de la cobertura, se observa que ésta tiene una variación significativa con la potencia de transmisión seleccionada, no tanto con la modulación. Empleando una potencia de 1.36 watts y la modulación 4 QAM, se logró una cobertura de 2.5 km., mientras que al cambiar la modulación a 16 QAM la cobertura se redujo a 2.2 km. Al operar con una potencia de 4.36 watts se logró una cobertura de 4 km al emplear la modulación 4 QAM, la cual se redujo a 3 km al pasar a la modulación 16 QAM. Al igual que en el caso de recepción estática, la cobertura lograda hacia el sur del transmisor es menor debido a la orografía. Lo que provoca que las diferencias en la cobertura sea mucho más pronunciada.

5.3. Resumen

En cuanto a los parámetros analizados y a los que se pueden modificar en la transmisión, se concluye lo siguiente.

- Modulación: El escoger una modulación u otra, no afecta de manera significativa a la cobertura. Aunque hubo casos de variación mayor, esto se debe a la resolución y cantidad de puntos analizados, no al sistema en sí. Esta elección estará a cargo del radiodifusor, dependiendo la cantidad de información que considere a enviar. La modulación seleccionada solo afectará el umbral de la SNR mínima requerida en el receptor, de 5 a 9 dB de manera estática o de 12 a 18 dB de manera móvil. Es decir, la modulación no es un parámetro decisivo para la cobertura de la estación, ya que estos umbrales son bastante pequeños en comparación en el FM.
- Potencia: La potencia de transmisión sí afecta de manera directa la cobertura de la estación, ya que de esta depende la cantidad de campo eléctrico recibido, pero no afecta de manera directa al umbral de la relación señal a ruido. Esto significa que la calidad del audio recibido (AQ) sólo varía en función de la modulación empleada. Al manejar datos estadísticos, existirá variabilidad en los resultados, por lo que las diferencias no serán las mismas para todos los casos del estudio.

En cuanto a la viabilidad de implementación del sistema y su operación, se concluye lo siguiente. Emplear el sistema DRM+ bajo el esquema de radio comunitaria de baja potencia, es factible y recomendado, desde el punto de vista de costos de instalación y operación. Como ha quedado demostrado, con potencias muy bajas en comparación de las utilizadas por el sistema FM, se pueden obtener las mismas coberturas. Esto significa que se tiene menos consumo energético, el cuál es un factor que influye al determinar el costo del equipo a adquirir, y dado que se está operando bajo el esquema de radio comunitaria, es la propia comunidad la que operará y pagará los costos de la estación. Al trabajar con potencias bajas, el consumo energético no

es tan grande. La normativa brasileña señala que la radio comunitaria no puede exceder el kilómetro de cobertura, por lo que potencia empleada se verá aún más reducida.

Si la estación ya cuenta con un transmisor, se puede hacer el cambio al sistema DRM+ casi de manera inmediata, solo se necesita del modulador para poder crear la señal DRM+ que es la que será radiada.

La desventaja de la implementación de este sistema radica en el cambio de equipos analógicos a los equipos digitales en la comunidad, es decir en los receptores. Ya que no se cuentan aún con opciones accesibles para la compra de los equipos, además representa un gasto que podrían a considerar innecesario, debido a que ya se tiene un producto que cubre la necesidad de la radio comunitaria. Una manera de amortiguar este hecho, es la posibilidad de la transmisión simultanea en los canales adyacentes. Se podría empezar a transmitir empleando el sistema DRM+, además de FM, con esto los usuarios pueden ir adaptándose a la nueva tecnología en un plazo mayor de tiempo.

5.3.1. Experiencia personal

En la elaboración de este trabajo tuve la oportunidad de aplicar mis conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, en un problema real, en un caso de estudio donde las condiciones distan mucho de las ideales, teniendo que resolver contratiempos al momento, como éstos iban apareciendo. Además tuve la oportunidad de colaborar a su vez, a la elección del sistema de radio digital que adoptará Brasil, es decir, logré poner al servicio de más personas mis conocimientos para un fin común.

Logré comprender que decisiones tan importantes, como la elección de un esquema de radio digital, no es algo trivial, ya que de esta decisión dependen muchos trabajos, además de afectar de manera positiva o negativa, a a virtualmente, todo un país. Es por esta razón que el ingeniero, si bien no siempre tiene un trato personal, sus decisiones y acciones, sí.

5.4. Colaboración en la elaboración del reporte de pruebas

Como objetivo adicional, se encontraba el de colaborar con la publicación del informe oficial para el Ministerio de Comunicaciones de Brasil. Este informe tiene la finalidad de, aunado a otros informes de otros ensayos de pruebas, tanto de DRM30 y DRM+ como de otros sistemas, ayudar al Ministerio a decidir que esquema de radio digital adoptar en el país.

El informe de este ensayo de pruebas fue publicado en diciembre de 2012, por lo que el comité encargado de la elección ya se encuentra deliberando sobre cuál sistema adoptar de manera oficial.

El informe completo se encuentra en la página web del Ministerio de Comunicaciones de Brasil, en el siguiente link.

http://mc.gov.br/component/docman/cat_view/22-acoas/33-radio-digital/80-relatorios-de-testes-com-medicoes

Se anexan algunas páginas de dicho informe.[12]



Serviço Público Federal

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR
INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - **INMETRO**

NOTA TÉCNICA

Nota Técnica: Ditel/25/2012

Referência: Medições de Campo do Sistema DRM+ (*Digital Radio Mondiale*) em Baixa Potência na Faixa de FM em Xerém, Duque de Caxias / RJ.



Diretoria de Metrologia Científica e Industrial (Dimci)

Divisão de Telecomunicações (Ditel)

Endereço: Avenida Nossa Senhora das Graças, 50 – Prédio 6 – Xerém, CEP: 25250-020 – Duque de Caxias / RJ

Telefones: (21) 2679-9072 - Fax: (21) 2679-9001 Ramal 3128 – e-mail: ditel@inmetro.gov.br

MOD-GABIN-024 – Rev. 03 – Apr. Nov/10

Coordenação dos trabalhos

Coordenação-Geral de Avaliação de Outorgas (CGOU) do Departamento de Acompanhamento e Avaliação (DEAA) da Secretaria de Serviços de Comunicação Eletrônica (SCE) do Ministério das Comunicações (MC)

Entidades executantes

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (CSF)

Equipe de engenheiros e técnicos do Ministério das Comunicações que participaram dos testes

Engenheiros e técnicos do Departamento de Acompanhamento e Avaliação (DEAA)
Engenheiros da Delegacia Regional do Ministério das Comunicações no Rio de Janeiro (DRMC-RJ)

Equipe de engenheiros e técnicos do Inmetro que participaram dos testes

Augusto Pereira da Soledade
Jaci Rodrigues Nascimento Junior
João Afonso Cal Braz
Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos
Rodrigo Pereira David

Locais dos testes

Distrito de Xerém, Duque de Caxias/RJ

Instituições de Ensino e Pesquisa envolvidas

Universidade de Brasília (UnB)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
Universidade Federal do Pará (UFPA)
Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC / Rio (CETUC)
Universidade Nacional Autónoma do México (UNAM)
Hannover University
University of Kaiserslautern
Bilbao University
Fraunhofer Institut – (FhG)

Entidades internacionais parceiras

British Broadcasting Corporation (BBC)
RFMondial
Digidia
Tele Diffusion de France (TDF)
Nautel
Thomson
Radio e Televisão de Portugal (RTP)
Deutsche Welle
VT Group
Harris Corporation
Grupo de investigação TSR da UPV/EHU
Fraunhofer IIS



Responsáveis pela análise dos dados:

Flávio Ferreira Lima, PhD (Ministério das Comunicações): Doutor em Radiodifusão Digital, Propagação, Eletromagnetismo, Processamento de Sinais e Sistemas de Telecomunicações.

Cássio Gonçalves do Rego, PhD (UFMG): Doutor em Eletromagnetismo Aplicado.

Ronaldo de Andrade Martins, PhD (UFRN): Doutor em Propagação, Eletromagnetismo e Comunicações Móveis.

José Maria Matias, PhD (UNAM): Doutor em Radiodifusão Digital e Propagação.

Luiz A. R. da Silva Mello, PhD (CETUC/PUC-Rio): Doutor em Sistemas de Telecomunicações.

Rodolfo Saboia Lima de Souza, PhD (Inmetro): Doutor em Sistemas de Telecomunicações.

Marta Pudwell Chaves de Almeida, PhD (Inmetro): Doutora em Eletromagnetismo Aplicado.

Rodrigo Pereira David, MSc (Inmetro): Mestre em Sistemas de Telecomunicações, doutorando em Sistemas de Telecomunicações.



Bibliografía

- [1] Diário oficial da união de 22 de maio de 2009, mayo 2009.
- [2] Diário oficial da união de 13 de junho de 2011, junio 2011.
- [3] Asociación Mundial de Radios Comunitarias America Latina y el Caribe AMARC. Ondas por la libertad. In *Informe de la sexta asamblea mundial de las radios comunitarias*. AMARC, enero 1995.
- [4] ANATEL. *Decreto No. 2615 Aprova o Regulamento do Serviço de Radiodifusão Comunitária*, 1998.
- [5] ANATEL. *Ley No. 9612 Institui o Serviço de Radiodifusão Comunitária e dá outras providências*, 1998.
- [6] COFETEL: Comisión Federal de Telecomunicaciones, Gobierno Federal. *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*, 2011.
- [7] COFETEL: Comisión Federal de Telecomunicaciones, Gobierno Federal. *LINEAMIENTOS para la transición a la Radio Digital Terrestre (RDT), de las estaciones de radiodifusión sonora ubicadas dentro de la zona de 320 kilómetros de la frontera Norte de México*, 2008.
- [8] Digital Radio Mondiale DRM. *A broadcaster's guide*, junio 2010.
- [9] ETSI: European Telecommunications Standards Institute. *ETSI ES 201 980 Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification*, junio 2009.
- [10] The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations. *Recommendation 74-02 E: Method of measuring the field strength at fixed points in the frequency range 29.7 – 960 MHz*, 1999.
- [11] Jesús Reyes García. *Apuntes de fundamentos de comunicaciones*. UNAM, Facultad de Ingeniería, Depto. de Ingeniería en Telecomunicaciones, agosto 2010.
- [12] INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Nota Técnica: Ditel/25/2012 Referência: Medições de Campo do Sistema DRM+ (Digital Radio Mondiale) em Baixa Potência na Faixa de FM em Xerém, Duque de Caxias / RJ.*, diciembre 2012.
- [13] SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *NOM-02-SCT1-1993 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*, 1993.
- [14] UIT-R: Unión Internacional de Telecomunicaciones, Sector de Radiocomunicaciones. *Recomendación BS.412-9 Normas para la planificación de la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en ondas métricas*, diciembre 1998.

- [15] UIT-R: Unión Internacional de Telecomunicaciones, Sector de Radiocomunicaciones. *WP6E 175 Digital Radio Mondiale DRM Daytime MW Tests*, marzo 2005.
- [16] Technical Committee World Broadcasting Unions, WBR. *Digital radio guide*, noviembre 2006.
- [17] R.E. Ziemer. *Principios de comunicaciones, sistemas, modulación y ruido*, page 128. Trillas, México, first edition, 1981.