



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**SISTEMA DE CAPTURA DE MEDIDAS DE
SEÑALES DE TELEVISIÓN SFN-ATSC**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

ANDRÉS MIRANDA MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. MARIO ALBERTO HERNÁNDEZ FLORES



CIUDAD UNIVERSITARIA

08 de diciembre 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Víctor García Garduño

Vocal: M.I. Mario Alberto Hernández Flores

Secretario: Dr. Miguel Moctezuma Flores

1er Suplente: M.I. Juventino Cuéllar González

2do Suplente: Dr. José María Matías Maruri

Lugar donde se realizó la tesis:

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

Director de Tesis:

M.I. Mario Alberto Hernández Flores

FIRMA

*A mi madre Reyna, a mi padre Francisco,
a mi hermana Edith y a mi novia Flor.
Mis logros también son sus logros.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por todo su cariño y apoyo que me brindan día con día y en especial quiero agradecer a mi mamá, a mi papá y a mi hermana por su amor, confianza, apoyo y ejemplo que me impulsan para lograr los objetivos que me proponga.

Gracias a mi novia Flor, por su apoyo, compañía y motivación brindada a lo largo de este trabajo. Gracias por compartir a mi lado esta etapa de mi vida. Este es solo el comienzo.

Gracias a mi director de tesis, el M.I Mario Alberto Hernández Flores por su paciencia, esfuerzo y dedicación. Gracias a su atención y enseñanzas.

Al Dr. José María Matías por invitarme a participar en el proyecto REFUTV, por orientarme para la realización de este trabajo y por todos sus consejos que me ha compartido.

A Julio, Alejandro, Marco, Rogelio, Fernando y Omar por ser los hermanos que uno elige y mis compañeros de vida.

A Alexis, Oswaldo, Yan, Damián, Francisco, Alberto, Fabricio e Irvin, por compartir todos los buenos y malos momentos, y en general, toda la experiencia que fue el pasar por la Facultad de Ingeniería.

Gracias a mis sinodales el Dr. Miguel Moctezuma Flores, M.I Juventino Cuéllar González, Dr. Víctor García Garduño, Dr. José María Matías Maruri y M.I Mario Alberto Hernández Flores, por su tiempo y correcciones a este trabajo.

Y por ultimo gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y a sus profesores por la formación que me brindaron.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Justificación.....	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Metodología.....	3
2	Antecedentes.....	4
2.1	Estándares de televisión digital terrestre.....	4
2.1.1	DVB-T	4
2.1.2	ISDB-T.....	6
2.1.3	DTMB	7
2.2	ATSC	8
2.2.1	Características generales	8
2.2.2	Bloque de transmisión de RF	9
2.3	Redes SFN.....	14
2.3.1	Redes SFN en Televisión Digital Terrestre	14
2.4	Equipamiento utilizado en pruebas de campo con TDT	17
3	Lineamientos del sistema de captura de medidas	20
3.1	Parámetros importantes para el análisis de señales ATSC.....	20
3.1.1	Recomendaciones ATSC	21
3.1.2	Informe UIT-R BT.2035-2.....	23
3.1.3	Otros parámetros de señales ATSC	23
3.2	Revisión general de equipamiento usado y recomendado	26
3.2.1	Recopilación de equipamiento usado en pruebas de campo de TDT	26
3.2.2	Recomendación de la UIT para equipamiento de mediciones de TDT	27
3.3	Definición de los elementos del sistema de captura de medidas.....	28
3.3.1	Organización general del sistema de captura de medidas.....	28
3.3.2	Requerimientos de los elementos del sistema de captura de medidas	29
3.4	Modelo general del sistema de captura de medidas.....	33
4	Selección y propuesta del equipamiento para el sistema de captura de medidas	35
4.1	Evaluación de los equipos de la etapa de recepción y distribución del sistema....	35

4.1.1	Antenas Omnidireccionales.....	36
4.1.2	Antenas Directivas.....	37
4.2	Evaluación de los equipos de la etapa de análisis, digitalización y monitoreo del sistema.....	38
4.2.1	Equipos de análisis de señales de RF.....	39
4.2.2	Equipos de digitalización de señales de RF.....	43
4.2.3	Analizadores de espectro.....	49
4.2.4	Receptores comerciales de ATSC.....	50
4.3	Evaluación de los equipos de la etapa de control y almacenamiento del sistema.....	51
4.3.1	Equipos de control.....	51
4.3.2	Equipos de geolocalización.....	52
4.3.3	Equipos de almacenamiento.....	53
4.4	Sistema de alimentación.....	53
4.5	Propuesta del sistema de captura de medidas.....	54
4.5.1	Equipamiento del sistema de captura de medidas.....	55
4.5.2	Complementos propuestos para los equipos R&S ETL y R&S IQR100.....	56
4.5.3	Material accesorio para el sistema de captura de medidas.....	57
4.5.4	Costo total aproximado del sistema de captura de medidas.....	60
5	Conclusiones.....	62
	Anexo A.....	64
	Referencias.....	86

Índice de figuras

Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar DVB-T.....	5
Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar ISDB-T	7
Figura 2.3: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar DTMB	8
Figura 2.4: Diagrama a bloques del modelo de TDT del estándar ATSC	9
Figura 2.5: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar ATSC	10
Figura 2.6: Sincronía de segmento en el segmento de datos de banda base	11
Figura 2.7: Sincronía de campo en el campo de datos de banda base	12
Figura 2.8: Espectro de una señal 8-VSB	13
Figura 2.9: Constelación de una señal 8-VSB	13
Figura 2.10: Redes MFN y SFN	14
Figura 2.11: Desvanecimiento en frecuencia de una señal con una sola portadora	15
Figura 2.12: Desvanecimiento en frecuencia de una señal con multiportadoras.....	15
Figura 2.13: Estructura del sistema de medición.....	17
Figura 2.14: Diagrama del sistema de mediciones para analizar el estándar ATSC en campo.....	18
Figura 2.15: Diagrama del sistema de mediciones.....	18
Figura 2.16: Diagrama del sistema para mediciones de COFDM en SFN.....	19
Figura 3.1: Probabilidad de segmento en error.....	21
Figura 3.2: Gráfica del desempeño recomendado de un receptor de DTV en presencia de un eco estático.....	22
Figura 3.3: BER en ATSC.....	24
Figura 3.4: Espectro de una señal 8 VSB. En la figura del lado derecho se observa una mala supresión de la banda lateral.....	24
Figura 3.5: Diagrama de constelación de una señal ATSC.....	25
Figura 3.6: Respuesta al impulso del canal.....	25
Figura 3.7: Determinación del MER en una señal 8-VSB	26
Figura 3.8: Diagrama conceptual del sistema de captura de medidas	28
Figura 3.9: Diagrama de bloques del sistema de captura de medidas.....	34
Figura 4.1: Antenas omnidireccionales.....	37
Figura 4.2: Antenas directivas.....	38
Figura 4.3: Pantalla de medición para SFN en ATSC del equipo R&S ETL.....	41
Figura 4.4: Equipo R&S ETL.....	43
Figura 4.5: Equipo R&S IQR100	49
Figura 4.6: Diagrama de bloques del sistema de captura de medidas propuesto	56
Figura 4.7: Diagrama de la propuesta del sistema de captura de medidas con material accesorio.....	60
Figura A-1: Antena R&S HF214.....	64
Figura A-2: Antena R&S HE314A1	65

Figura A-3: Antena R&S HE600.....	66
Figura A-4: Antena MA700	67
Figura A-5: Antena MA160	68
Figura A-6: Antena R&S HL007A2	69
Figura A-7: Antena R&S HL033	70
Figura A-8: Antena R&S HL223	72
Figura A-9: Antena SAS 521-2	73
Figura A-10: Antena SAS 515.....	74
Figura A-11: Antena SAS 521-2	75
Figura A-12: Sistema de antenas AS 2x SYA 406 TETRA.....	76
Figura A-13: Deviser S7000 TV Analyzer	78
Figura A-14: Promax HD Ranger + ATSC	79
Figura A-15: Promax HD Ranger 2 ATSC	79
Figura A-16: R&S ETL.....	80
Figura A-17: R&S FSH3-TV	81
Figura A-18: Cortex RSR de Zodiac Data Systems	81
Figura A-19: IQR de Rohde & Schwarz	82
Figura A-20: IQC5000B de X Com Systems	83
Figura A-21: COM-3011 de ComBlock	83
Figura A-22: USRP de Ettus Research	84
Figura A-23: Noctar de Per Vices Corporation	84

Índice de tablas

Tabla 2.1 Comparación entre Transmisores distribuidos y DOCR's	16
Tabla 3.1: Desempeño recomendado de un receptor de DTV (en 2010) en presencia de un eco estático de la señal útil.	22
Tabla 4.1: Costos de antenas R&S HE600 y R&S HF214	37
Tabla 4.2: Costos de antenas R&S HL0072A y R&S HL033.....	38
Tabla 4.3: Comparación de los equipos de análisis	42
Tabla 4.4: Costos de equipos de análisis	43
Tabla 4.5: Costos de equipos de digitalización de señales de RF	48
Tabla 4.6: Características de analizadores de espectro	50
Tabla 4.7: Calidad de recepción de distintos receptores comerciales.....	51
Tabla 4.8: Computadoras tipo laptop.....	52
Tabla 4.9: Receptores GPS con conexión USB.....	52
Tabla 4.10: Unidades comerciales de almacenamiento externo.....	53
Tabla 4.11: Consumo de energía del sistema de captura de medidas.....	54
Tabla 4.12: Inversores con potencia de salida entre 600 y 1000 W	54
Tabla 4.13: Complementos para el equipo R&S IQR100.....	56
Tabla 4.14: Complementos para el equipo R&S ETL	57
Tabla 4.15: Material accesorio requerido para el sistema de captura de medidas.....	59
Tabla 4.16: Costo total aproximado del sistema de captura de medidas propuesto	61
Tabla A-1: Especificaciones de la antena R&S HF214	65
Tabla A-2: Especificaciones de la antena R&S HE314A1	65
Tabla A-3: Especificaciones de la antena R&S HE600	66
Tabla A-4: Especificaciones de la antena MA700	67
Tabla A-5: Especificaciones de la antena MA160	68
Tabla A-6: Especificaciones de la antena R&S HL007A2	69
Tabla A-7: Especificaciones de la antena R&S HL033	71
Tabla A-8: Especificaciones de la antena R&S HL223	72
Tabla A-9: Especificaciones de la antena SAS 512-2	73
Tabla A-10: Especificaciones de la antena SAS 515.....	74
Tabla A-11: Especificaciones de la antena SAS 521-2.....	75
Tabla A-12: Especificaciones del sistema de antenas AS 2x SYA 406 TETRA	76
Tabla A-13: Interfaces del equipo S7000.....	78
Tabla A-14: Características generales del equipo S7000.....	78
Tabla A-15: Interfaces del equipo HD Ranger 2 ATSC	79
Tabla A-16: Características generales del equipo HD Ranger 2 ATSC	79
Tabla A-17: Principales interfaces del Equipo ETL.....	80
Tabla A-18: Características generales sin opciones del equipo ETL	80
Tabla A-19: Características de las opciones de batería y fuente de DC para el ETL.....	80

Tabla A-20: Interfaces del equipo FSH3-TV	81
Tabla A-21: Características generales del FSH3-TV.....	81
Tabla A-22: Características del equipo Cortex.....	82
Tabla A-23: Características del equipo R&S IQR100.....	82
Tabla A-24: Características del equipo IQC5000B	83
Tabla A-25: Características de la plataforma COM-3011	84
Tabla A-26: Características del equipo USRP X310.....	84
Tabla A-27: Características de la plataforma Noctar.....	85
Tabla A-28: Especificaciones de los analizadores de espectro	85
Tabla A-29: Especificaciones técnicas de los analizadores de espectro	85

Lista de abreviaturas

ARIB: Association of Radio Industries and Businesses

ATSC: Advanced Television Systems Committee

BER: Bit Error Rate

C/N: Carrier to Noise Ratio

CIR: Channel Impulse Response

COFDM: Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing

DOCRs: Digital On-Channel Repeaters

DTMB: Digital Terrestrial Multimedia Broadcast

DTV: Televisión Digital

DVB: Digital Video Broadcasting

DTxTs: Distributed Transmitters

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FCC: Federal Communications Commission

FEC: Forward Error Correction

GPS: Global Positioning System

HDTV: Televisión de alta definición

ISDB: Integrated Services Digital Broadcasting

MER: Modulation Error Ratio

MFN: Multiple Frequency Network

MPEG: Moving Picture Experts Group

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

SDTV: Televisión de definición estándar

SER: Segment Error Rate

SFN: Single Frequency Network

TDT: Televisión Digital Terrestre

UHF: Ultra High Frequency

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

VHF: Very High Frequency

VSF: Vestigial Side Band (modulation)

1 Introducción

Actualmente, en México se está viviendo el cambio de transmisión de televisión analógica a televisión digital, cuya finalización está prevista para el 31 de diciembre de 2015 [1]. La televisión digital tiene múltiples ventajas, como la mejora de la calidad de imagen, mejora de la calidad de sonido, más canales con multiprogramación, y (en algunos casos) la posibilidad de tener interacción con el televisor.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) define en su recomendación BT.1306-7 [2] los estándares que recomienda para adoptarse como sistemas de radiodifusión terrestre de televisión digital. Estos estándares son: ATSC, DVB-T, ISDB-T y DTMB.

Digital Video Broadcasting (DVB-T) es el estándar europeo desarrollado alrededor del año 2000 por diferentes organizaciones públicas y privadas. Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB-T) es el estándar japonés desarrollado por la Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) y fue aprobado en 1998. Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB) es el estándar chino el cual fue aprobado en 2007. Estos tres estándares basan su funcionamiento en la transmisión de señal con una modulación OFDM. Por último, Advanced Television System Committee (ATSC) es el estándar desarrollado en Estados Unidos en 1997, fue desarrollado por diferentes organizaciones de ese país y tiene la característica de transmitir en una sola portadora con una modulación 8-VSB. Todos estos estándares ya fueron adoptados por diferentes países y algunos han desarrollado mejoras. En el caso de México se ha adoptado el estándar ATSC [3].

Actualmente, la mayoría de las transmisiones de radio y televisión se realizan en Redes de Frecuencia Múltiple (MFN), en las cuales se utilizan transmisores en distintas frecuencias para repetir la señal y aumentar el área de cobertura. Una alternativa a esta tecnología es el uso de Redes en Frecuencia Única (SFN), las cuales consisten en utilizar dos o más transmisores para emitir señales simultáneamente en una misma frecuencia cubriendo una región común. El uso de redes SFN tiene ventajas con respecto al uso de redes MFN, por ejemplo, el superar las limitaciones del terreno, tener un uso más eficiente del espectro radioeléctrico y contar con niveles de potencia más uniformes a lo largo del área de cobertura, sin embargo, el uso de una sola frecuencia origina un entorno con multirayectos, lo cual dificulta la recepción.

La mayoría de los casos de pruebas e implementación de redes SFN en televisión digital terrestre se han aplicado con estándares cuyo esquema de modulación es OFDM, el cual involucra el uso de multiportadoras, lo que mitiga el efecto de los multirayectos. Sin

embargo, para el estándar ATSC, no existen muchos casos de su implementación con redes SFN, por la dificultad de operar en entornos con alto multitrayecto, debido a que el estándar es de portadora única.

1.1 Justificación

La aplicación de Redes en Frecuencia Única con el estándar ATSC es posible adecuando los receptores a lidiar con las condiciones de multitrayecto de este ambiente y/o haciendo una planificación eficiente de la red de transmisión. Para esto, es necesario hacer un análisis de recepción en un entorno SFN–ATSC y así obtener los parámetros adecuados para obtener una buena recepción. Para la realización de este estudio es necesario contar con un sistema de equipamiento capaz de recibir, almacenar y analizar medidas de señales SFN-ATSC.

Por esta razón, esta tesis está enfocada en proponer un sistema de captura de medidas que cumpla con los requerimientos para medir señales SFN-ATSC, con el cual se puedan realizar los estudios requeridos en este entorno de recepción.

1.2 Objetivos

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de esta tesis consiste en proponer un sistema que permita la adquisición, medición y almacenamiento de señales de televisión digital con el estándar ATSC en una Red de Frecuencia Única (SFN-ATSC). Para ello se evaluaron y compararon diferentes opciones de equipos comerciales para definir el equipamiento que conformó el sistema de captura de medidas, con el propósito de obtener una propuesta de sistema eficiente.

Para esto, los objetivos particulares de esta tesis son:

- Definir los parámetros de la señal que se deben medir para analizar un entorno SFN-ATSC
- Definir la configuración del sistema de captura de medidas, es decir, las etapas por las que pasaría la señal a analizar.
- Establecer los requerimientos técnicos que deberían cumplir los equipos del sistema de captura de medidas.
- Hacer una búsqueda exhaustiva de los equipos comerciales disponibles para cada una de las etapas definidas para el sistema.
- Evaluar, comparar y seleccionar los equipos que conformarían cada una de las etapas del sistema.
- Presentar la propuesta final del sistema de captura de medidas.
- Presentar una estimación del costo aproximado del sistema propuesto.

1.3 Metodología

Para proponer un sistema de captura de medidas, primero fue necesario conocer las características del estándar ATSC, junto con las de la tecnología SFN. Posteriormente, se estudiaron documentos oficiales para la obtención de los parámetros de señal y el equipamiento recomendado para utilizar en una campaña de medidas de campo. Entonces, se revisaron algunas pruebas de campo realizadas en años pasados en donde se evaluaron estándares de DTV o se hicieron pruebas usando redes SFN. El interés de revisar estas pruebas fue conocer el equipamiento y su configuración utilizados.

El siguiente paso fue definir las etapas que formarían parte del sistema de captura de medidas y los equipos que conformarían cada una de ellas, definiendo los requerimientos técnicos de cada uno.

Posteriormente, se buscaron diferentes equipos comerciales disponibles para cada etapa del sistema, a través de las páginas web de los fabricantes. Se evaluaron y compararon sus características y capacidades técnicas, buscando que cumplieran con los requerimientos definidos; además, como dato complementario, se obtuvo el costo de los equipos. Finalmente, como resultado de la comparación se seleccionaron los equipos que se consideraron más adecuados para formar parte del sistema de captura de medidas y así generar la propuesta final de dicho sistema.

Esta tesis está conformada por cinco capítulos, incluyendo este capítulo.

En el siguiente capítulo se resumen los antecedentes técnicos de los diferentes estándares de televisión digital terrestre, principalmente del estándar ATSC, el cual es el objeto de esta tesis; de la tecnología de redes SFN y de algunas pruebas de campo realizadas anteriormente, en las cuales se probó el desempeño de los estándares de televisión digital o el de redes SFN.

En el capítulo tres se habla sobre los lineamientos técnicos que debe cumplir el equipamiento que sería seleccionado para integrar el sistema de captura de medidas de señales de ATSC en una red SFN, el cual es el producto de esta tesis. Entonces, en el capítulo cuatro se describen, comparan y seleccionan los equipos comerciales que forman el sistema propuesto. Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones de la tesis.

2 *Antecedentes*

Para el desarrollo de esta tesis, enfocada en proponer un sistema de captura de medidas de señales del estándar de televisión digital ATSC en una red SFN, fue necesario conocer las características técnicas tanto del estándar ATSC (Advanced Television Systems Committee), como de la tecnología SFN (Single Frequency Network) para después desarrollar el trabajo de acuerdo a los objetivos y metodología que se plantearon en el capítulo 1.

Entonces, en este capítulo se presenta un resumen de dichos temas, además de una descripción del resto de estándares de televisión digital terrestre existentes hasta ahora y las principales pruebas de campo que se han realizado con redes SFN para televisión digital (DTV).

2.1 Estándares de televisión digital terrestre

Existen diversas formas de transmitir señales de radiodifusión, entre ellas destacan la vía terrestre, por satélite y por cable. A partir de este punto, se hablará solo de la radiodifusión vía terrestre ya que es el caso que nos atañe para esta tesis.

La televisión digital terrestre (TDT) es un sistema de radiodifusión, el cual transmite imágenes en movimiento con audio, a través de varios repetidores terrestres y cuya emisión es digital, lo cual quiere decir que la información es procesada para enviarse en forma de datos binarios y con una modulación digital.

A continuación se mencionan y describen los estándares de televisión digital terrestre que existen actualmente. Primero se describen los estándares DVB-T, ISDB-T y DTMB respectivamente; y posteriormente se aborda con mayor profundidad el estándar ATSC, por ser el que interesa en esta tesis.

2.1.1 DVB-T

Digital Video Broadcasting (DVB) es un proyecto desarrollado en Europa en el año 2000 por un conjunto de organizaciones públicas y privadas, el cual involucra una serie de estándares de difusión, la cual se puede realizar ya sea por cable, satélite, terrestre y para equipos portátiles. DVB-T es el estándar de transmisión terrestre de televisión digital establecido por la ETSI [4]. Este sistema ha sido adoptado oficialmente por casi todo el continente europeo, varios países de Asia, África y Oceanía y muy pocos países en el continente americano.

El estándar DVB se desarrolló con el objetivo de transmitir tanto la señal de televisión de alta definición (HDTV) como la señal de televisión de definición estándar (SDTV).

Este sistema puede tener canales con un ancho de banda de 6, 7 u 8 MHz, y utiliza como esquema de modulación OFDM. Como tecnología de codificación de audio y video utiliza MPEG-2 y para el transporte de datos utiliza MPEG-2 TS.

Posteriormente en el año 2008, se desarrolló una mejora al sistema DVB-T, denominándola como DVB-T2. Este segundo estándar tiene la intención de facilitar los servicios de HDTV y proporcionar más canales en el ancho de banda.

La Figura 2.1 muestra el diagrama de bloques del sistema de transmisión de este estándar. Este sistema tiene como entrada el transport stream MPEG-2 TS. Primero, la señal entra a un aleatorizador de datos, cuyo propósito es aleatorizar la secuencia de bits para evitar largas secuencias de ceros o unos, así la mayor parte de la energía de la señal no se concentra solo en ciertos puntos, y con esto se tiene un espectro plano muy parecido al ruido blanco. Después del aleatorizador está el codificador FEC que utiliza un código Reed-Solomon.

El siguiente bloque es un intercalador de datos, el cual cambia el orden de los datos con el fin de que al ocurrir errores, estos no se encuentren concentrados en ráfagas. Con esto se mejora la capacidad del código corrector de errores.

Después, la información llega a un codificador interno que utiliza un Código Convolutivo Perforado, para después mandarlo a un intercalador interno que incluye el intercalado, tanto de bits, como de símbolos. A continuación, la información pasa al bloque de mapeo, donde los bits se mapean a símbolos QPSK, QAM o 64QAM. Antes de la transmisión se modula con la técnica OFDM, la cual logra una gran robustez contra la dispersión de multitrayectorias en el canal dividiendo la alta tasa de bits en varios canales paralelos, cada uno con una tasa de bits reducida.

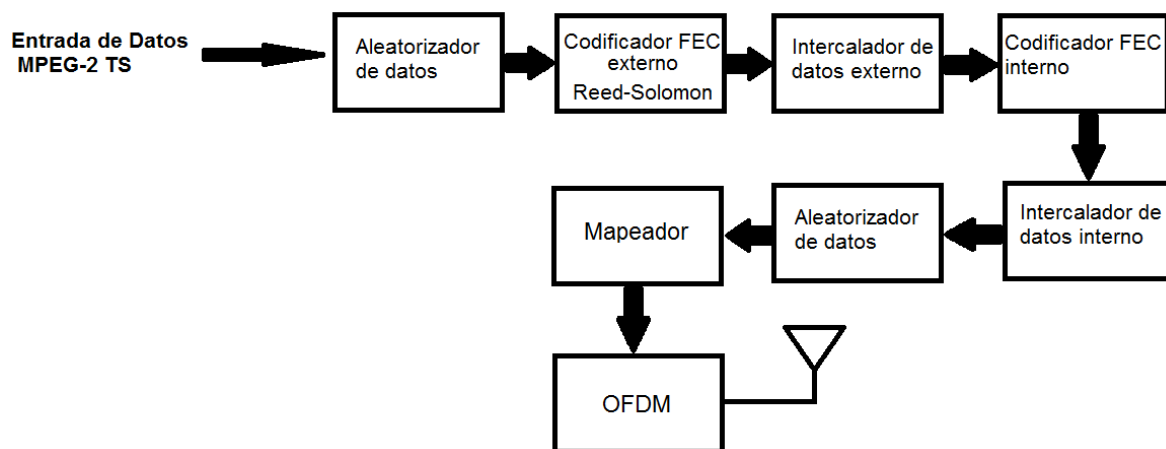


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar DVB-T [5]

2.1.2 ISDB-T

Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB) es el estándar japonés desarrollado por la ARIB. Dentro de la familia de estándares ISDB está ISDB-T para la transmisión de televisión digital vía terrestre, el cual fue aprobado en 1998 y comenzado a utilizar en Japón en el 2003 [6]. El propósito de este estándar es proporcionar audio, video y servicios multimedia, estos se pueden integrar para formar diferentes tipos de contenidos digitales, teniendo desde televisión de baja definición, hasta de alta definición. ISDB-T fue adoptado principalmente por Japón y la mayor parte de América del Sur.

Como códec de video ISDB-T utiliza MPEG-2 y MPEG2 Advanced Audio Coding como códec de audio, mientras que, para el transport stream de datos utiliza MPEG2 TS.

ISDB-T utiliza una variante de OFDM denominada BST-OFDM (Band Segmented Transmission OFDM), la cual divide el ancho de banda disponible en bloques de frecuencia llamados segmentos, que a su vez están compuestos por bloques de frecuencias. BST-OFDM se basa en 13 segmentos donde cada uno de estos puede tener un esquema de codificación o modulación diferente.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar ISDB-T. Primero, el stream de datos MPEG-2 TS se manda a un codificador interno el cual codifica la información con un código Reed-Solomon. Después, la información es dividida en paquetes de 204 bytes, los cuales son ordenados en capas (máximo tres) y se puede optar por el caso de mandar un solo stream. En este punto el procesamiento que se lleva a cabo en cada capa es el mismo, sin embargo, la configuración de los diferentes bloques de cada capa puede cambiar.

Después los datos de cada capa son aleatorizados para lograr una dispersión de la energía de la señal y luego son llevados a un compensador de retardo, que tiene la función de compensar la diferencia del retardo en los diferentes streams.

Posteriormente, los bytes son intercalados utilizando un intercalador convolucional para evitar una concentración de los errores. El siguiente paso es codificar la información con un código convolucional para después pasar a un intercalador de bits y luego mapearlos en símbolos QPSK, 16-QAM o 64-QAM.

Las salidas de las capas llegan a un bloque de síntesis de capa y módulo de conversión de tasa. La función de este bloque es asignar la salida de cada capa a su segmento correspondiente en el esquema BST-OFDM. Luego el stream de datos es intercalado en tiempo y en frecuencia.

Finalmente, los streams de datos son combinados mediante una señal de control para formar símbolos OFDM, que posteriormente serán transmitidos.

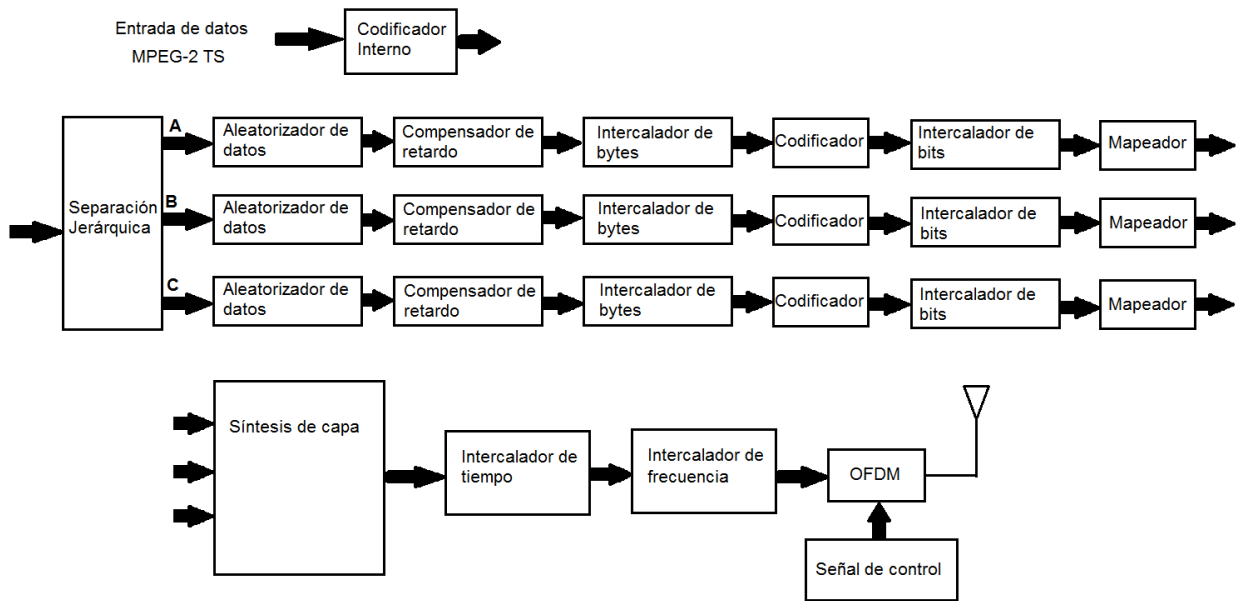


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar ISDB-T [5]

2.1.3 DTMB

Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB) es el estándar de televisión digital de China, aprobado en el año de 2007 y que fue adoptado principalmente por China y Cuba.

MPEG-2 TS es el estándar designado para el transport stream de datos de este estándar [5]. Por otra parte, DTMB utiliza como técnica de modulación OFDM y fue desarrollado para soportar tanto recepción fija, como móvil. DTMB puede ser ocupado en Redes de Frecuencia Única (SFN) o en Redes de Frecuencias Múltiples (MFN).

La Figura 2.3 muestra un diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar DTMB. A dicho sistema entra el stream de datos MPEG-2 TS para, primero, ser aleatorizados con el fin de dispersar la energía que se encuentre concentrada. Luego los datos son codificados con un código Reed-Solomon el cual servirá para la corrección de errores que sucedan en la transmisión.

Posteriormente, los datos pasan a un intercalador de bytes y de ahí pasan a un codificador LDPC (Low Density Parity Check) pudiendo variar la tasa de codificación de $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$. La trama de datos a la salida del codificador LDPC pasa a un intercalador de bits y de ahí se mapea utilizando constelaciones BPSK, QPSK o 16-QAM.

En el bloque de procesamiento de tramas, los datos son multiplexados junto con las portadoras piloto. Las portadoras piloto son usadas en el receptor para la adquirir la sincronización de reloj y estimación de canal. La trama de salida se aleatoriza utilizando una secuencia pseudo-aleatoria para lograr una sincronización rápida y una estimación de canal más precisa. Después esta secuencia es modulada con OFDM.

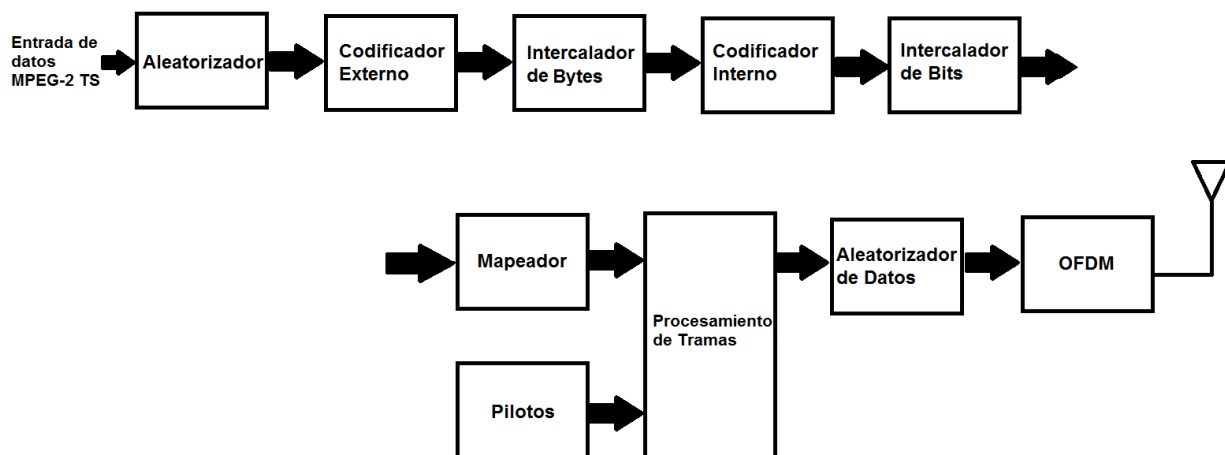


Figura 2.3: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar DTMB [5]

2.2 ATSC

Advanced Television System Committee (ATSC) es el grupo que se encarga de desarrollar los estándares de televisión digital en Estados Unidos, el cual surgió como reemplazo de NTSC (National Television Systems Committee), grupo que se encargaba de desarrollar los estándares de televisión analógica a color. Fue desarrollado por varias organizaciones en Estados Unidos como la Gran Alianza (GA), la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) y el Comité de Sistemas de Televisión Avanzada (ATSC) [7].

En 1997 Estados Unidos adoptó el estándar ATSC para la transmisión de video, audio y datos. Principalmente ha sido adoptado por los siguientes países: Estados Unidos, Canadá, México [3], Corea del Sur, El Salvador y República Dominicana.

2.2.1 Características generales

El sistema ATSC está diseñado para transmitir video y audio de alta calidad y datos sobre un canal con ancho de banda de 6 MHz. Es compatible con 18 formatos de video (tanto de definición estándar como de alta definición, progresivo o entrelazado) de esta forma el estándar ATSC puede transmitir en los 6 MHz una gran variedad de aplicaciones, ya sea un programa en alta definición; un programa en alta definición y otros en definición estándar; varios programas en definición estándar; incluir servicios de datos o realizar diferentes combinaciones de estos servicios.

Para la codificación y compresión del audio y video ATSC emplea los estándares MPEG-2 y “Digital Audio Compression (AC-3)”.

Para emisiones vía terrestre ATSC utiliza una técnica de modulación de una sola portadora conocido como Banda Lateral Vestigial de ocho niveles (8-VSB), alcanzando una velocidad de transmisión aproximada de 19.39 Mbps, mientras que, para transmisiones por cable, se utiliza una modulación 16-VSB alcanzando, velocidades de transmisión

aproximadas de 38 Mbps; ambos modos de transmisión están definidos para un ancho de banda de canal de 6 MHz.

8-VSB permite coexistir transmisiones analógicas y digitales en un mismo canal de televisión.

En la Figura 2.4 se muestra un diagrama básico a bloques del sistema de televisión digital terrestre ATSC.

En el bloque de Múltiplex de servicios y transporte los bits entrantes se dividen en paquetes de información. Para esto ATSC emplea MPEG-2 TS para la asignación de paquetes y multiplexaje del audio, video y datos.

A la salida de este bloque se tendrá la tasa de transmisión de datos de 19.39 Mbps antes mencionada, a continuación la señal pasa al bloque de transmisión en donde la señal pasará por varios procesos para finalmente ser transmitida.

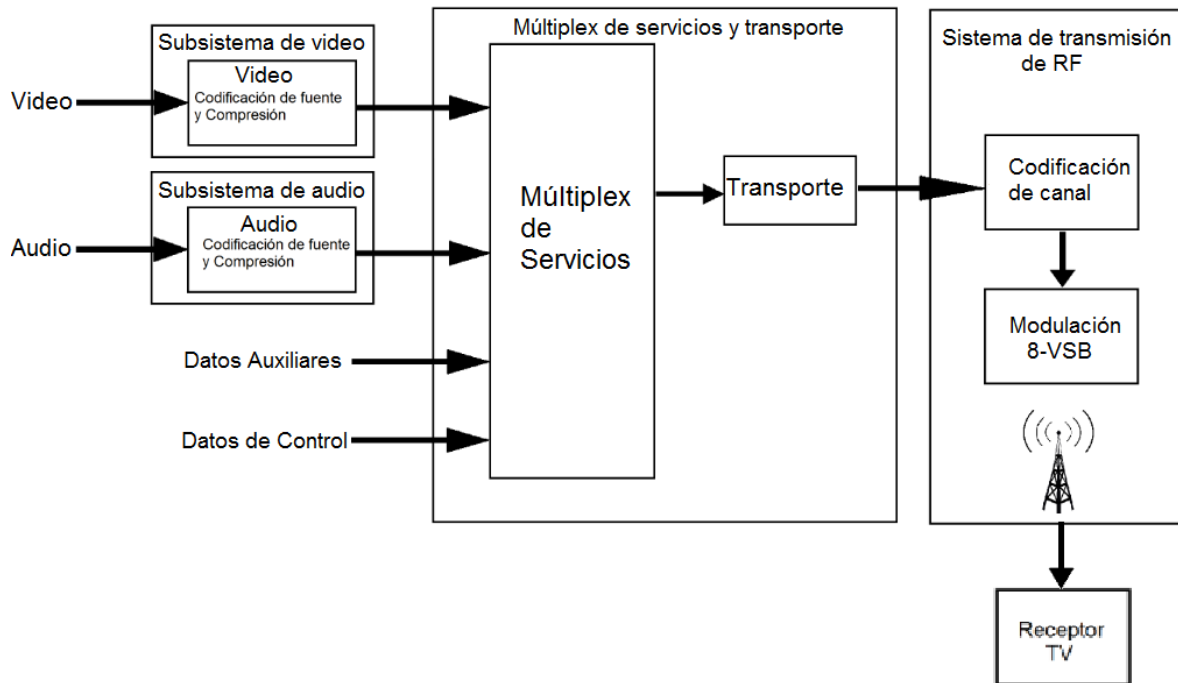


Figura 2.4: Diagrama a bloques del modelo de TDT del estándar ATSC [7]

2.2.2 Bloque de transmisión de RF

En el bloque de transmisión de RF se realiza todo un proceso de codificación de datos para después modular la señal. En la Figura 2.5 se muestra la secuencia de procesos que se realizan en este bloque, los cuales se describen a continuación.

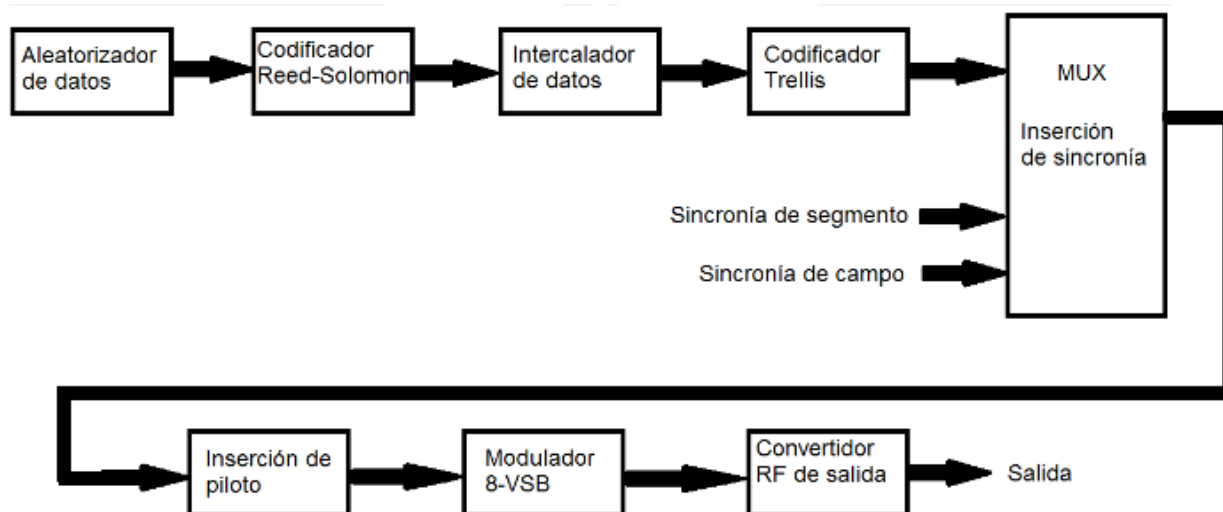


Figura 2.5: Diagrama de bloques del sistema de transmisión del estándar ATSC [8]

Aleatorizador de datos

En este bloque cada byte de la información se modifica basándose en un patrón de números pseudo aleatorio conocido. En el receptor este proceso es invertido para recuperar el valor original de cada byte.

Codificador Reed-Solomon

La codificación de Reed-Solomon es un tipo de técnica de corrección de errores hacia adelante (FEC) la cual se le aplica a la información entrante.

El codificador Reed-Solomon toma los bytes de cada paquete MPEG-2 que entra y los manipula matemáticamente para crear una “etiqueta de identificación” del contenido del paquete, la cual se conforma de 20 bytes adicionales a los bytes de cada paquete y se anexan a la cola de éste. Estos 20 bytes son conocidos como bytes de Reed-Solomon de paridad.

Por otro lado, el receptor debe comparar los bytes del paquete con los 20 bytes de paridad para verificar la validez de los datos que llegaron.

Este tipo de codificación puede corregir hasta 10 bytes erróneos por paquete, en caso de haber demasiados errores de byte en un paquete, el receptor no podrá validar la información ni encontrar otro paquete parecido por lo que desechará la información.

Intercalador de datos

En este punto se intercalan los datos de cada paquete (bytes de información junto con los bytes de paridad). Este proceso se ejecuta como protección ante la pérdida de información, ya que ésta se distribuye en varios paquetes, así en caso de “perder” un paquete en el canal

de transmisión solo se perderá una parte de información, pudiendo el decodificador Reed-Solomon recuperar los datos perdidos.

Codificador Trellis

Este codificador es otro tipo de corrección de errores, solo que a diferencia de la codificación Reed-Solomon, que procesa la información por paquetes, éste es un código que rastrea el flujo de bits a medida que transcurre el tiempo, por lo que es una forma de código convolucional.

En esta codificación cada byte se divide en cuatro palabras de dos bits cada una, y a su vez, cada palabra es comparada con las palabras anteriores. Entonces se genera matemáticamente un código binario de 3 bits, que reemplaza a cada palabra de 2 bits, y así, se transmiten como los símbolos de 8 niveles del 8-VSB.

El codificador Trellis utiliza una relación 2/3, esto se debe a que por cada 2 bits que entran salen 3 bits.

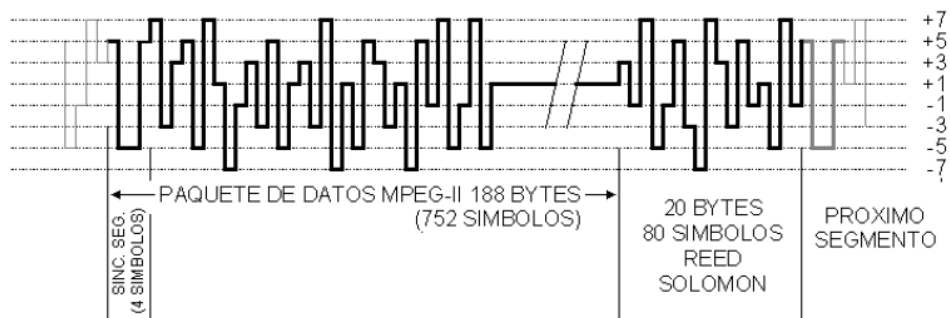
Antes del codificador de Trellis cada segmento de datos tiene 207 bytes, después de pasar por el codificador, el segmento se alarga a 828 símbolos de 8 niveles (véase Figura 2.6).

En la parte del receptor, la contraparte del codificador Trellis es el decodificador Viterbi.

Inserción de sincronía

Para ayudar al receptor a demodular correctamente la señal recibida se insertan señales de sincronización. Las dos señales que brindan sincronía son las sincronías de segmento y de campo.

La sincronía de segmento es un pulso de cuatro símbolos el cual se agrega al comienzo de cada segmento de datos, por lo que aparece cada 832 símbolos y toma la forma de un pulso positivo-negativo-positivo. La Figura 2.6 ilustra este tipo de sincronía en el segmento de datos de banda base ATSC.



NOTE: 4 SIMBOLOS POR BYTE

Figura 2.6: Sincronía de segmento en el segmento de datos de banda base [8]

La sincronía de campo es todo un segmento que se repite cada 313 segmentos, estos 313 segmentos de datos forman un campo de datos por lo que esta sincronía se repite una vez cada campo.

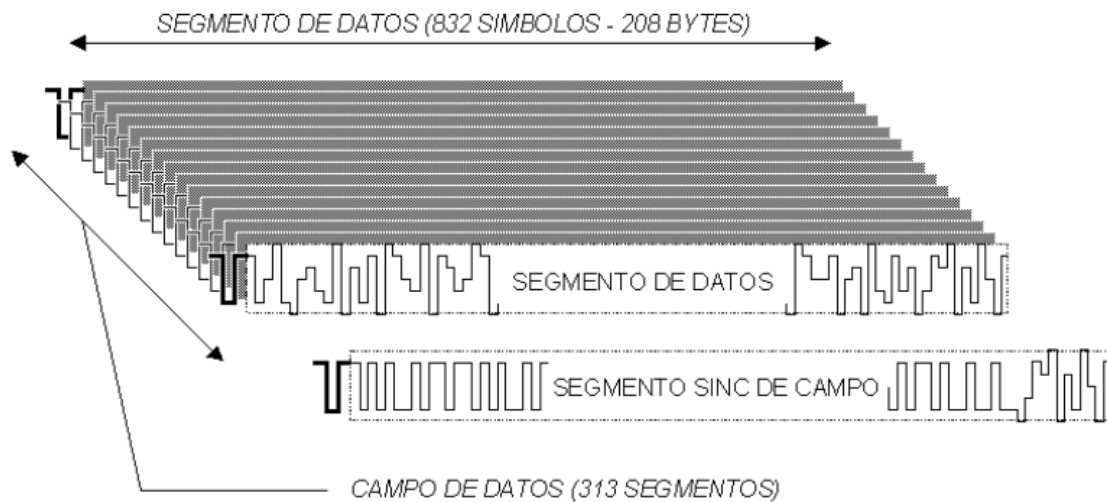


Figura 2.7: Sincronía de campo en el campo de datos de banda base [8]

El patrón de la sincronía de campo se conforma de símbolos conocidos de la forma de pulsos positivos-negativos repetitivos.

Inserción de piloto

Antes de la modulación, a la señal de 8 niveles se le agrega un offset de corriente directa, el cual hará que aparezca una portadora en la frecuencia cero. Esta es la portadora piloto de la señal ATSC.

Esta piloto hace que el circuito PLL del receptor tenga de donde engancharse independiente de los datos transmitidos.

Modulador 8-VSB

En este punto, la señal llega en banda base con ocho niveles, sincronías y un offset de corriente directa de la portadora piloto. Esta señal es modulada en amplitud sobre una portadora de frecuencia intermedia, generando un espectro de AM con la portadora en el centro y a sus costados las bandas laterales. Utilizando un filtro se elimina casi por completo la banda lateral inferior reduciendo el espectro de la señal.

Después de agregar los datos auxiliares FEC, las sincronías y la codificación Trellis, la tasa de datos pasa de 19.39 Mbit/seg a 32.28 Mbit/seg a la salida del codificador Trellis. Por lo tanto la tasa de símbolos resultante es de $32.28/3$ (ya que tres bits son transmitidos en cada símbolo) lo que resulta igual a 10.76 Msímbolos/seg. Entonces, mediante el teorema de

Nyquist¹ se observa que el ancho de banda mínimo resulta ser de $(\frac{1}{2}) * (10.76 \text{ Msímbolos/seg}) = 5.38 \text{ MHz}$. Al tener un canal de 6 MHz se puede aprovechar el espacio sobrante para realizar un filtrado menos brusco.

Finalmente, resulta la señal modulada en 8-VSB cuyo espectro se muestra en la Figura 2.8.

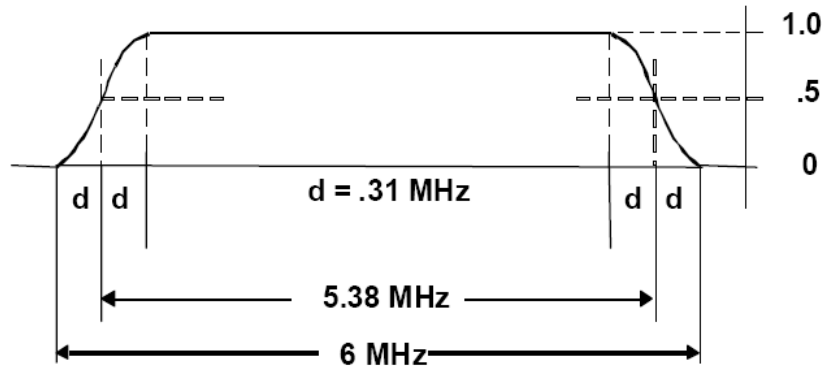


Figura 2.8: Espectro de una señal 8-VSB

La Figura 2.9 ilustra la constelación de una señal 8-VSB, la cual se conforma de 8 líneas verticales sobre el eje I (en fase) por lo que no se utiliza el eje Q (cuadratura).

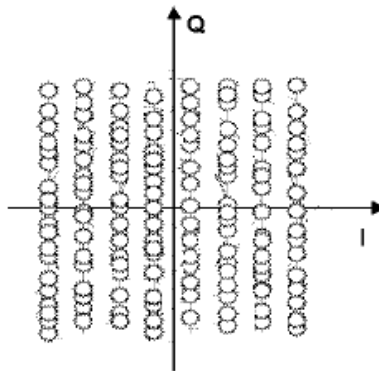


Figura 2.9: Constelación de una señal 8-VSB

Convertidor RF de salida

En este punto la señal 8-VSB se encuentra en frecuencia intermedia (FI), entonces, se realiza una conversión mediante circuitos para convertirla en la frecuencia del canal asignado, para finalmente, ser transmitida.

¹ Teorema de Nyquist: $F_s \geq 2 * F$. Indica que la frecuencia de muestreo debe de ser mayor o igual al doble del ancho de banda de la señal.

Con esto, la frecuencia de la señal debe ser como máximo $\frac{1}{2} * F_s$.

2.3 Redes SFN

La tecnología de redes SFN consiste en utilizar dos o más transmisores para emitir señales con información idéntica en una misma frecuencia cubriendo una región común [9]. Con esto se aprovecha el espectro electromagnético de una forma más eficiente, en comparación con las redes MFN (Multiple Frequency Network) en donde cada transmisor emite señales en diferentes frecuencias, por lo tanto, al tener N transmisores para una cierta área de cobertura, se requerirán N frecuencias para transmitir la información.

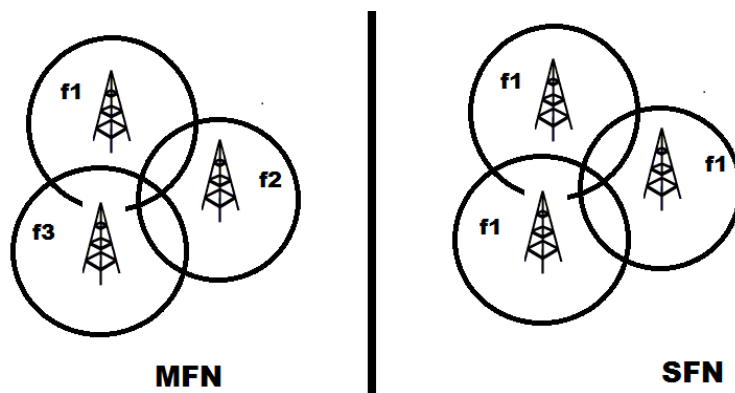


Figura 2.10: Redes MFN y SFN

Ventajas:

- Uso más eficiente del espectro radioeléctrico
- El obtener niveles de señal uniformes a lo largo del área de cobertura, es decir, en el área de cobertura la señal tendrá menos variaciones en su nivel de amplitud, en comparación con una MFN
- El poder superar las limitaciones del terreno, ya que se pueden cubrir áreas con un nivel bajo de señal o incluso que estén siendo obstruidas
- Proveer una mejor recepción en interiores

Limitaciones:

- Interferencia entre señales de los transmisores de la red
- Se requiere sincronización de tiempo
- Es necesario tener una alta precisión de frecuencia de transmisión

2.3.1 Redes SFN en Televisión Digital Terrestre

En los diferentes estándares de TDT existen dos métodos para modular la información, estos son OFDM y 8-VSB, ambos son la clave para la implementación de redes SFN.

OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) basa su funcionamiento en separar el flujo de bits de información en un gran número de portadoras. Gracias a esto

la señal puede superar ciertas degradaciones que el canal de transmisión impone como lo son las multitrayectorias [10]. Las multitrayectorias son provocadas por las reflexiones y refracciones de la señal en distintos objetos como lo son automóviles, edificios o montañas, así las diferentes señales reflejadas llegarán al receptor con un retardo. El efecto que causan estas multitrayectorias es un desvanecimiento en frecuencia de la señal, y además, al tratarse de señales que se reciben con diferentes retardos también causan interferencia inter-simbólica “ISI”.

En la Figura 2.11 se observa cómo afecta el desvanecimiento en frecuencia de una señal utilizando una sola portadora.

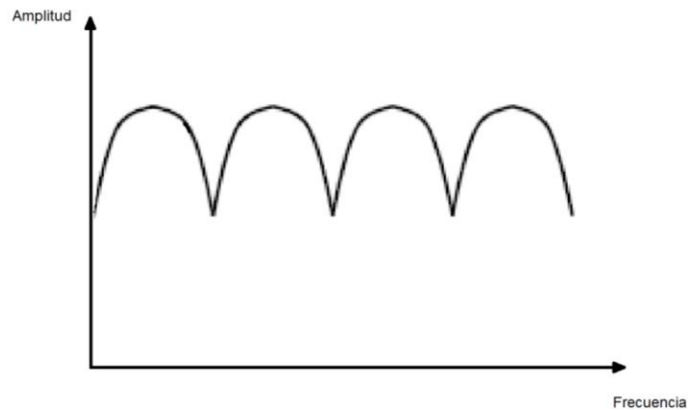


Figura 2.11: Desvanecimiento en frecuencia de una señal con una sola portadora

Al utilizar miles de portadoras, estos desvanecimientos afectarán solo a unas cuantas de ellas, y el receptor podrá recuperar suficiente información libre de error para poder formar el flujo de datos original.

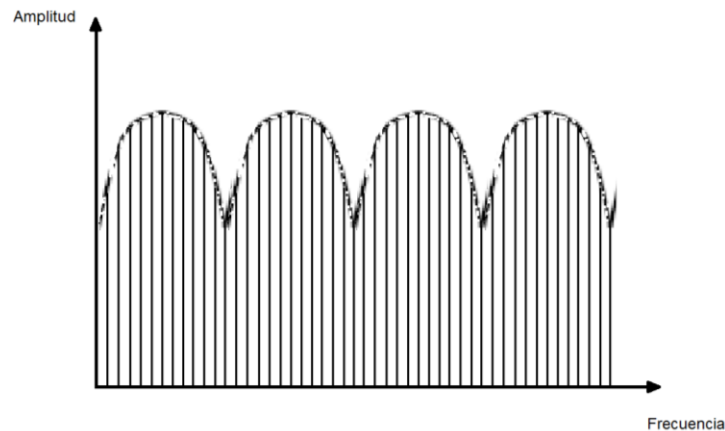


Figura 2.12: Desvanecimiento en frecuencia de una señal con multiportadoras

Además al tener una longitud de símbolo más larga, y con ayuda de un intervalo de guarda, OFDM elimina la interferencia inter-símbolo que se ocasiona al tener ecos en la recepción.

Si el flujo de datos es codificado, entonces, la modulación pasa a llamarse COFDM. Por eso es que al utilizar una modulación OFDM permite implementar redes SFN.

Este tipo de modulación está implementada en todos los estándares de TDT que se describieron en el punto 2.1, exceptuando al estándar ATSC, cuyo tipo de modulación utilizado es 8-VSB (con una sola portadora). Esta es la razón técnica por la que la implementación del estándar ATSC en redes SFN es menos eficiente comparado con OFDM y el desempeño del sistema está más comprometido en ciertos escenarios de recepción. Sin embargo esta implementación es posible teniendo un ecualizador adaptivo en los receptores [11]. Dicho ecualizador va a recibir las señales provenientes de varios transmisores, además de las multitrayectorias impuestas por el entorno de recepción, tratándolas como ecos de la señal dominante, y posteriormente extraerá la información.

Por su parte, la ATSC en su recomendación A/111 [11] menciona que en una red SFN existen dos tipos de elementos: Repetidores Digitales En La Misma Frecuencia (DOCRs) y Transmisores Distribuidos (DTxTs).

Los DOCRs tienen la función de recibir la señal proveniente del transmisor principal, procesarla y retransmitirla en la misma frecuencia en que se recibió. Tienen la ventaja de que no necesitan de un enlace al estudio, sin embargo, tienen la problemática de que al tener la misma frecuencia de transmisión que el transmisor principal, en el receptor, la señal de el transmisor principal actuará como un pre eco de la señal del repetidor.

En el caso de los DTxTs, la señal la obtienen mediante un enlace por separado; éste puede ser de fibra óptica, enlace satelital, microondas, etc., luego transmiten la señal a una cierta frecuencia. Todos los transmisores bajo esta configuración de red deben de estar sincronizados para poder emitir la misma señal al mismo tiempo, por esto, cada transmisor necesita un GPS u otro medio de sincronización.

Mientras que los repetidores son efectivos cuando hay un bloqueo total de la señal, los transmisores distribuidos pueden operar bajo condiciones de un bloqueo parcial de la señal. En la tabla 2.1 se muestra la comparación de estas dos configuraciones.

Configuraciones de SFN	Transmisores Distribuidos	DOCR's
Complejidad/Costo	Alto	Bajo
Requiere enlace de conexión	Si	No
Capacidad de ajuste de retardo	Si	No
Nivel de potencia de salida	Sin límite	Bajo / Moderado
Número de canales de DTV requeridos	Uno	Uno
Implementación recomendada	Áreas grandes de SFN	Cobertura de áreas pequeñas

Tabla 2.1 Comparación entre Transmisores distribuidos y DOCR's [11]

2.4 Equipamiento utilizado en pruebas de campo con TDT

Aquí se describen algunas pruebas de campo realizadas para TDT y se hace un enfoque más detallado en el equipamiento que se utilizó además de la configuración de este.

En [12] se menciona un sistema móvil para realizar medidas de cobertura para señales de redes ATSC. Para este sistema, se utilizaron 4 antenas omnidireccionales con 0 dBi de ganancia, una antena direccional LP (Log Periodic) calibrada, 5 analizadores de señales, un GPS y una computadora de control, además, de una camioneta, donde todo este equipo fue montado para realizar las medidas.

Los analizadores tienen la capacidad de medir el SNR, CIR (Channel Impulse Response) y las constelaciones con demodulación de video simultánea. Todos los analizadores se conectaron con la computadora vía Ethernet.

La Figura 2.13 nos muestra la estructura del sistema de medición que utilizaron en estas pruebas.

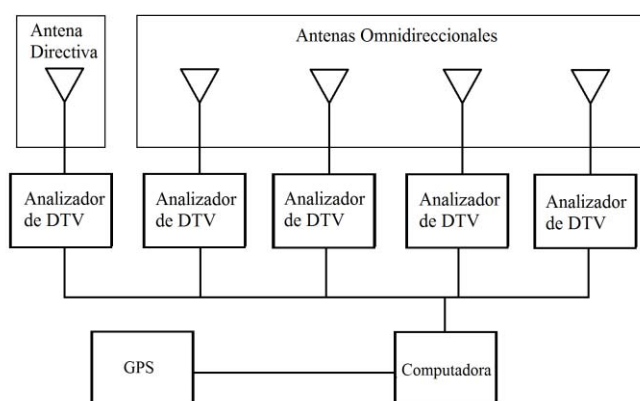


Figura 2.13: Estructura del sistema de medición [12].

Con este sistema se realizaron mediciones para localizar brechas de cobertura.

En el 2002 se realizaron pruebas de campo para el estándar ATSC en Taiwan [13], en las cuales el sistema que se utilizó para recibir y analizar las señales fue compuesto por una antena direccional Log Periodic, con una banda de frecuencias de 200 MHz a 1 GHz; un receptor prototipo de la marca Zenith para demodular y decodificar señales DTV, dos monitores, un analizador de espectros de la marca Tek modelo 2715, un generador de ruido para determinar el umbral de visibilidad, un filtro paso banda para filtrar señales no deseadas y, un sintonizador NTSC; además, como accesorios se utilizaron, un atenuador para evitar una sobrecarga proveniente de señales muy fuertes, un amplificador, un combinador y un divisor. En la Figura 2.14 se muestra el diagrama del sistema.

Las pruebas se hicieron para medir las características de recepción de señales de ATSC, y por otra parte, para hacer una comparación con la recepción de señales de NTSC.

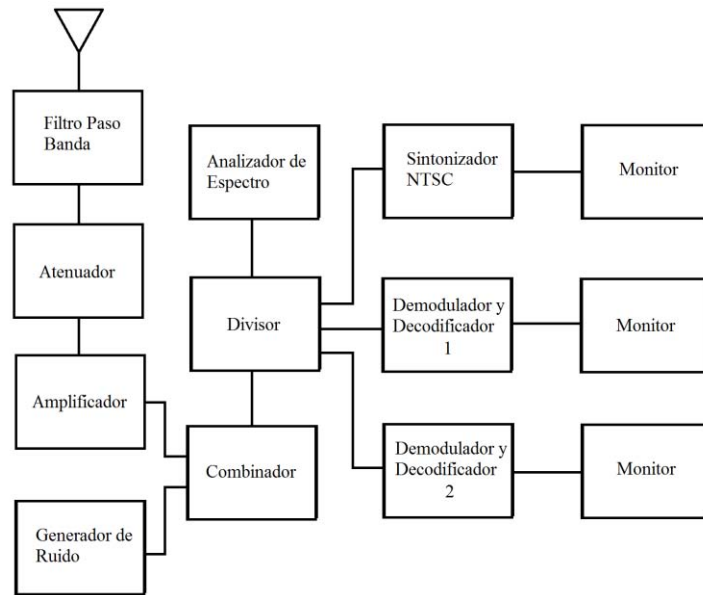


Figura 2.14: Diagrama del sistema de mediciones para analizar el estándar ATSC en campo [13].

En el 2012 se realizaron pruebas de campo en Brasil [14], en las cuales se midieron los niveles de señal generados por una red SFN conformada por dos transmisores utilizando el estándar ISDB-T. En estas pruebas se utilizó como equipamiento un par de antenas receptoras, una directiva y otra omnidireccional, un amplificador de bajo ruido, un analizador de señales, un receptor digital, un monitor, un receptor GPS y una unidad móvil en donde todo fue montado. Como especificaciones del equipo, en [14] solo se menciona que dicho analizador de señales fue el modelo MS8901 A de la marca Anritsu.

A continuación se muestra el diagrama del sistema de recepción utilizado (figura 2.15).

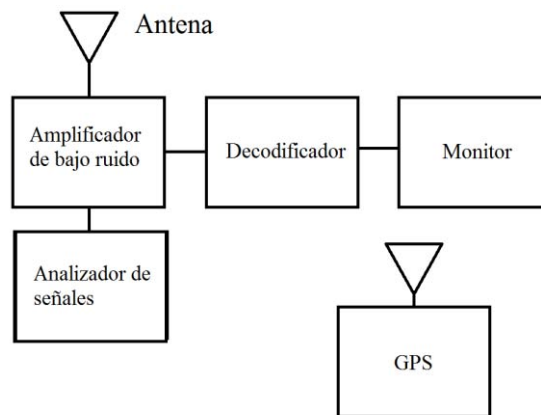


Figura 2.15: Diagrama del sistema de mediciones [14].

En el 2010 se realizaron pruebas de campo en Costa Rica [15] para evaluar el desempeño de los estándares de televisión digital ATSC, ISDB-Tb y DVB-T, y con esto, realizar la transición de televisión analógica a televisión digital terrestre.

Para las pruebas de campo se utilizaron los siguientes equipamientos: una antena direcciva tipo yagi con una ganancia de 10 dBi, un decodificador marca Samsung para el estándar ATSC, un decodificador marca SEMP para el estándar ISDB-T, un decodificador marca Gigaset para el estándar DVB-T, una pantalla de televisión marca Panasonic, un medidor de intensidad de señal marca Leader, un analizador de espectros marca IFR, un grabador de video marca Panasonic y una cámara fotográfica marca Sony.

De estas pruebas no se menciona o ilustra la configuración del sistema.

Por las fechas del 2002 al 2003 se realizaron pruebas de campo en las ciudades españolas de Madrid y de Bilbao con el objetivo de caracterizar la recepción portátil de televisión digital terrestre con modulación COFDM, analizando las variaciones de la señal recibida en redes SFN [16].

El equipo utilizado en dichas pruebas fue el siguiente: un vehículo donde se montó el sistema; una antena omnidireccional para las frecuencias UHF con ganancia de -7.5 dBi y montada a 2.3 metros encima del vehículo; un atenuador variable, un filtro paso banda y un amplificador de bajo ruido; un receptor profesional COFDM, un decodificador MPEG, un analizador vectorial de señales, un receptor de televisión comercial, una computadora con un software diseñado específicamente para el sistema, un osciloscopio y un receptor GPS.

La figura 2.16 muestra la configuración de este sistema.

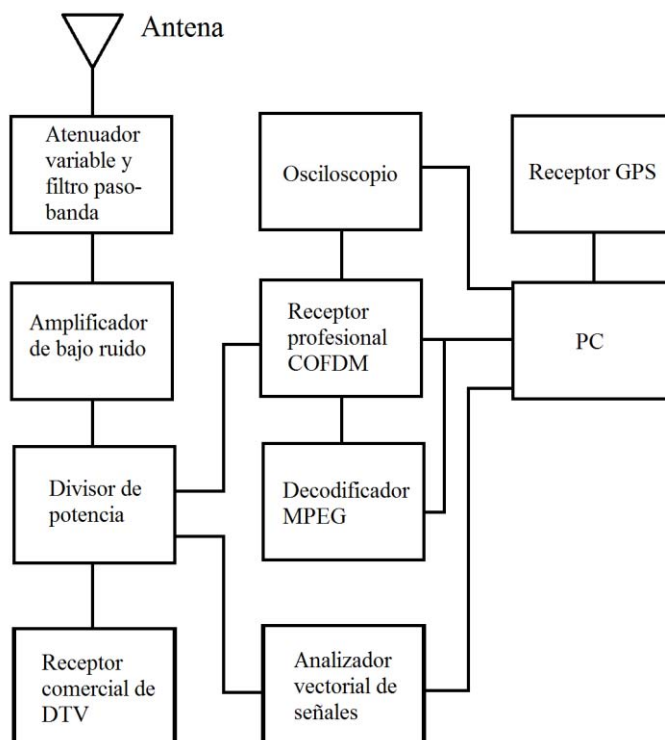


Figura 2.16: Diagrama del sistema para mediciones de COFDM en SFN [16].

3 Lineamientos del sistema de captura de medidas

Para definir los elementos que deberá tener el sistema de captura de medidas de televisión SFN-ATSC, además de sus características y requerimientos, se tomaron en cuenta las recomendaciones realizadas por ATSC y la UIT en lo que se refiere a la recepción de señales ATSC y a mediciones en campo de señales de DTV. Con esto se busca proponer un diseño del sistema de captura de medidas útil y confiable, minimizando posibles errores en la adquisición y almacenamiento de la información de las señales capturadas en campo.

Al probar una red SFN se recibirán varias señales, por lo que se tuvo en cuenta la capacidad del sistema de poder analizar la relación entre dichas señales con la respuesta impulsional del canal.

En este capítulo se mencionan los lineamientos que sirvieron para definir las características del sistema de captura de medidas.

3.1 Parámetros importantes para el análisis de señales ATSC

En el análisis de las señales de TDT existen parámetros relevantes que nos brindan información útil para obtener los resultados y conclusiones pertinentes, por lo que, el sistema de captura de medidas debe incluir equipamiento con la capacidad de monitorear, almacenar y desplegar dichos parámetros para el estándar de TDT respectivo. Específicamente, para el estándar ATSC se tienen la Recomendación A/74 [17] y la Recomendación A/54[18], las cuales especifican los lineamientos de desempeño que debería cumplir un receptor ATSC para conseguir una buena recepción de la señal y el uso del estándar de televisión digital, respectivamente. Por lo tanto, de estos documentos se obtuvieron algunos parámetros de la señal que se deberán desplegar en el sistema de captura de medidas.

Por otro lado, la UIT tiene el Informe UIT-R BT.2035-2 [19], en el cual se mencionan los lineamientos para realizar la evaluación de la transmisión de TDT. De este otro documento se obtuvo un conjunto de parámetros recomendados (en este caso por la UIT) a obtener al momento de evaluar señales de TDT.

Con base en la revisión de estos documentos se plantearon los requerimientos generales del equipamiento del sistema de captura de medidas. Es decir, con esto se busca que la propuesta del sistema de captura tenga la capacidad de proveer los datos necesarios para hacer el análisis del desempeño del estándar ATSC en una red SFN.

3.1.1 Recomendaciones ATSC

El estándar ATSC recomienda ciertos criterios mínimos para la buena recepción de la señal. Estos criterios corresponden a los valores mínimos de los parámetros de la señal ATSC, entonces, el equipamiento del sistema de medidas debería tener la capacidad de recibir y monitorear valores de estos parámetros por debajo de los mínimos recomendados para que, posteriormente, se pueda realizar un análisis completo de la señal recibida, y por lo tanto, del desempeño del estándar ATSC.

De acuerdo a la Recomendación A/74, un receptor de DTV no debe de tener más de 3×10^{-6} de Bit Error Rate (BER) en el transport stream para los niveles de la señal de entrada de RF directamente del sintonizador de -83 dBm a -5 dBm para las bandas de frecuencia VHF y UHF. Asimismo, en dicho documento un nivel de señal de -68 dBm es designado como “débil”, sin embargo, esto no significa que sea el límite inferior de las señales recibidas. El nivel de -68 dBm ha sido utilizado históricamente como un punto de prueba para señales NTSC con un bajo nivel relativamente, y se considera como un punto de prueba conveniente para receptores de televisión digital [17].

Por otro lado, la Recomendación A/54 establece como parámetro de calidad de recepción una relación C/N de aproximadamente 14.9 dB, en este punto la recomendación menciona que se obtiene una tasa de segmentos en error (SER) de 1.93×10^{-4} , la cual corresponde al Umbral de Visibilidad (TOV), que fue establecido por mediciones de ocurrencia de errores. En la siguiente figura se observa la probabilidad del segmento en error.

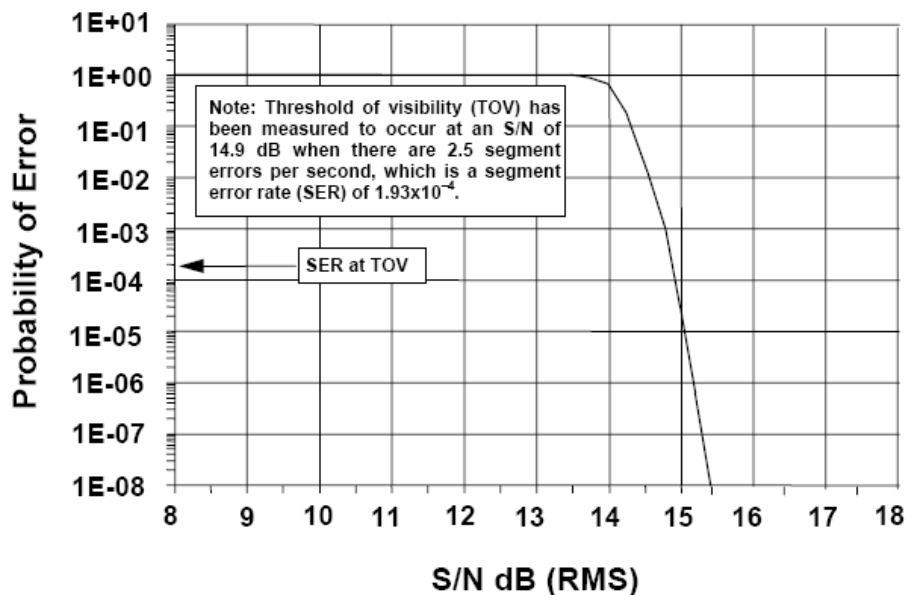


Figura 3.1: Probabilidad de segmento en error [18]

El escenario de recepción más básico que puede caracterizar a la recepción en una red SFN, si ésta se compone de dos transmisores, es la presencia de la señal útil (transmisor

principal) y un eco estático de ésta (segundo transmisor). La Recomendación A/74 especifica los límites de amplitud y de retardo del eco, respecto de la señal principal, que debería tolerar todo receptor de ATSC, y por lo tanto, presentar una buena recepción. Estos valores no son absolutos, sino lo que se ha observado frecuentemente en pruebas de campo. La respuesta al impulso de un canal con estas condiciones va del rango de los $-30 \mu\text{s}$ (pre eco) hasta los $+40 \mu\text{s}$ (post eco), cuyas amplitudes van decreciendo conforme el retardo es mayor, sin embargo, en algunas condiciones se ha llegado a observar un retardo del eco del orden de los $100 \mu\text{s}$ [17]. En la tabla 3.1 se muestra la magnitud de la respuesta al impulso del canal con un eco de señal, ante la cual el receptor debería ser capaz de operar correctamente.

Retardo del eco [μs]	Amplitud [dB]
-40	-15
-30	-7
-20	-7
-15	-5
-10	-3
-5	-0.5
5	-0.5
10	-1
15	-1
20	-2
30	-3
40	-4
50	-15

Tabla 3.1: Desempeño recomendado de un receptor de DTV (en 2010) en presencia de un eco estático de la señal útil [17].

Este desempeño se observa de una forma gráfica en la figura 3.2.

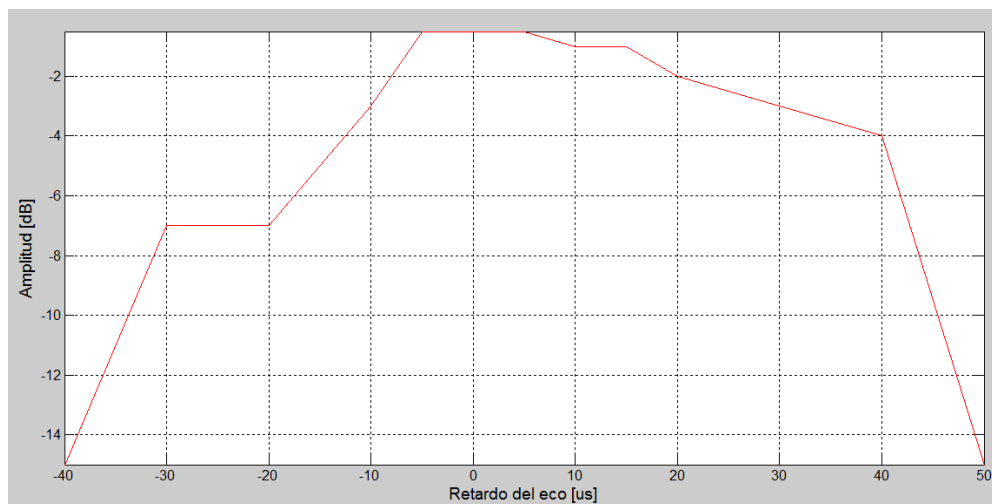


Figura 3.2: Gráfica del desempeño recomendado de un receptor de DTV en presencia de un eco estático.

Estos valores obtenidos de la Recomendación A/74 sirvieron para referenciar los valores de retardo y amplitud comunes en un entorno de SFN, de esta forma el sistema de captura de medidas debe tener la capacidad de trabajar y desplegar, por lo menos, estas referencias y con esto cumplir con la tarea de evaluar redes SFN.

3.1.2 Informe UIT-R BT.2035-2

La UIT emitió el Informe UIT-R BT.2035-2, en el cual se mencionan las características a tomar en cuenta para la evaluación de sistemas de radiodifusión terrena, con el fin de que al momento de realizar un análisis y conclusiones de las pruebas sean comprensibles.

Entonces, la UIT recomienda obtener el siguiente conjunto de datos al realizar la medición del servicio de radiodifusión:

- Intensidad de campo
- Umbral de ruido
- Ruido añadido hasta que se alcanza el TOV
- Relación C/N
- Margen calculado hasta el umbral
- Bit Error Rate (BER) o Segment Error Rate (SER)
- Perfil de retardo (respuesta al impulso del canal)
- Valores de las derivaciones o ramas del ecualizador y energía
- Ubicación detallada de la antena
- Descripción detallada de la antena, incluyendo su polarización
- Orientación de la antena
- Calibración del sistema de medida
- Detalles del emplazamiento (coordenadas geográficas)
- Hora del día
- Descripción del edificio en el que se hacen las medidas o alrededor del que se hacen éstas
- Naturaleza de la zona inmediatamente circundante a la antena

De estos datos se subrayan los parámetros que se consideraron con mayor relevancia para obtener en pruebas de campo, y que por lo tanto, se tomaron en cuenta para definir los elementos del sistema de captura propuesto en esta tesis.

3.1.3 Otros parámetros de señales ATSC

Para analizar las características de la recepción de la señal ATSC hay ciertas mediciones que deberían realizarse en campo. En [10] recomienda tener las siguientes mediciones.

El estándar ATSC tiene dos métodos de corrección de errores, estos son la codificación Reed-Solomon y la codificación convolucional, por lo que hay tres BER que pueden medirse:

- BER antes del decodificador Viterbi.
- BER después del decodificador Viterbi o antes del decodificador Reed-Solomon.
- BER después del decodificador Reed-Solomon.

La BER del canal está representada por la BER antes de Viterbi, y es la más relevante de todas, posteriormente la BER después de Viterbi es derivada de la BER antes de Viterbi. La BER después de Reed-Solomon indica los errores de bit no corregibles, que suceden cuando más de 10 errores de bit ocurren en un bloque codificado Reed-Solomon dentro del paquete del transport stream. Véase la figura 3.3.

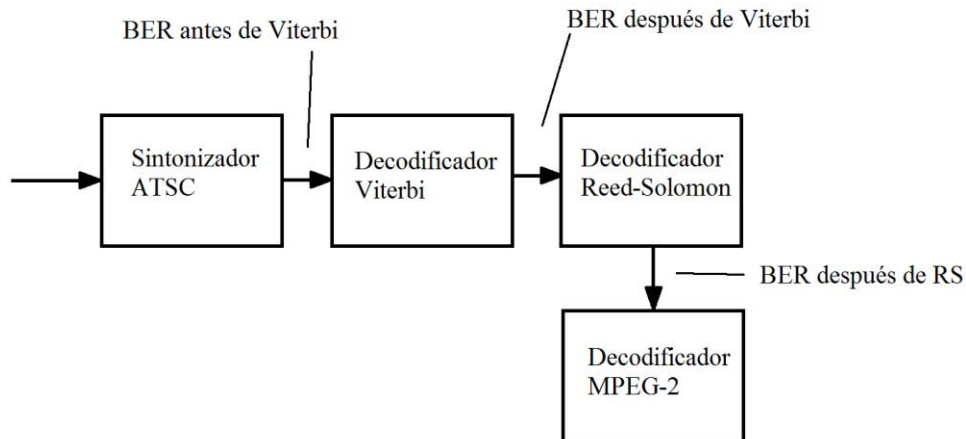


Figura 3.3: BER en ATSC [10]

Ciertas mediciones deben ser realizadas por medio de un analizador de espectro, éstas son:

- Respuesta en frecuencia (figura 3.4)
- Atenuación de hombros (figura 3.4),
- Amplitud de la portadora piloto y las armónicas.
- Diagrama de constelación (figura 3.5), el cual ayuda a observar el deterioro de la señal debido al ruido.

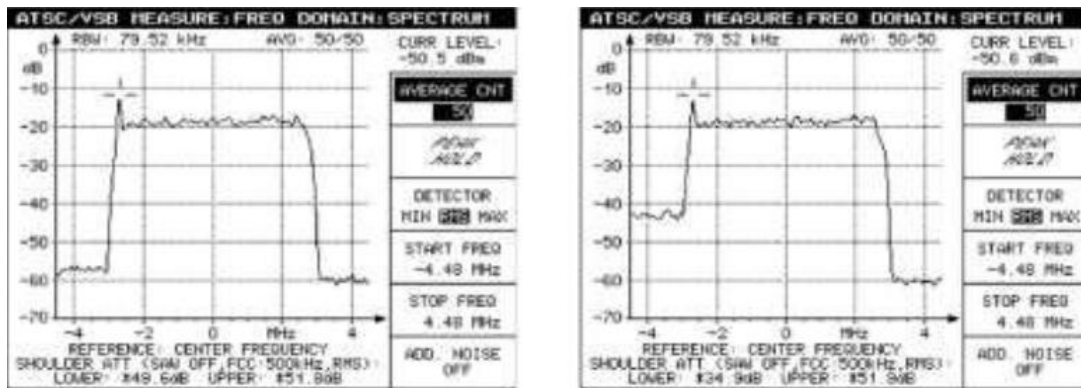


Figura 3.4: Espectro de una señal 8 VSB. En la figura del lado derecho se observa una mala supresión de la banda lateral [10]

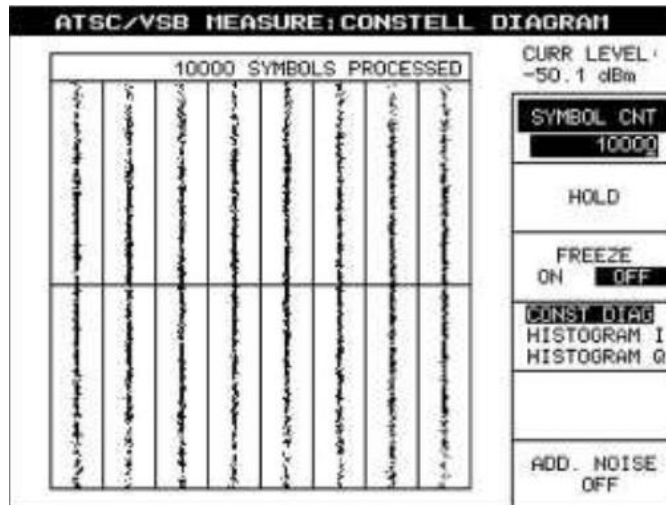


Figura 3.5: Diagrama de constelación de una señal ATSC [10].

Finalmente, otros parámetros importantes a considerar son la relación S/N, la convulsión de fase (o jitter), la tasa de símbolo, la tasa de error de modulación (MER); y al tratarse de una red SFN es importante el poder observar la respuesta al impulso del canal (figura 3.6).

La respuesta al impulso del canal muestra de forma gráfica en el dominio del tiempo las señales recibidas, dentro de las cuales está la señal principal junto con señales retardadas o adelantadas también llamadas post eco y pre eco respectivamente, además de la amplitud con que son recibidas. Un ejemplo se ilustra en la figura 3.6.

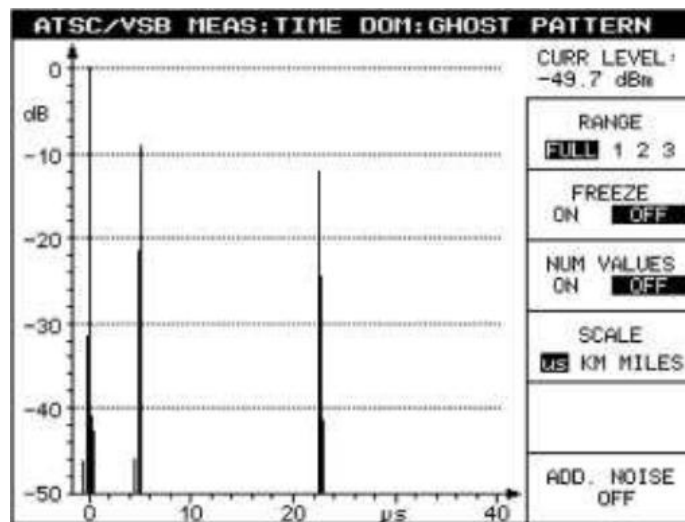


Figura 3.6: Respuesta al impulso del canal [10].

El MER (Modulation Error Ratio) nos dice que tan bien llega la señal digital. Resume todos los errores que se pueden medir en el diagrama de constelación, cada que hay algún tipo de error se calcula un vector de error (figura 3.7). La suma de los cuadrados (valores RMS) de

todos los vectores de error es calculada. Posteriormente se proporciona el MER (medido en dB) que es la relación entre el valor RMS del vector de error y la amplitud de la señal.

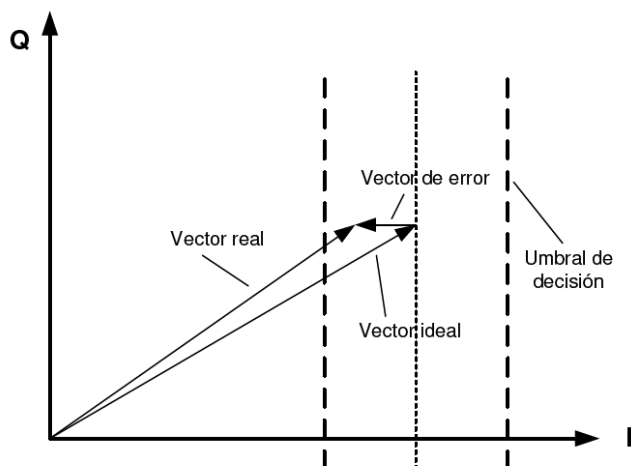


Figura 3.7: Determinación del MER en una señal 8-VSB [10]

3.2 Revisión general de equipamiento usado y recomendado

El sistema de captura de medidas es un conjunto de herramientas o instrumentos que permiten recibir señales para después analizarlas. Estas herramientas o equipamiento se seleccionan a partir del tipo de señales a medir y de sus parámetros; sin embargo, a su vez, el equipamiento determina o limita las características y parámetros de las señales que se pueden medir.

Para fines de esta tesis, el equipamiento que va a requerir el sistema de captura de medidas se separó en dos grupos. Por un lado, está el equipo esencial para realizar las mediciones, éste sería el equipo básico propuesto necesario para realizar las pruebas de campo. Por otro lado, está el equipo accesorio que brinda soporte y alternativas para realizar mediciones complementarias.

Para definir el equipamiento que necesitaría el sistema de medidas se tomó en cuenta, de forma general, el equipo, esencial y accesorio, que se ha utilizado en algunas de las pruebas de campo de TDT que se han realizado (Véase el capítulo 2). También, se menciona la Recomendación UIT-R BT.2035-2, en donde se hace un listado del equipamiento recomendado para llevar a cabo mediciones en campo de señales de TDT. A continuación se presenta dicha información.

3.2.1 Recopilación de equipamiento usado en pruebas de campo de TDT

En las pruebas de campo de TDT del capítulo anterior, se hace mención a una gran variedad de equipo utilizado para hacer las mediciones en campo. Cada prueba tiene un objetivo diferente, por lo que varían la configuración del sistema que se usó para realizar

las pruebas y la selección del equipamiento, dependiendo de dicho objetivo. Sin embargo, hay similitudes entre todas, y de las cuales surgió la base para la distribución del equipamiento del sistema de captura de medidas aquí propuesto.

A grandes rasgos, el sistema empieza por recibir la señal de TDT mediante una antena; luego, la señal se distribuye a equipos de análisis de RF, y a equipos demoduladores, decodificadores y monitores; todo esto conforma el equipo, que en esta tesis, se denominó esencial, debido a que es imprescindible para obtener mediciones generales. A este equipamiento se le agregan diferentes accesorios para obtener otros resultados, dependiendo de los objetivos de las pruebas, que corresponderían a lo que se denominó como equipo accesorio.

De estas pruebas podemos enlistar el equipo esencial y el material accesorio como sigue.

Equipo esencial:

- Antenas receptoras (directivas u omnidireccionales)
- Analizadores de señales y/o analizadores de espectro
- Receptores o demoduladores de señales
- Monitores
- Receptor de GPS
- Computadora

Equipo accesorio:

- Filtros
- Atenuadores
- Amplificadores
- Divisores
- Mezcladores
- Generador de ruido

3.2.2 Recomendación de la UIT para equipamiento de mediciones de TDT

El equipamiento recomendado por la UIT [19] para realizar mediciones es el siguiente:

- Una antena dipolo de prueba calibrada y ajustable (en ondas métricas o decimétricas según el caso)
- Antenas de medición para las bandas de frecuencia que van a medirse
- Un cable de prueba calibrado
- Un dispositivo de medición de intensidad de la señal con funciones de analizador de espectro
- Un decodificador digital
- Un monitor de imagen
- Un vehículo de estudio de campo con mástil telescópico de 10 m y sistema autónomo de alimentación

Para hacer mediciones en un entorno con redes SFN se recomienda además:

- Una antena altamente directiva situada en una plataforma orientable cuando se desee poder identificar las contribuciones realizadas por cada uno de los transmisores de dicha red SFN.
- Un receptor de GPS para registrar referencias.

3.3 Definición de los elementos del sistema de captura de medidas

Para definir los elementos que formarán parte del sistema de captura de medidas, y que a su vez son necesarios para la medición, adquisición y almacenamiento de las señales ATSC, se tomaron en cuenta las características del estándar ATSC para la transmisión de televisión digital, junto con sus recomendaciones, A/74 y A/54, las condiciones que surgen al utilizar redes SFN y las recomendaciones que da la UIT, en la UIT-R BT.2035-2, para evaluar sistemas de radiodifusión terrena, la cual establece los parámetros y equipos recomendados para dicha evaluación. Además las pruebas de campo mencionadas en el capítulo 2 proporcionaron, de forma general, elementos útiles para configurar el sistema de captura de medidas.

3.3.1 Organización general del sistema de captura de medidas

Para ordenar y configurar el sistema de captura de medidas, la figura 3.8 muestra un diagrama general de cuál sería el orden, o etapas, que seguiría el paso de la señal ATSC recibida en las pruebas de campo.

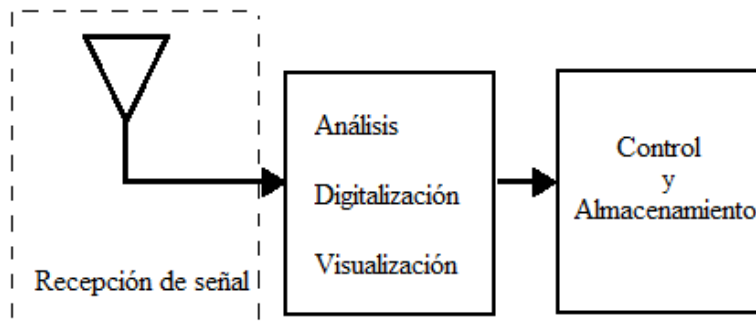


Figura 3.8: Diagrama conceptual del sistema de captura de medidas

Inicialmente, el sistema requiere una antena receptora para la captación de la señal ATSC, posteriormente, dicha señal pasaría a los equipos correspondientes para la medición, adquisición y almacenamiento de los datos.

Para tener un mejor manejo de recursos designados para las pruebas y optimizar la información recabada, es muy recomendable contar con un equipo que digitalice la señal recibida de RF y la almacene en una computadora o disco duro; con esto se podría

reproducir la señal ATSC capturada en cualquier otra locación para realizar otras pruebas, comprobar medidas y/o analizar las ya realizadas.

Dado que el entorno de trabajo sería una red SFN el sistema requerirá tener un receptor de GPS para la localización de las medidas.

Asimismo, el sistema requiere una computadora para el control de los equipos con un disco duro de gran capacidad (interno o externo) para el almacenamiento de los datos. También se necesitarían uno o varios receptores ATSC para reproducir la señal de DTV recibida, y con esto tener una referencia visual de la calidad de recepción de la señal al momento de realizar las medidas.

Finalmente, se requieren materiales accesorios como cables de conexión, acopladores de impedancia o divisores de potencia. Además, una unidad móvil donde estará montado todo el equipamiento, con un sistema de alimentación autónomo que brinde energía suficiente para el funcionamiento del sistema de medidas completo.

3.3.2 Requerimientos de los elementos del sistema de captura de medidas

Cada elemento que forme parte del sistema de captura de medidas requiere de capacidades mínimas y específicas para funcionar bajo las condiciones de RF que establecen el estándar ATSC y el entorno de red SFN. En este apartado se describen las características generales requeridas para los elementos del sistema que se presentaron en el punto anterior, dejando para el siguiente capítulo la definición de sus características específicas y la propuesta final del equipamiento.

La etapa de recepción de señal comprende de los siguientes elementos:

Antenas Receptoras

Para la etapa de adquisición de señales de RF se utilizarán dos diferentes tipos de antenas para realizar dos diferentes mediciones. Una medición se hará con una antena omnidireccional para recibir, además de las señales de los transmisores de la red SFN, el multitrayecto originado desde todas las direcciones. La segunda medición se hará con una antena directiva apuntando alternadamente a cada transmisor de la red para conseguir una mayor diferencia en potencia entre la señal de un transmisor y el resto de transmisores.

Las antenas a utilizar serán antenas calibradas, cuya frecuencia de trabajo comprenda las bandas de VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency), correspondientes a los canales de TDT, las cuales equivalen de 54 a 87.5 MHz y 174 a 216 MHz para VHF, y de 470 a 890 MHz para UHF [20]. El tener certificado de calibración de la antena garantiza

que la ganancia y/o el factor de antena²[21] ya estén medidos. Estos valores dependen de la frecuencia, por esta razón se buscará que las antenas tengan una ganancia y/o factor de antena prácticamente constante en un ancho de banda superior a los 6 MHz, que es el ancho de banda de la señal ATSC.

En [19] se recomienda contar con un mástil con una altura mínima de 9 m para montar la antena al hacer las mediciones.

Para la etapa de análisis, digitalización y visualización, los siguientes elementos son necesarios:

Equipos de análisis de RF

Estos equipos, en caso de incluir receptor profesional de TDT, tienen que ser compatibles con el estándar ATSC.

Aquí también se pueden incluir los analizadores de espectro, sin embargo, hay equipos profesionales que ya tienen incluida esta función. Por otro lado es muy recomendable el contar con un analizador de espectro como apoyo en las pruebas al monitorear la señal recibida.

Los parámetros mínimos que deben tener la capacidad de medir son:

- Nivel de la señal: Nos dice la potencia con la que se recibe la señal principal, en el equipo se debe poder visualizar un rango mínimo desde -83 dBm, y máximo, por lo menos de 0 dBm, de acuerdo a la Recomendación A/74 [17].
- Relación C/N: Es la relación del nivel de potencia de la señal con respecto al nivel de potencia del ruido. Además, sirve de referencia para monitorear la calidad de la recepción, porque está relacionada con la cantidad de errores recibidos.
- BER: Es la proporción de bits en error que llegan al sistema.
- MER: Informa qué tan bien se recibe una señal modulada digital, resume todos los errores que se pueden medir en un diagrama de constelación.
- Respuesta al impulso del canal: Ilustra en espacio y tiempo los niveles de señal que se reciben de cada transmisor, el equipo debe poder desplegar, por lo menos, los valores de retardo del eco desde los -40 μ s (escenario de pre-eco) hasta los 50 μ s (escenario de post-eco) con respecto a la señal principal, de acuerdo con la

² $K = \frac{E}{V} = \frac{f [MHz]}{30.81\sqrt{G_i}}$. Donde K: Factor de antena; E: Campo eléctrico incidente; V: voltaje inducido en las terminales de la antena en su resistencia nominal $R_n = 50 \Omega$; f: frecuencia de la onda electromagnética; G_i : Ganancia de la antena.

Recomendación A/74. Esta es una medición esencial para analizar la recepción en una red SFN ya que se observa gráficamente la relación de las señales de multitrayecto que se recibirían en un punto de medida.

- Diagrama de constelación: Muestra de manera gráfica qué tan deteriorada llega la señal modulada.
- Espectro de la señal: Visualiza el espectro de la señal recibida, en donde se observan características de ésta, como la atenuación de hombros o los desvanecimientos en frecuencia.

Para poder observar interferencias en canales adyacentes, estos equipos deben poder desplegar un span de, por lo menos 18 MHz, que es un ancho de banda tres veces mayor a los 6 MHz de ATSC, con esto se observan 6 MHz abajo y 6 MHz arriba de la señal a analizar.

Equipo de digitalización de señales

Este equipo debe ser capaz de captar la señal SFN-ATSC, digitalizarla y posteriormente almacenar la información en una computadora o disco duro, con el fin de que posteriormente se puedan utilizar dichas señales grabadas para hacer otro tipo de pruebas en laboratorio sin la necesidad de trasladar equipos nuevamente a las locaciones en donde se realizaron las pruebas de campo. Además, el contar con un respaldo de los datos obtenidos en campo ayuda a corroborar las medidas

Para lograr una captura de datos eficiente deben cumplirse ciertas condiciones. La señal de DTV ATSC tiene un ancho de banda de 6 MHz, por lo que el equipo de digitalización debe tener como mínimo una frecuencia de muestreo de 20 MHz para cumplir con la condición de una frecuencia de muestreo de más del doble del ancho de banda de la señal. Para la asignación de bits en la etapa de digitalización, una referencia muy común en algunos equipos son 16 bits por muestra. Multiplicando estos dos valores, y haciendo la conversión de bits a bytes, se tiene una tasa de transmisión de datos de 40 Mbytes/s. El cálculo se muestra a continuación.

$$\left(20 \times 10^6 \frac{\text{muestras}}{\text{seg}}\right) \left(16 \frac{\text{bits}}{\text{muestra}}\right) = 320 \times 10^6 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}$$

Pasando a bytes:

$$\frac{\left(320 \times 10^6 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}\right)}{8 \frac{\text{bits}}{\text{byte}}} = 40 \frac{\text{MB}}{\text{seg}}$$

El siguiente paso es la memoria de almacenamiento que ocuparían los datos, por ejemplo, para un tiempo de grabación de una hora (3600 seg.) se ocuparía un espacio de 144 Gbytes como se muestra a continuación.

$$\left(40 \frac{MB}{seg}\right) (3600 \text{ seg}) = 144 \text{ GB}$$

Por lo tanto se debe contar con el espacio suficiente en memoria para todas las medidas en campo que se tengan planeadas. De estas consideraciones, el equipo de digitalización debe contar con, por lo menos, una frecuencia de muestreo de 20 MHz y una unidad de almacenamiento de gran capacidad.

Decodificadores y monitores

Actualmente, los receptores comerciales ya tienen implementado el hardware capaz de recibir el estándar ATSC, por lo que los equipos demoduladores ya no serán tomados en cuenta debido a que fueron utilizados en fechas donde los receptores comerciales requerían de un demodulador para procesar la señal de DTV.

Con respecto a los monitores, estos serán receptores comerciales de televisión. Estos deben ser compatibles para el estándar ATSC y deben ser de un tamaño adecuado para instalarse en la unidad móvil.

En la etapa de control y almacenamiento se tienen los siguientes elementos;

Receptor de GPS

El GPS debe interconectarse con la computadora (o con el equipo de análisis) para sincronizar los datos de geolocalización y tiempo.

Computadora

La computadora tiene que contar con un procesador rápido y una memoria RAM y disco duro con gran capacidad, además de contar con el software adecuado para los propósitos del sistema. Se recomienda la utilización de una laptop debido a la portabilidad de la misma y al reducido espacio que ocupa, en comparación con una computadora de escritorio.

Dispositivos de almacenamiento

El tener un disco duro externo de gran capacidad es recomendable para el almacenamiento de la información que se vaya recabando en las pruebas.

Por otra parte, hay elementos que complementan al sistema de captura de medidas, los cuales son:

Material accesorio

Todo este material variará de acuerdo al alcance que tengan las pruebas de campo y dependerán de los equipos específicos que se propongan para el sistema de medidas. Lo indispensable es el divisor de potencia, ya que la señal recibida por la antena se distribuirá a distintos equipos, junto con los acopladores y cables de interconexión.

Unidad móvil

Cabe especificar que en esta tesis no se darán detalles sobre la unidad móvil en la que se instale el sistema de captura de medidas. Sin embargo, se proponen algunas características para optimizar el funcionamiento del sistema. Esta unidad debe tener el espacio suficiente para la instalación del sistema de captura de medidas junto con dos o tres personas que manipulen el sistema para realizar las mediciones, más el conductor de la unidad, y tener la posibilidad de adecuarle un sistema de alimentación, necesario para proporcionar energía a todo el equipamiento del sistema. También, debe contar con sistema de aire acondicionado, ya que es importante para regular el calor que genere el equipamiento al interior de la unidad. Por las condiciones anteriormente mencionadas, la unidad requerida debe ser una camioneta de tipo van.

Sistema de alimentación

Este sistema se conforma básicamente de un inversor, este debe proporcionar la energía necesaria para alimentar todo el sistema de captura de medidas siendo conectado a la batería de la unidad móvil.

3.4 Modelo general del sistema de captura de medidas

Ya definidos los elementos del sistema de captura de medidas y sus requerimientos generales, se elaboró un diagrama de bloques de las etapas que conforman la propuesta del sistema. El diagrama de bloques se dividió en tres etapas: Recepción y distribución de RF; Análisis, digitalización y monitoreo; y Control y almacenamiento. En la siguiente figura (figura 3.9) se muestra el diagrama de bloques del sistema. El siguiente capítulo de la tesis está dedicado a definir específicamente el (o los) equipo (s) propuesto(s) para cada uno de los elementos de los bloques de este modelo general del sistema.

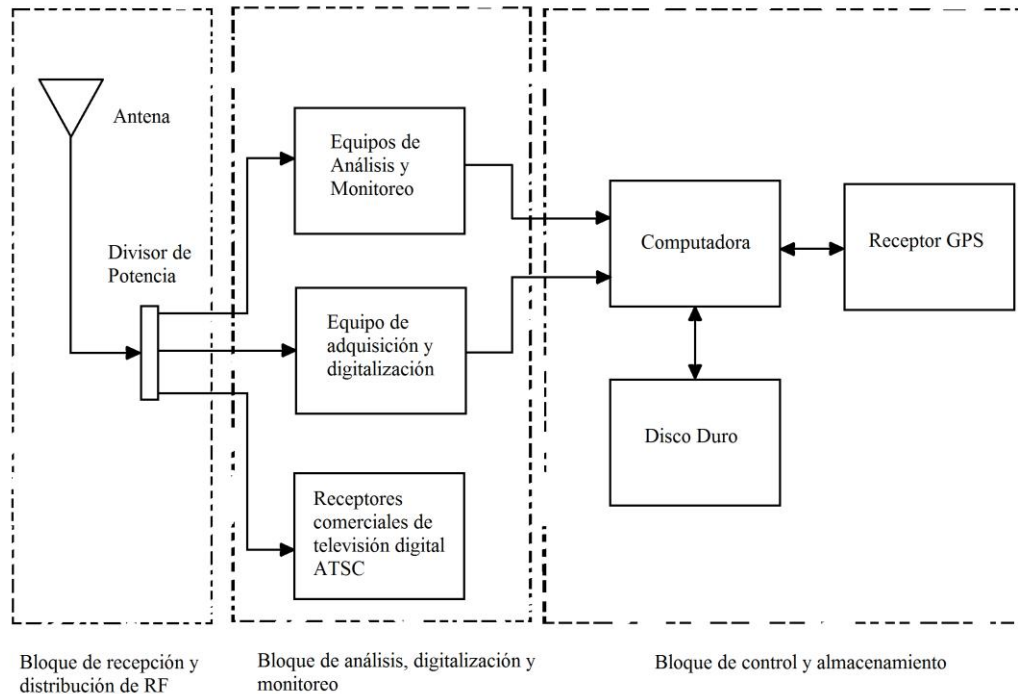


Figura 3.9: Diagrama de bloques del sistema de captura de medidas.

En la primera etapa (recepción y distribución de RF) la antena recibe las señales SFN-ATSC y posteriormente por medio de un divisor de potencia distribuye dichas señales a la siguiente etapa (análisis, digitalización y monitoreo), en donde se utilizarán los equipos necesarios para obtener los parámetros mencionados en el apartado 3.3.2, además de digitalizar y monitorear las señales recibidas.

Por último, en el bloque de control y almacenamiento, por medio de una computadora y el receptor GPS se controlará el sistema, y en el disco duro se almacenará toda la información de la señal de ATSC recabada.

4 Selección y propuesta del equipamiento para el sistema de captura de medidas

En este capítulo se mencionan los modelos de equipos más comunes que existen actualmente en el mercado con base en las características propuestas para capturar las señales de ATSC en una configuración de red de SFN, las cuales se expresaron en el capítulo 3. Se evaluaron y compararon las características técnicas de equipos de diferentes fabricantes, y con base en esto, al final se seleccionaron los equipos que se proponen como los más adecuados para cada etapa del sistema de captura de medidas de señales SFN-ATSC. Además de los requerimientos técnicos del equipamiento, un factor secundario que se tomó en cuenta para establecer la propuesta fue el costo de los equipos, ya que éste puede ser un factor determinante en la adquisición de equipamiento para un proyecto de ingeniería. Para el trabajo de esta tesis, contar con este dato complementó la información de cada equipo, y cuando se dio el caso de que dos o más equipos tuvieron capacidades técnicas similares, el costo tuvo peso para la selección definitiva.

Los equipos se describen y comparan de acuerdo a las etapas del sistema que fueron definidas en el capítulo 3. Al final de este capítulo se presenta la propuesta final del sistema de captura de medidas, donde también se abordan los accesorios que se requieren para éste.

Todos los equipos (hasta la etapa 2 del sistema) se presentan con sus características principales, sin embargo, en esta tesis se presenta un anexo (Anexo A) donde se puede consultar mayor información de carácter técnico.

4.1 Evaluación de los equipos de la etapa de recepción y distribución del sistema

Para esta selección, que consiste básicamente en la antena, resulta difícil seleccionar una opción específica, ya que las características de las antenas varían con respecto a las frecuencias para las que fueron diseñadas y la frecuencia de trabajo dependerá de la definición de las pruebas de campo. Por esta razón, en este apartado se describen algunas antenas cuyo ancho de banda se encuentra dentro de las bandas VHF y UHF de televisión y, además, que cumplen con las características mencionadas en el capítulo anterior.

La propuesta incluye dos tipos de antenas, una omnidireccional y otra directiva para la realización de distintas pruebas, como se menciona en el apartado 3.3.2 de capítulo 3.

4.1.1 Antenas Omnidireccionales

Las antenas omnidireccionales que se revisaron, y cuyas especificaciones se pueden consultar en el Anexo A de esta tesis, son de Rohde & Schwarz [22] y de Funkbau [23]. Estas antenas presentan su factor de antena y/o su ganancia en función del rango de frecuencia en que trabajan.

Los modelos de Rohde & Schwarz son:

- HF214
- HE314A1
- HE600

Los modelos de Funkbau son:

- MA700
- MA160

De estas antenas se seleccionaron dos, las cuales, tienen valores constantes de su ganancia y/o factor de antena a lo largo de sus frecuencias de trabajo, una para la banda de VHF y otra para UHF.

Para la banda VHF se seleccionó la antena R&S HE600 (figura 4.1, izquierda), la cual tiene un factor de antena prácticamente constante a lo largo de las frecuencias de 50 MHz a 200 MHz (véase Anexo A, gráfica A-4). Esta es una antena activa diseñada para el rango de frecuencias de 20 MHz a 8 GHz y para recibir señales con una polarización vertical. Su radomo (recubrimiento) es resistente a duras condiciones ambientales, lo que la hace una buena opción para su uso en exteriores.

Por otra parte, en la banda UHF, se seleccionó la antena R&S HF214 (figura 4.1, derecha), la cual es una antena pasiva diseñada para la recepción de ondas polarizadas horizontalmente que están en el rango de frecuencias desde 500 MHz a 1.3 GHz. Al observar el comportamiento de la ganancia en función de la frecuencia (véase Anexo A, figura A-1), se nota un valor constante, entre los 0.5 dBi y los 2 dBi, para el rango de 500 MHz a 800 MHz.

Para las antenas activas (como la R&S HE600) se recomienda la adquisición de una unidad de voltaje R&S IN600, la cual es una fuente de alimentación que provee la energía mediante cable coaxial hasta para dos antenas.



Figura 4.1: Antenas omnidireccionales [22]

En la siguiente tabla (tabla 4.1) se muestran los costos de cada una de las antenas expuestas anteriormente.

Equipo	Costo [USD]	Costo [MXN]
R&S HE600	\$11,346.00	\$188,000.00
R&S HF214	\$8,557.00	\$141,789.00

Tabla 4.1: Costos de antenas R&S HE600 y R&S HF214³

4.1.2 Antenas Directivas

Para el caso de las antenas directivas, se encontraron los siguientes modelos de las marcas Rohde & Schwarz [22], AH Systems [24] y un sistema de antenas de Funkbau [23], de igual manera, sus características se pueden encontrar en el Anexo A de esta tesis.

Los modelos de Rohde & Schwarz son:

- R&S HL007A2
- R&S HL033
- R&S 223

Los modelos de AH Systems son:

- SAS 512-2
- SAS 515
- SAS 521-2

El modelo de Funkbau es:

- AS 2x SYA 406 TETRA

Nuevamente de estas antenas se seleccionaron dos para cada banda (VHF y UHF) dependiendo de el comportamiento de su ganancia y/o factor de antena a lo largo de las frecuencias.

³ Cotización.

Se seleccionaron los modelos R&S HL007A2 y R&S HL033 (figura 4.2, izquierda HL007A2, derecha HL033), los cuales no presentan información sobre su factor de antena, sin embargo, sí de su ganancia. Para la banda VHF, ambas antenas comienzan a operar desde los 80 MHz, teniendo el modelo R&S HL033 una ganancia ligeramente más constante en el rango de 80 a 200 MHz, con valores entre 6 y 7 dBi (véase Anexo A, gráfica A-9).

Para la banda UHF estos dos modelos también tienen una ganancia que oscila entre los 6 y 7 dBi tomando en cuenta desde los 400 MHz hasta 900 MHz. Sin embargo, todos los demás modelos revisados también presentan valores similares de ganancia a lo largo de estas frecuencias, excepto por el sistema de antenas, el cual presenta una ganancia que oscila entre 11.5 dBi y 13 dBi, en un rango menor de frecuencias (380 – 460 MHz).

El modelo R&S HL007A2 (figura 4.2) es una antena de tipo log periódica de elementos cruzados diseñada para el monitoreo y medición de señales de RF con frecuencias de 80 MHz hasta 1.3 GHz y con polarizaciones vertical, horizontal e inclinada 45°. R&S HL033 es otro modelo de antena direccional de tipo log periódica diseñada para detectar y medir señales de RF que estén en las frecuencias de 80 MHz a 2 GHz.

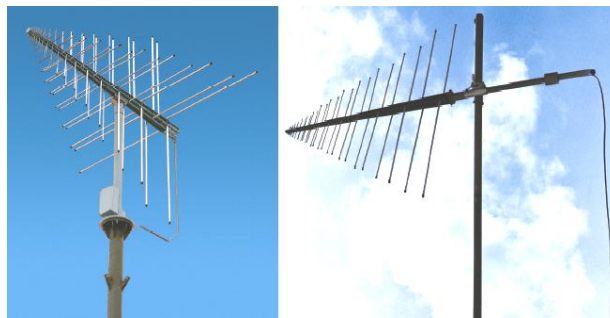


Figura 4.2: Antenas directivas [22]

Los costos de estas antenas se muestran en la siguiente tabla (tabla 4.2).

Equipo	Costo [USD]	Costo [MXN]
R&S HL007A2	\$20,870.00	\$345,815.00
R&S HL033 c/adaptador para soporte	\$13,787.00	\$228,450.00

Tabla 4.2: Costos de antenas R&S HL007A2 y R&S HL033⁴

4.2 Evaluación de los equipos de la etapa de análisis, digitalización y monitoreo del sistema

En esta etapa del sistema es donde se analizaría y grabaría las señales de RF que se recibirían, además, el sistema se apoyaría de un par de equipos (un analizador de espectro y un receptor comercial de ATSC) para asegurar que se esté recibiendo la señal útil durante

⁴ Cotización.

las medidas, mediante la visualización del espectro de la señal ATSC con el primer equipo, y la reproducción de esta señal con el segundo equipo.

Por esta razón, en este subcapítulo se hablará de los equipos de análisis, de digitalización y de monitoreo de las señales de RF. Estos equipos se compararon para seleccionar el más adecuado de cada categoría para integrarse al sistema de captura de medidas.

Nuevamente, en el Anexo A se pueden consultar más características técnicas e imágenes de cada equipo mencionado.

4.2.1 Equipos de análisis de señales de RF

En la etapa de análisis de señales los equipos que, actualmente, tienen la capacidad de realizar mediciones para el estándar ATSC son los siguientes:

- Deviser S7000 TV Analyser
- Promax: HD Ranger + ATSC y HD Ranger 2 ATSC
- Rohde & Schwarz ETL
- Rohde & Schwarz FSH3-TV

A continuación se describen brevemente estos cuatro equipos.

– Deviser S7000

El Deviser S7000 es un equipo diseñado para analizar señales de televisión digital satelital, por cable o terrestre, además de señales de televisión analógicas. Los estándares de televisión digital que es capaz de analizar son: DVB-T/H/T2, DVB-S/S2, ATSC y QAM (J.83A/B/C) y se le puede agregar la posibilidad de contar con GPS [25].

En cuando a mediciones de señales de televisión digital terrestre, este equipo tiene la opción de analizador de espectro con un rango de frecuencias de 5 MHz a 1050 MHz.

Este equipo tiene la capacidad de medir los siguientes parámetros de la señal ATSC:

- Nivel de potencia de la señal
- MER
- BER
- Diagrama de Constelación

– Promax HD Ranger 2 ATSC

La empresa de tecnología española Promax tiene una gran gama de equipos para análisis de señales de televisión digital. Para el caso de análisis de señales de ATSC, Promax cuenta con un par de equipos: el HD Ranger + ATSC y el HD Ranger 2 ATSC, siendo el segundo una actualización del primero. Esta actualización consta de una pantalla táctil, la capacidad

de analizar Transport Streams, medidas y decodificación para IP TV. Como se puede observar, estas modificaciones no cambian la capacidad de medición de la señal ATSC (teniendo ambos equipos las mismas), por lo que en esta tesis solo se hablará del equipo HD Ranger 2 ATSC, ya que es el modelo más actual.

El HD Ranger 2 ATSC cuenta con la capacidad de medir varios estándares de televisión digital como ATSC, DVB- C, DVB-S/S2 y J.83 Anexo B/C, además de televisión analógica, y cuenta con la función de analizador de espectro en el rango de 5 MHz a 1000 MHz [26].

Una opción adicional es la posibilidad de contar con un receptor GPS para geolocalizar las medidas tomadas.

Como medidas puede obtener el valor de intensidad de campo, desplegar el espectrograma de la señal y varios parámetros del estándar ATSC, los cuales se enlistan a continuación:

- Potencia de la señal
- SER
- BER después de Viterbi
- MER
- C/N
- Margen de Ruido
- Diagrama de constelación

– **R&S ETL**

Por su parte Rohde & Schwarz tiene como equipo de medición de señales de televisión digital el ETL. Este equipo tiene la ventaja de poder escoger diferentes opciones, tanto de hardware como de software, para que sean agregadas al equipo y así adaptarlo a las necesidades que el usuario requiera.

Cuenta con la función de analizador de espectro, y dependiendo de la opción que se le instale, puede analizar diferentes estándares de televisión analógica y televisión digital como DVB-T/H/T2/C, ATSC, ATSC-MH, DTMB, ISDB-T/C, J.83 A/B/C, además de radio FM, AM y digital DAB [27].

La función de analizador de espectro tiene un rango de frecuencia de 500 kHz a 3 GHz y agregando la opción para medidas del estándar ATSC se configura el equipo para obtener principalmente las siguientes medidas:

- Potencia de la señal
- MER
- Magnitud Vectorial de Error (EVM)

- BER después de Viterbi
- BER después de Reed-Solomon
- SER
- C/N
- Diagrama de constelación
- Diagrama de ojo
- Respuesta al impulso del canal

En la siguiente figura (figura 4.3) se observa la pantalla del equipo R&S ETL para la respuesta al impulso del canal, en esta se observan parámetros importantes como la frecuencia de recepción, la desviación de frecuencia de las señales eco con respecto a la señal principal, la diferencia de retardos de las señales y sus niveles de señal, ambas con respecto a la señal principal. Puede desplegar hasta 10 ecos (incluyendo la señal principal) en un rango de $-18 \mu\text{s}$ a $42 \mu\text{s}$ con respecto a la señal principal. Si se opera vía remota puede aumentar la visualización hasta 200 ecos incluyendo la señal principal.

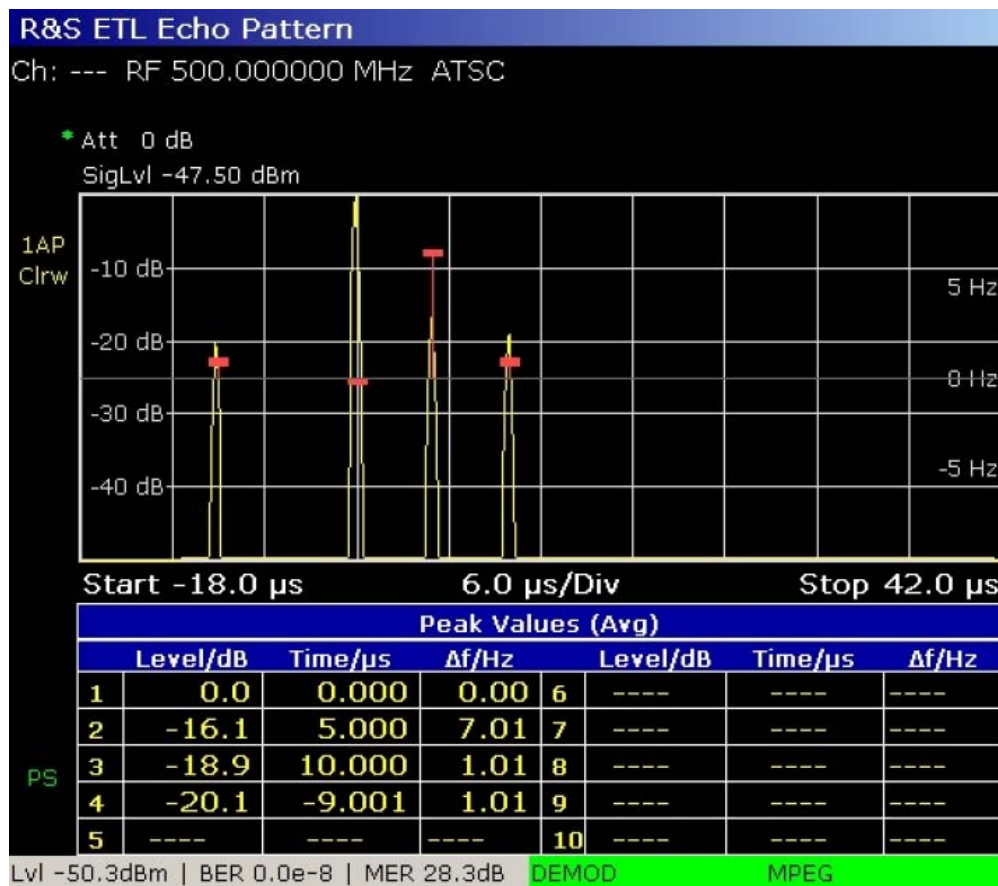


Figura 4.3: Pantalla de medición para SFN en ATSC del equipo R&S ETL [28]

– **R&S FSH3-TV**

Otro equipo de R&S es el FSH3-TV, el cual es un equipo portátil con la capacidad de analizar señales de televisión analógica y digital, y con la función de analizador de espectro con rango de 100 kHz a 3 GHz [27].

Al igual que el equipo ETL, se le configura con diferentes opciones dependiendo de la aplicación que requiera el usuario. La opción que configura al FSH3-TV para analizar señales ATSC es: R&S FSHTV-K22, la cual permite obtener las siguientes mediciones:

- Potencia y frecuencia de la señal piloto
- MER
- EVM
- BER después de Viterbi
- SER
- Diagrama de constelación
- C/N

4.2.1.1 Comparación y selección del equipo de análisis de la señal de RF

De acuerdo a los parámetros definidos en el capítulo 3, se hizo la comparación de las capacidades de los equipos de análisis descritos anteriormente para definir qué equipo se adapta mejor para realizar las mediciones de señales ATSC en redes SFN.

A continuación se muestra una tabla (tabla 4.3) comparativa de los equipos conteniendo los parámetros de medida que proveen, y posteriormente se muestra otra tabla (tabla 4.4) con sus respectivos costos.

Equipo	Deviser S7000	Promax HD Ranger 2 ATSC	R&S ETL	R&S FSH3-TV
Medidas				
Nivel de señal	Si	Si	Si	Si
Relación C/N	No	Si	Si	Si
BER	Si (sin especificar)	Después de Viterbi	Después de Viterbi y después de Reed - Solomon	Después de Viterbi
MER	Si	Si	Si	Si
Respuesta al impulso del canal	No	No	Si	No
Diagrama de constelación	Si	Si	Si	Si
Opción de analizador de espectro	Si	Si	Si	Si

Tabla 4.3: Comparación de los equipos de análisis

Equipo	Costo [USD]	Costo [MXN]
Deviser S7000	\$2,300	\$38,111.00
Promax HD Ranger 2 ATSC	\$6,624	\$109,759.00
R&S ETL	\$21,480 (sin complementos)	\$355,923.00
R&S FSH3-TV	\$14,165 (sin complementos)	\$234,714.00

Tabla 4.4: Costos de equipos de análisis⁵

Como se puede observar en la tabla 4.3, en lo general todos los equipos tienen la capacidad de medir la mayoría de los parámetros definidos como importantes para el análisis de las señales de ATSC, sin embargo, sólo el ETL de R&S es capaz de proporcionar la respuesta al impulso del canal, la cual es vital para mediciones de señales SFN-ATSC. Además, el ETL tiene más posibilidades de ampliar sus capacidades de medición para realizar otros tipos de análisis. De la tabla 4.4, también se observa que el equipo que tiene un costo mayor es el ETL de R&S lo cual, en este caso, no se presenta como un factor decisivo para la selección del equipo.

Por estas razones, el equipo de análisis recomendado para el sistema de captura de medidas es el ETL de R&S (figura 4.4).



Figura 4.4: Equipo R&S ETL

4.2.2 Equipos de digitalización de señales de RF

Para esta función se tienen dos diferentes clases de equipos. Una es de equipos diseñados con la función específica de grabación de señales de RF y otra clase de equipos son los equipos SDR (Software Defined Radio), los cuales deben ser configurados mediante programación para realizar las funciones deseadas.

Ambas opciones tienen sus ventajas y desventajas, por ejemplo, el tener el equipo con la función ya establecida hace que nos ahorremos tiempo de diseño con respecto a un equipo SDR, ya que en este último caso, el equipo tiene que ser programado y configurado para la función que se requiere. Sin embargo, el contar con un equipo SDR brinda mayores alcances y más flexibilidad porque se pueden modificar sus capacidades y funciones.

⁵ Consultado el 13/10/2015 en: www.ebay.com, www.testequipmentdepot.com, shop.rohde-schwarz.com y www.testequity.com.

Se exponen equipos de los dos tipos, 3 equipos de grabación de señales de RF y 3 equipos SDR.

Los equipos de grabación de señales de RF son:

- Cortex RSR de Zodiac Data Systems
- IQR de Rohde & Schwarz
- IQC5000B de X-Com Systems

Los equipos SDR son:

- COM-3011 de ComBlock
- USRP de Ettus Research (parte de National Instruments)
- Noctar de Per Vices Corporation

4.2.2.1 Equipos de grabación de señales de RF

– Cortex RSR

El equipo Cortex RSR, de la compañía Zodiac Data Systems, ofrece las capacidades de grabar y reproducir señales de RF con frecuencia intermedia de 70 MHz, hasta en 4 canales con diferentes tasas de muestreo, las cuales pueden ser 5, 10, 20 o 40 MS/s. La resolución de bits puede ser de 8 o 16 bits por muestra.

Para una visualización de la señal que se está grabando, Cortex cuenta con analizador de espectro en tiempo real y, para el almacenamiento de datos, puede utilizar cartuchos LTO los cuales son fáciles de remover [29].

Este equipo está diseñado para interconectarse preferentemente con equipos de la misma compañía que funjan como receptores de la señal.

– R&S IQR100

Por su parte R&S tiene en el mercado el equipo IQR para grabar y reproducir señales de RF. Sus capacidades varían ya que cuenta con dos tipos de configuraciones, la primera es R&S IQR20 con la cual se tiene una tasa de muestreo de 20 MS/s, y la R&S IQR100 con la que la tasa aumenta a 99.5 MS/s, la resolución de bits es de 16 bits por muestra para el canal I y de 16 bits por muestra para el canal Q. Para ambas opciones se puede trabajar con un disco duro HDD (unidad de disco rígido) o SSD (unidad de estado sólido). Para la unidad HDD la capacidad es de 2 TB de memoria, mientras que para la unidad SSD es de 1.9 TB de memoria. Para este caso mencionaremos las características del equipo R&S IQR100 por ser el que tiene mayores capacidades [30].

El equipo IQR100 varía en sus capacidades debido a que para operar requiere de otro equipo de la familia R&S, como un analizador de espectro o de señales. Este segundo

equipo realizará la parte de recepción de la señal, la cual se grabará en el IQR100, por lo que factores como el ancho de banda dependerán del equipo que funja como receptor.

Para su configuración el R&S IQR100 tiene una pantalla táctil donde se modifican los parámetros deseados, además, tiene la capacidad de mostrar en su pantalla el espectro de la señal que se va a grabar.

Como extras se le pueden agregar opciones, tales como guardar coordenadas extraídas por un GPS o contar con la capacidad de importar y exportar datos I/Q vía USB o Ethernet.

– **IQC5000B**

Otro equipo de grabación de señales de RF es el IQC5000B, el cual fue diseñado por X-Com Systems y tiene las capacidades de grabar y reproducir señales de RF hasta en 2 canales con un ancho de banda de 165 MHz por canal y con una tasa de muestreo de hasta 200 MS/s. La resolución de bits es de 16 bits por muestra para el canal I y de 16 bits por muestra para el canal Q.

Como unidad de almacenamiento tiene una capacidad de 4 TB con un tiempo de grabación de 83 minutos con el máximo ancho de banda en un canal, lo cual puede ser mayor expandiendo el paquete de memoria [31].

Debe usar otro equipo como interfaz de RF, para esto, el IQC5000B es compatible con analizadores de espectro y analizadores de señal de Tektronix, Rohde & Schwarz y Keysight.

Para el control y configuración, el IQC5000B requiere de una computadora (desktop o laptop) interconectada mediante una interfaz Ethernet. En esta computadora se instala el software con el cual se configura el equipo y si se requiere visualizar el espectro de la señal se debe instalar un software adicional.

Puede tener opciones extras como etiquetar los datos guardados con información de localización mediante un GPS o una unidad de memoria externa de hasta 15 TB con la cual se puede transferir la información de la señal grabada a una computadora con una interfaz PCIe (desktop) o Express Card (laptop).

4.2.2.2 Equipos del tipo radio definido por software

– **COM-3011**

El COM-3011 es una plataforma SDR de la empresa ComBlock, la cual cuenta con receptor de señales de RF con frecuencias desde 20 MHz hasta 3 GHz y requiere una fuente de alimentación externa de 5 V DC. El diseño de esta plataforma se basa en la interconexión con distintos “bloques” o plataformas de la misma compañía para configurar diferentes sistemas [32]. Para la frecuencia de muestreo utiliza un oscilador interno con

frecuencia de 100 MHz, además, se puede agregar otra frecuencia de referencia de 10 MHz o 20 MHz utilizando una referencia externa. Como bits de resolución asigna 12 bits por muestra para I y 12 bits por muestra para Q.

Por otro lado, el equipo tiene opción de mostrar en la pantalla del ordenador la captura de las señales en tiempo real utilizando el software del equipo.

Para la configuración del equipo se conecta a una PC por medio de un cable mini USB, y los datos de salida los da mediante un conector 40-pin (2 filas x 20) de 2 mm.

– **USRP**

El USRP (Universal Software Radio Peripheral), de Ettus Research, es una plataforma SDR escalable la cual cuenta con algunos modelos, entre ellos están: el USRP X300 y el USRP X310, siendo el tipo de FPGA la única diferencia entre los dos. El USRP X310 tiene un FPGA diseñado para procesos complejos, por esta razón en esta tesis se hablará del USRP X310.

Esta plataforma funciona mediante “tarjetas hijas” o “daughterboards” las cuales definen las características de transmisión y recepción de señales de RF del equipo. Para el caso de señales de DTV la tarjeta adecuada para trabajar sería la TVRX2 50-860 MHz Rx x 2, la cual trabaja en la banda de frecuencias de 50 MHz a 860 MHz y se le puede configurar el ancho de banda a: 1.7 MHz, 6 MHz, 7MHz, 8Mhz y 10 MHz [33].

Cuenta con múltiples interfaces de alta velocidad:

- Dual 10 Gigabit Ethernet – 200 MS/s Full Duplex
- PCIe Express (Desktop) – 200 MS/s Full Duplex
- Express Card (Laptop) – 50 MS/s Full Duplex
- Dual 1 Gigabit Ethernet – 25 MS/s Full Duplex

Cuenta una frecuencia de muestreo máxima de 200 MS/s y con una resolución de bits de 14 bits por muestra.

Para la configuración del USRP, este es compatible con distintos software y sistemas operativos:

- GNU Radio (trabaja con el SO Linux)
- Lab View de NI (trabaja con el SO Windows)
- C++ / Python
- Amarisoft LTE 100

– Noctar

Noctar (PerVices Corporation) es un transceptor de banda ancha capaz de adquirir señales con un ancho de banda de hasta 200 MHz con frecuencias desde 100 KHz hasta 4 GHz. Para la parte de adquisición de datos, tiene una tasa de muestro de 125 MS/s con 12 bits por muestra [34].

Esta plataforma SDR está diseñada como una tarjeta PCIe por lo que debe ser montada en una computadora de escritorio, con esto obtiene velocidades de transmisión de 8 Gbps.

Como software, Noctar, es compatible con GNU Radio (Linux).

4.2.2.3 Comparación y selección del equipo de digitalización de señales de RF

Al tener una visión más clara de las características de los equipos anteriormente expuestos, se obtuvieron conclusiones después de comparar sus capacidades.

Por parte de los equipos de grabación de señales de RF se destaca que los tres tienen capacidades muy similares en cuanto a la resolución de bits y la tasa de muestreo, con la cual cumplen con los mínimos requerimientos expuestos en el capítulo anterior. Sin embargo, algo que los difiere, por una parte, es el uso en conjunto con otros equipos que actúen como receptor de la señal de RF, y por otro lado, en su capacidad de memoria. Los dos equipos que son compatibles con un mayor número de equipos de medición son el R&S IQR100 y el IQCB5000B.

Por otra parte se tienen los equipos SDR. Estos requieren ser programados para la aplicación deseada, en este caso, que reciban la señal de ATSC, la muestreen y finalmente almacenen los datos en una unidad de memoria. De los equipos expuestos, el USRP X310 es el que cuenta con mejores capacidades en cuanto a la frecuencia de muestreo (hasta 200 MS/s), la facilidad de interconexión con un ordenador y en cuanto a las múltiples opciones de software compatibles.

El principal inconveniente de estos equipos es que requieren de un mayor tiempo y trabajo para programarlos, por ello ya no se tomarán en cuenta para el sistema, sin embargo se muestran sus costos en la tabla de costos (tabla 4.5) solo para fines ilustrativos.

Equipos de grabación	Costo [USD]	Costo [MXN]
Cortex RSR	-----	-----
R&S IQR100 (opciones: SSD, 1 TB, max. 270 Mbytes/s; PSDC-B200: Power Supply Module, 10 V to 30 V DC; SMU-Z6: Additional Cable)	\$20,734.00	\$343,562.00
IQC5000A (versión anterior ; 1 canal , 110 Mhz de ancho de banda y 1TB)	\$40,000.00	\$662,800.00
IQC5000A (versión anterior; 2 canales , 160 Mhz de ancho de banda y 2 TB)	\$88,000.00	\$1,458,160.00
Equipos SDR		
COM-3011	\$345.00	\$5,716.00
USRP X310 con tarjeta hija	-	\$98,440.00
Noctar	\$2,499.00	\$41,408.00

Tabla 4.5: Costos de equipos de digitalización de señales de RF⁶

Comparando las características de los equipos IQR100 e IQC5000B se hace notar que uno puede alcanzar una mayor frecuencia de muestreo (el IQC5000B con 200 MS/s). También difieren en la capacidad de memoria, el control del instrumento y la visualización de la señal a grabar. El IQC5000B cuenta con mayor capacidad de memoria, pero es necesario contar con una computadora para manejarlo, por el contrario, el R&S IQR100 no requiere una computadora ya que se configura directamente, pero tiene una menor capacidad de almacenamiento.

Al realizar pruebas de campo, el tiempo total de grabación es dependiente de la capacidad de memoria que tenga el equipo, por lo que, mientras más memoria tenga se tendrá un mayor tiempo de grabación continua. En caso de contar con una menor memoria, esto se soluciona con la posibilidad de descargar la información a un disco duro una vez que la memoria del equipo se sature para después continuar con la grabación.

Ambos equipos de grabación superan los requerimientos técnicos para el sistema de captura de medidas, por lo tanto, el siguiente factor a considerar es el costo de cada equipo. Al observar la tabla 4.5, el equipo ICQ5000A (versión anterior al IQC5000B), con características similares al equipo IQR100, tiene un valor que sobrepasa por casi el doble el costo de este último. Con esta información, se decide proponer el equipo R&S IQR100 (figura 4.5) para formar parte del sistema de captura de medidas.

Teniendo esto en cuenta, se agrega la posibilidad de seleccionar una configuración para el equipo R&S IQR100 y utilizarlo en conjunto con un analizador de espectro compatible, y con esto se obtiene la capacidad de observar la forma en que se recibe la señal en el dominio de la frecuencia al momento de realizar medidas en campo sin tener que disponer de esta función en el equipo de análisis de señales.

Para saber el tiempo de grabación del cual es capaz el equipo R&S IQR100, se hace el cálculo tomando en cuenta su frecuencia de muestreo máxima (99.5 MS/s), su resolución total de bits (32) y su capacidad de memoria (1.9 TB).

⁶ Consultado el 13/10/2015 en: www.instrumex.de, www.used-line.com, www.xcomsystems.com, www.comblock.com, www.ettus.com y www.pervices.com/noctar/.

$$(99.5 \times 10^6 \frac{\text{muestras}}{\text{seg}}) (32 \frac{\text{bits}}{\text{muestra}}) = 3184 \times 10^6 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}$$

Pasando a bytes:

$$\frac{(3184 \times 10^6 \frac{\text{bits}}{\text{seg}})}{8 \frac{\text{bits}}{\text{byte}}} = 398 \frac{\text{MB}}{\text{seg}}$$

Teniendo que 1.9 TB = 1,900,000 MB, se tiene:

$$\frac{1.9 \times 10^6 \text{MB}}{398 \frac{\text{MB}}{\text{seg}}} = 4773.87 \text{ seg.}$$

Pasando a horas:

$$\frac{4773.87 \text{ seg.}}{3600 \frac{\text{seg.}}{\text{hora}}} = 1.32 \text{ horas}$$

Por lo que el equipo R&S IQR100 puede estar grabando por 1.3 horas (80 minutos).



Figura 4.5: Equipo R&S IQR100

4.2.3 Analizadores de espectro

Para la selección del analizador de espectro se compararon diferentes equipos de Tektronix y Rohde & Schwarz. Estos últimos son los equipos compatibles para interconectarse con el IQR100. Para la selección de el analizador de espectro solo se tomó en cuenta el ancho de banda de la señal ATSC y las bandas de frecuencia de VHF y UHF, el analizador debe abarcar dichas frecuencias y de poder desplegar el espectro de la señal ATSC. Se revisaron parámetros como el Ancho de Banda de Resolución (RBW) o el Nivel Promedio de Ruido Desplegado (DANL) los cuales son similares entre estos equipos [35] y se pueden consultar en el Anexo A (tabla A-29). En la tabla 4.6 se describen los analizadores de espectro comparados.

Marca	Modelo	Frecuencias de trabajo	Consumo	Costo aprox. [MXN]
Tektronix	RSA5103B (con opción 65 para la salida de datos IQ)	1Hz a 3 GHz	400 W max.	\$420,878.00
Tektronix	RSA 6106B (con opción 5 para la salida de datos IQ)	9 KHz a 6.2 GHz	450 W max.	\$1,309,030.00
Rohde & Schwarz	FSV4 (con la opción FSV-B17; interfaz digital)	10 Hz a 4 GHz	90 W Max. 180 W con todas las opciones	\$361,474.00
Rohde & Schwarz	FSVR7 (con la opción FSV-B17; interfaz digital)	10 Hz a 7 GHz	150 W. Max. 250 W con todas las opciones	\$849,046.00
Rohde & Schwarz	FSW8 (con la opción FSW-B17; interfaz digital)	2 Hz a 8 GHz	150 W sin opciones 250 W con todas las opciones	\$667,108.00

Tabla 4.6: Características de analizadores de espectro⁷

Las necesidades básicas del analizador de espectro se resumen en la compatibilidad con el equipo de grabación de RF y en poder desplegar los 6 MHz de la señal ATSC, entonces, de acuerdo a la tabla 6 todos los equipos revisados cumplen con estos requerimientos. El analizador de espectro que se eligió es el equipo R&S FSV4, ya que es el equipo con un costo menor, y además, tiene el más bajo consumo de energía.

4.2.4 Receptores comerciales de ATSC

Para tener una visualización directa de cómo se está recibiendo el contenido, es muy recomendable contar con receptores comerciales del estándar ATSC. La reproducción del contenido de ATSC in situ en las pruebas de campo solo serviría como comprobación de la transmisión, ya que el análisis de la señal se realizaría con los datos recabados con los equipos de análisis y digitalización. Para este propósito se debe contar con receptores cuyos tamaños sean adecuados para la instalación dentro de una unidad móvil. En esta tesis se propone un tamaño del receptor de 32 pulgadas, ya que no son pantallas muy grandes ni muy pequeñas por lo cual son de fácil instalación en una unidad móvil.

En la Revista del consumidor del mes de diciembre del 2013 se presentó un estudio de calidad de pantallas LCD LED [36], donde se exponen diferentes marcas de televisiones y la sensibilidad del receptor.

A continuación se muestran los diferentes televisores y su calidad de recepción.

⁷ Consultado el: 30/09/2015 en: www.tek.com, www.rohde-schwarz.com.mx/es/products/, www.testequity.com y www.used-line.com.

Marca	Modelo	Calidad de recepción
Panasonic	Viera TC-L32B6X	Alta
Toshiba	32L3200UM	Alta
Sony	Bravia KDL-32R4 00A	Promedio
Samsung	UN32EH4003F	Promedio
LG	32LN530B	Promedio
Atvio	ATV3213LED	Promedio-Baja
AOC	LE32W164	Baja
TLK	TLK-40LED	Baja

Tabla 4.7: Calidad de recepción de distintos receptores comerciales

Con el fin de no llevar varios receptores con diferentes calidades de recepción y, junto con esto, no agrandar el consumo de potencia, se propone llevar solo un receptor comercial con una calidad de recepción promedio para tener una referencia visual de la recepción. El costo aproximado de los receptores con calidad promedio mencionados ronda entre los \$6000 y \$7000 pesos mexicanos.

4.3 Evaluación de los equipos de la etapa de control y almacenamiento del sistema

En esta última etapa del sistema se utilizará una computadora tipo laptop en la cual se interconectará todo el equipamiento que hasta ahora se ha descrito y que formará parte del sistema de captura de medidas, de ahí que a esta computadora se le designe como equipo de control. A esta computadora, además, se le conectará un disco duro externo que sirva para el almacenamiento de datos de las señales recibidas. Por último, un receptor GPS está incluido para geolocalizar (tanto en tiempo, como en espacio) los puntos donde se realizarían las medidas.

4.3.1 Equipos de control

El equipo que controlará el sistema de captura de medidas será una computadora tipo laptop que tenga gran capacidad de memoria, tanto RAM, como de almacenamiento, y con interfaces de alta velocidad para transferencia de datos, como USB 3.0 o Gbit Ethernet. Para las unidades de memoria se toma en cuenta una RAM mínima de 2 GB y una capacidad de almacenamiento preferentemente de 1 TB.

En la siguiente tabla se enlistan algunos equipos que cumplen con la mayoría de las condiciones necesarias.

De forma aproximada, una laptop de estas características tiene un valor entre \$20,000 y \$30,000 pesos mexicanos.

Marca	Modelo	Procesador	RAM	Disco duro	USB 3.0	GB Ethernet	Consumo de potencia
Acer	Aspire V5-473-5869	Intel Core i5-4200U Dual-core 1.60 GHz	4 GB	1 TB	Si	Si	65 W
Lenovo	ThinkPad L440	Intel Core i7-4600M (3.6 GHz)	8 GB	1 TB	Si	Si	65 W
DELL	XPS 13	Intel Core i7-5500U (3 GHz)	8 GB	256 GB SSD	Si	No	45 W
Msi	GT70 OND	Intel core i5/i7	Max. 32 GB	500 GB/750 GB SATA 7200 RPM HDD	Si	Si	No especifica

Tabla 4.8: Computadoras tipo laptop⁸

Cualquiera de estos modelos pueden ser propuestos para el sistema, en este caso se propondrá el equipo Lenovo ThinkPad L440 por tener, en conjunto, las mejores capacidades de memoria RAM y de Disco duro.

4.3.2 Equipos de geolocalización

Los receptores GPS servirán al sistema de captura de medidas para geolocalizar en tiempo y espacio las medidas.

En este caso se contará con dos tipos de receptores GPS, uno es el que forma parte del equipo de análisis de señales (R&S ETL, opción TSMX-PPS2) el cual será la referencia para las medidas tomadas en pruebas de campo. Otro es un GPS con conexión USB para usar con la computadora. Es bueno tener en cuenta dos referencias del GPS para respaldar datos y evitar problemas posteriores.

Algunos receptores GPS que tienen conexión con una computadora mediante USB se muestran en la tabla 4.9:

Marca	Modelo	Sensibilidad	Canales/satélites	Velocidad de actualización	Costo aprox. [MXN]
GlobalSat	BU-353S4	-163 dBm	48	1 Hz	\$502.00
HICOM	HI-206USB	-159 dBm	20	1 Hz	\$941.00
San Jose Technology	GM-48-UB	-150 dBm	50	1 Hz	\$1,871.00
Garmin	Foretrex 401	-----	>12	1 Hz	\$4,337.00

Tabla 4.9: Receptores GPS con conexión USB⁹

⁸ Consultado el: 29/09/2015 en: www.acer.com, www.shop.lenovo.com/mx, www.dell.com y www.msi.com.

⁹ Consultado el: 29/09/2015 en: www.lacasadelgps.com, www.usglobalsat.com, www.es.sanav.com, www.buy.garmin.com y www.amazon.com.

De estos modelos de receptores GPS cualquiera puede ser usado en el sistema de captura de medidas. Al ver sus opciones técnicas, de forma general, el GPS Globalsat tiene una mejor sensibilidad y un buen número de canales, por lo que este es el que se propone para formar parte del sistema.

4.3.3 Equipos de almacenamiento

El contar con uno o varios discos duros externos permite crear una base de datos de todas las mediciones realizadas. El número de unidades es variable dependiendo de la duración que tengan las pruebas. La utilización de las unidades de almacenamiento se haría directamente con la computadora, con la cual se vaciarían los datos a la unidad periódicamente, y de esta manera, se irá formando la base de datos de la campaña de medidas.

Las interfaces de las unidades de disco duro más comunes son la USB 2.0 y 3.0, siendo esta última la más veloz, por lo que sería lo más recomendable para la transferencia de datos.

Algunos equipos que cuentan con interfaz USB 3.0 y una capacidad mayor o igual a 1 TB se muestran en la siguiente tabla (tabla 4.10).

Marca	Modelo	Memoria	Costo [MXN]
Toshiba	HDTD210XK3	1 TB	\$1,499.00
Toshiba	HDTC820XK3C1	2 TB	\$2,549.00
Adata	HV611	1 TB	\$1,250.00
Seagate	Backup Slim	2 TB	\$2,100.00
Adata	HV 620	2 TB	\$2,110.00

Tabla 4.10: Unidades comerciales de almacenamiento externo¹⁰

De estos equipos no importa cual se seleccione, sin embargo, se propone usar los equipos con más memoria para optimizar la cantidad de equipos.

4.4 Sistema de alimentación

Esta parte del sistema se encargará de proporcionar la energía suficiente para alimentar el sistema de captura de medidas. Para ello se utilizará un inversor conectado directamente a la batería de la unidad móvil, la cual deberá estar encendida mientras se esté utilizando el inversor para que no descargue la batería.

Para la selección del inversor es necesario conocer aproximadamente el consumo de potencia total del sistema de captura de medidas. Para ello, se revisó en las especificaciones dadas por el fabricante (consultar Anexo A) el valor de consumo de potencia de cada equipo, considerando el valor máximo (si lo hay) para tener en el cálculo un exceso de potencia que servirá como respaldo en caso de requerir más energía. Posteriormente, se sumaron estos valores obtenidos para obtener el valor total del consumo requerido.

¹⁰ Consultado el: 30/09/2015 en: www.bestbuy.com.mx y www.prodigycomputacion.com.mx.

El cálculo se muestra en la siguiente tabla:

Equipo	Consumo [W]
Equipo de análisis	140
Equipo de grabación de RF	60
Receptor comercial	60 aprox.
Analizador de espectro	180
Laptop	60 aprox.
Consumo total	500

Tabla 4.11: Consumo de energía del sistema de captura de medidas

El consumo total del sistema resulta de 500 W, por lo que el inversor debe suministrar más de esta potencia. Algunos inversores con una salida mayor a 500 W se muestran en la tabla 4.12.

Marca	Modelo	Descripción	Costo [MXN]
Steren	INV-600	Inversor de 12 Vcc a 110 Vca de 600 W	\$1,290.00
Steren	INV-1000	Inversor de 12 Vcc a 110 Vca de 1000 W	\$2,590.00
Truper	INCO-750	Inversor de 12 Vcc a 120 Vca con puerto USB de 750 W	\$1,170.00
Truper	INCO-1000	Inversor de 12 Vcc a 120 Vca con puerto USB de 1000 W	\$2,490.00
Smartline	I1222010	Inversor de 12 Vcc a 220 Vca de 1000 W	\$2,000.00
Powerbright	ERP900-12	Inversor de 12 Vcc a 220 Vca de 900 W	\$1,042.00

Tabla 4.12: Inversores con potencia de salida entre 600 y 1000 W¹¹

De estos, los inversores que más se ajustan al consumo necesario son el INV-600 de Steren y el INCO-750 de la marca Truper. Para tener un margen mayor de energía se propone el uso del modelo INCO-1000, el cual proporciona el doble de potencia requerida en caso de requerir un consumo extra de energía.

4.5 Propuesta del sistema de captura de medidas

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, la propuesta de sistema de captura de medidas se compone de una antena, un equipo de análisis de señales de RF, un equipo de digitalización de señales de RF, receptores comerciales, una computadora laptop, un receptor de GPS y una unidad o varias unidades de almacenamiento. Todos estos elementos se seleccionaron en este capítulo y a continuación se presenta su integración para formar el sistema de captura de medidas propuesto en esta tesis.

Además, en el subcapítulo 4.5.3, se habla del equipo accesorio que requiere el sistema de captura de medidas para interconectarse, el cual se conforma de un divisor de potencia, cables y adaptadores.

Para los equipos R&S ETL y R&S IQR100, el proveedor permite la instalación de complementos de tipo software y hardware, esto con el fin de personalizar el equipo para

¹¹ Consultado el: 04/10/2015 en: www.steren.com.mx, www.truper.com.mx, www.smartline.com.mx y www.powerbright.com.

las necesidades que se requieran. Estos complementos se ilustran más adelante en este apartado.

Al final se muestran los costos de los equipos que conforman la propuesta del sistema de captura de medidas para hacer una estimación del costo total del sistema.

4.5.1 Equipamiento del sistema de captura de medidas

La figura 4.6 muestra el diagrama de la propuesta del sistema de captura de medidas para señales SFN-ATSC. A continuación se detallan sus partes.

La antena es un elemento que puede variar dependiendo la frecuencia a utilizar, por lo que en el sistema tomaremos la antena omnidireccional R&S HF214, la cual abarca gran parte de la banda UHF y cuya ganancia se mantiene estable alrededor de 0.5 y 2 dBi. También para esta banda se tiene la antena directiva R&S HL033.

Posteriormente la señal llega a un divisor de potencia, este se encargará de distribuir la señal recibida al equipo R&S ETL, al analizador de espectro R&S FSV4 y al receptor comercial.

El equipo de grabación R&S IQR100 requiere estar interconectado con el analizador de espectro, el cual hace la función de recepción de la señal y transfiere los datos I/Q al equipo de grabación de RF. El equipo R&S ETL puede estar conectado a la laptop vía Ethernet para tener un control remoto del mismo, mientras que el equipo R&S IQR100 solo tendría interconexión con la laptop, vía USB o Ethernet, cuando se desee transferir su información a la unidad de almacenamiento (disco duro).

Finalmente, la laptop tiene conectado el receptor GPS y se debería interconectar con el disco duro para descargar los datos obtenidos cada vez que se requiera.

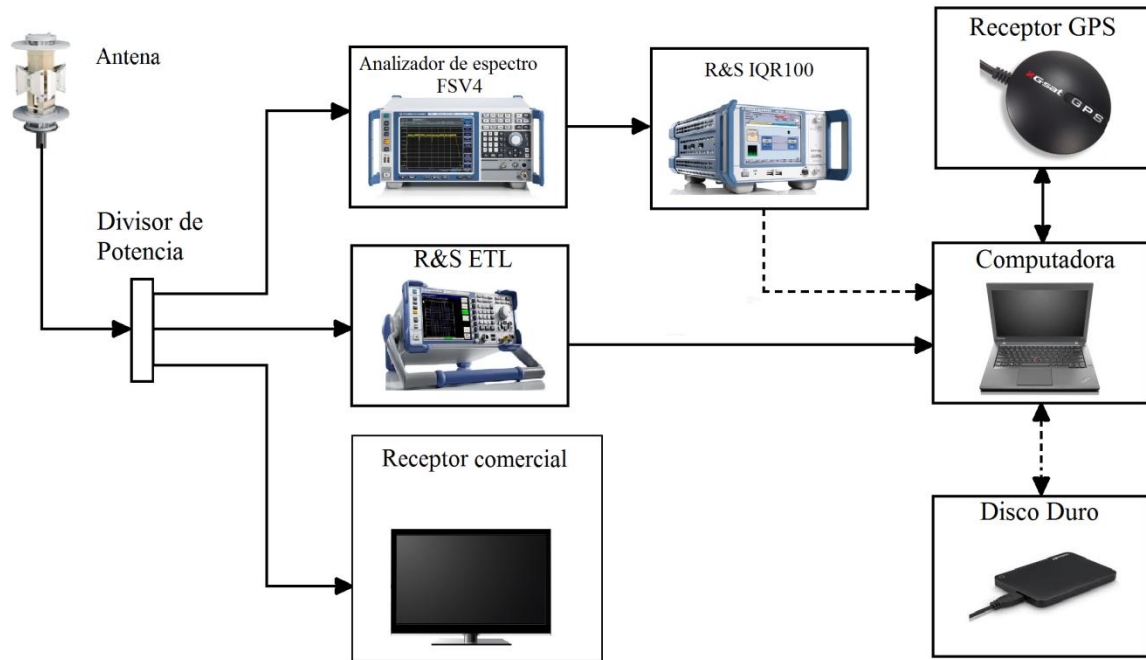


Figura 4.6: Diagrama de bloques del sistema de captura de medidas propuesto

4.5.2 Complementos propuestos para los equipos R&S ETL y R&S IQR100

Para los equipos R&S ETL y R&S IQR100 el proveedor brinda diferentes opciones que se pueden añadir a estos equipos para adecuar o mejorar sus características técnicas de acuerdo a su aplicación. A continuación, se describen las opciones propuestas, referidas con el nombre asignado por el proveedor, para los equipos para adecuarlos al sistema de captura de medidas.

Para el equipo IQR100 se tienen los siguientes complementos:

Opción	Descripción
R&S IQR100	Equipo IQR optimizado para memorias SSD, con tasa de muestreo de 99.5 MS/s.
R&S IQR-B119F	Paquete de memoria SSD de 1.92 TB, hasta 400 MB/s.
R&S IQR-K101	Opción para poder importar y exportar datos I/Q vía Ethernet o USB.

Tabla 4.13: Complementos para el equipo R&S IQR100

Por otro lado, para el equipo R&S ETL, se propone configurarse con las siguientes opciones:

Designación	Opción	Descripción
RF Preselector	R&S [®] ETL-B203	Conector tipo F con una impedancia de 75 Ω.
Measurement Log	R&S [®] ETL-K208	Esta opción permite documentar información obtenida durante largos periodos de medición. Durante la medición puede graficar los valores de dos parámetros seleccionados.
ATSC/8VSB Firmware	R&S [®] ETL-K220	Esta opción permite al equipo medir y analizar señales del estándar ATSC.
ATSC/8VSB SFN Frequency Offset	R&S [®] ETL-K221	Muestra el desplazamiento en frecuencia de la señal eco, relativa a la frecuencia de la señal principal.
Broadcast Drive Test Software	R&S [®] ETL-BC Drive	Hace posible capturar y grabar la calidad de la señal al hacer mediciones en campo y las muestra en un mapa.
OCXO Reference Frequency	R&S [®] FSL - B4	Oscilador de referencia. Aporta una señal de alta precisión con frecuencia de 10 MHz.
GPS	TSMX-PPS2	GPS usado como referencia.

Tabla 4.14: Complementos para el equipo R&S ETL

El preselector actúa como un filtro en la primera etapa del receptor, ayudando a rechazar señales espurias o la frecuencia imagen, por estas razones es el conector propuesto a utilizarse.

Con el complemento K220, se habilita la medición de los parámetros mencionados anteriormente en el apartado 4.2.1. Para la instalación del complemento K221 se requiere contar con el complemento K220. Esta opción (K221) también muestra gráficamente el desplazamiento de frecuencia para cada eco que se recibe en relación con la señal principal.

4.5.3 Material accesorio para el sistema de captura de medidas

Teniendo ya definido el sistema de captura de medidas se seleccionaron los accesorios necesarios para la interconexión del equipamiento.

Este material se describe conforme las etapas del sistema, comenzando con la antena.

Las antenas, el analizador de espectro y el analizador R&S ETL tienen un conector tipo N hembra con impedancia de 50 Ω, sin embargo, este último, tendría agregado el preselector de RF, descrito en el apartado anterior, el cual tiene una entrada tipo F de 75 Ω. Finalmente, el receptor comercial de ATSC también tiene una entrada tipo F con impedancia de 75 Ω.

Todos estos equipos se interconectarán a través del divisor de potencia, por lo tanto, los requerimientos de los conectores, cables y acopladores dependerán de este. Actualmente, existe una gran variedad de divisores de potencia, fabricados por un gran número de empresas, por lo que la selección de un modelo específico es muy variable. Entonces, se revisaron y compararon los proveedores Pasternack y Steren, sin embargo, hay muchos otros ejemplos de empresas que venden este tipo de accesorios, tales como AH Systems, Amphenol, Andrews Communications Systems, Suhner, etc.

El requerimiento del sistema es que la señal se distribuya a los tres equipos, por lo que el divisor de potencia debería ser de una entrada y tres salidas, sin embargo, se podría utilizar uno, por ejemplo con cuatro salidas, conectándole una carga con la impedancia requerida a la salida que no sea utilizada para no desacoplar el sistema.

El divisor de potencia Pasternack modelo PE2007 tiene una entrada y tres salidas con conectores BNC hembra con impedancia de 50Ω y opera en frecuencias desde 2 MHz hasta 200 MHz, el cual sirve para hacer pruebas en la banda VHF de televisión. Otro modelo con un mayor rango de frecuencias es el PE2004, el cual trabaja en el rango de 10 MHz hasta 1 GHz, sin embargo, tiene cuatro salidas BNC hembra con impedancia de 50Ω , con este divisor se abarcan las bandas VHF y UHF de televisión, por esta razón será el divisor propuesto para el sistema y se tomará como guía para los demás accesorios. Como ya se mencionó, al usar este divisor de potencia, se le conectaría una carga con impedancia de 50Ω de tipo BNC a una de sus cuatro salidas. Entonces, se usarían cuatro cables con terminales BNC macho e impedancia de 50Ω . En la antena y en el analizador de espectro se utiliza un adaptador de BNC hembra a N macho, ambos con impedancia de 50Ω ; y en el equipo de análisis y en el receptor comercial un adaptador-acoplador de BNC hembra con impedancia de 50Ω a F macho con 75Ω de impedancia.

Steren también cuenta con divisores de potencia de tres y cuatro salidas con frecuencias de trabajo que llegan hasta 2 GHz. El principal inconveniente de estos es que tienen una mayor pérdida de inserción, la cual varía desde 3 hasta 7 dB dependiendo del modelo, además de que utilizan conectores tipo F con impedancia de 75, por lo que además se requieren acopladores de impedancia.

En la tabla 4.15 se detallan las características técnicas del material accesorio propuesto, además de sus costos. También se muestran características de accesorios extras similares al material propuesto para comparar costos y observar la variedad de estos elementos.

Accesorio	Características	Costo	Núm. de accesorios requerido
Material accesorio propuesto			
Divisor de potencia Pasternack PE2004	1 entrada y 4 salidas tipo BNC, impedancia de 50 Ω, 10 MHz – 1 GHz, pérdidas de inserción máximas de 2 dB.	\$425 [USD]	1
Adaptador PE 9002	BNC hembra a N macho, 50 Ω	\$18.55 [USD]	2
Adaptador-acoplador PE9151	BNC hembra 50 Ω a F macho 75 Ω	\$12.99 [USD]	2
Cables BNC Pasternack PE3067	BNC macho-macho, RG58, 50 Ω, 1 m	\$22.66 [USD]	4 cables; 3 de 1 m y 1 de 12 m
Cable USB Steren USB-306	USB macho-macho, 1.8 m	\$29 [MXN]	1
Cable Ethernet Steren 368-510GR	UTP categoría 6 con conectores macho RJ45, 3m	\$120 [MXN]	2
Carga Pasternack PE6000-50	Tipo BNC, 50 Ω, hasta 1 GHz	\$19.36 [USD]	1
Material accesorio de referencia			
Divisor de potencia Pasternack PE2007	1 entrada y 3 salidas tipo BNC, impedancia de 50 Ω, 2 MHz – 200 MHz, pérdidas de inserción máximas de 2 dB.	\$314.5 [USD]	1
Divisor de potencia Steren 201-203	1 entrada y 3 salidas tipo F, impedancia de 75 Ω, 5 MHz – 1 GHz, pérdidas de inserción en un puerto de 3.5 a 4.5 dB y de 6.8 a 8.2 dB en los restantes	\$59 [MXN]	1
Divisor de potencia Steren 201-204	1 entrada y 4 salidas tipo F, impedancia de 75 Ω, 5 MHz – 1 GHz, pérdidas de inserción de 6.8 a 8.2 dB.	\$69 [MXN]	1
Adaptador PE 9278	BNC hembra a N macho, 50 Ω	\$50.1 [USD]	2
Adaptador-acoplador PE9151 PE7068	BNC hembra 50 Ω a F macho 75 Ω	\$94.72 [USD]	2
Carga Pasternack PE6156	Tipo BNC, 50 Ω, hasta 4 GHz	\$22.76 [USD]	1

Tabla 4.15: Material accesorio requerido para el sistema de captura de medidas¹²

El analizador de espectro se interconecta con el equipo R&S IQR100 mediante un cable MDR de 26 pines, este es proporcionado por el fabricante.

Posteriormente, para la interconexión con la computadora, el GPS se conecta vía USB al igual que la unidad de almacenamiento, ambos equipos proporcionan el cable USB al adquirirlos. El equipo R&S ETL (si se requiere) se conecta con cable Ethernet a la laptop y el equipo R&S IQR100 mediante interfaz USB o Ethernet al descargar los datos. Por lo tanto, resulta conveniente contar con un cable Ethernet y otro cable USB en caso de ser requeridos.

La figura 4.7 muestra el diagrama de la propuesta del sistema de captura de medidas incluyendo el material accesorio mencionado.

¹² Consultado el 14/10/2015 en: www.pasternack.com y www.steren.com.mx.

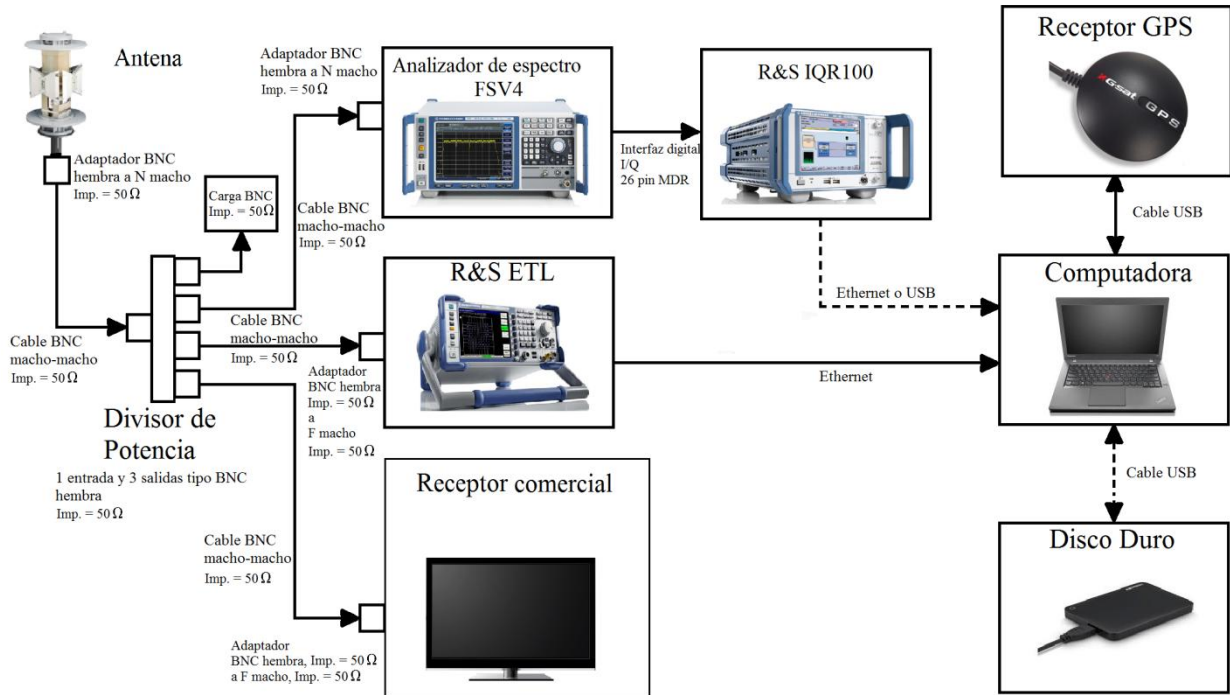


Figura 4.7: Diagrama de la propuesta del sistema de captura de medidas con material accesorio

4.5.4 Costo total aproximado del sistema de captura de medidas

Como último detalle se calculó el costo total aproximado del sistema de captura de medidas. Aquí se suman los costos de los elementos que se fueron seleccionando a lo largo de este capítulo. Se tomó en cuenta la utilización de 5 discos duros con capacidad de 2 TB, en conjunto resultan 10 TB de memoria para el almacenado de la información. Para el equipo R&S ETL, se incluye el costo del equipo con los complementos de la tabla 4.14 ya agregados. Para los cables BNC se propone agregar 3 cables de 1 metro para la interconexión de los equipos con el divisor, y 1 cable de 12 metros para la conexión de la antena al divisor, esto para permitir la instalación de la antena a un mástil con una altura de 10 metros.

Para la conversión de moneda de [USD] a [MXN] se usó el siguiente tipo de cambio: \$1 [USD] = \$16.57 [MXN].

Equipo	Costo aproximado [MXN]
Antena	\$141,789.00
Analizador de E. R&S FSV4	\$361,474.00
Equipo R&S IQR100	\$343,562.00
Equipo R&S ETL	\$796,750.00
Receptor comercial	\$6,500.00
Laptop	\$25,000.00
Receptor GPS globalsat	\$502.00
Discos duros	\$10,500.00
Inversor Truper	\$1,170 2,490.00
Material accesorio	\$14,035.00
Suma total	\$1,702,602.00

Tabla 4.16: Costo total aproximado del sistema de captura de medidas propuesto

Aproximadamente, el sistema de captura de medidas tendría un costo de poco más de \$1,700,000 pesos mexicanos.

5 Conclusiones

En esta tesis se ha propuesto un sistema de captura de medidas en campo para recibir y analizar señales de televisión digital con el estándar ATSC transmitidas en redes SFN. El alcance de la propuesta es la definición e interconexión del equipamiento del sistema y una estimación de su costo total, los cuales se basaron en una revisión de los requerimientos de los parámetros de señal en las medidas en campo, y en una búsqueda, evaluación y comparación de los equipos comerciales existentes que satisficieran las necesidades técnicas del sistema.

Con este sistema se podrían realizar pruebas de campo en estas condiciones para mejorar el desempeño de los receptores y/o la planificación de las redes SFN con el este estándar.

El sistema de captura de medidas propuesto está conformado por tres etapas generales:

- Etapa de Recepción y distribución de RF. Está conformada, básicamente por la antena receptora.
- Etapa de Análisis, digitalización y monitoreo. En esta etapa se encuentran los equipos de análisis de RF, el equipo de grabación de señales de RF y un receptor comercial de ATSC.
- Etapa de Control y almacenamiento. Esta etapa se compone de una computadora tipo laptop, un receptor GPS y uno o varios discos duros externos.

El sistema hace uso de dos antenas calibradas que operan en las bandas de frecuencia VHF y UHF, una omnidireccional, para recibir las señales y multitrayectos desde todas direcciones; y una antena direccional, para hacer pruebas apuntándola directamente a cada transmisor que conforme la red SFN.

Las capacidades del equipo de análisis de señales de RF que se propone son suficientes para registrar y analizar los parámetros de la señal ATSC que se deberían registrar en las medidas, los cuales son: el nivel de señal, la relación C/N, el BER, el MER, la respuesta al impulso del canal, el espectro de la señal y el diagrama de constelación. Para la consideración de estos parámetros se tomaron en cuenta algunos documentos como el estándar ATSC A/53, las recomendaciones A/54 y A/74 de ATSC, y el informe UIT-R BT.2035-2 de la UIT.

Una forma de optimizar los recursos utilizados en la campaña de medidas de campo es usar un equipo que grabe y almacene la señal de RF que se reciba. De esta forma, los datos recabados podrán ser usados para la realización de más pruebas en un laboratorio. Para este

fin, el equipo de grabación de RF propuesto para el sistema opera a una frecuencia de muestreo máxima de 99.5 M muestras/s y una capacidad de memoria de 1.9 TB.

La utilización de un receptor comercial sale de la necesidad de observar el contenido que se está transmitiendo, lo que proporciona una forma rápida y común de verificar si efectivamente hay recepción de la señal de ATSC.

Para el control del sistema se propone el uso de una laptop con un procesador veloz, suficiente memoria RAM y la memoria interna necesaria. Este equipo puede controlar (si se desea) los equipos de análisis y de grabación. Finalmente, la propuesta de sistema requiere de un receptor GPS para geolocalización de las medidas, y la posibilidad de conectar unidades externas de almacenamiento para la descarga de los datos obtenidos en campo.

La selección de los equipos que forman la propuesta fue el resultado de hacer una búsqueda exhaustiva de modelos de diferentes fabricantes que cumplieran con los requerimientos definidos. Entonces, se evaluaron y compararon sus especificaciones técnicas para decidir el equipamiento final. En la propuesta también se recomiendan algunos de los complementos que los fabricantes proveen para sus equipos, con el fin de hacer el sistema más eficiente para las medidas de ATSC en redes SFN. Finalmente, además del equipamiento, la propuesta también incluye el material accesorio necesario para la interconexión del mismo, como divisores de potencia, cables, adaptadores y conectores.

Por último, como resultados de la tesis, por un lado, se calculó la potencia promedio que consumiría todo el equipamiento y se proponen algunos modelos de inversores de corriente que serían suficientes para alimentar todo el sistema de captura de medidas. Por otro lado, se hizo una estimación del costo aproximado total del sistema, el cual asciende a poco más de \$1,700,000.

Anexo

A

En este anexo se presentan las características y especificaciones técnicas de todos los modelos de equipos que se mencionaron en el capítulo 4, mediante la información provista por los fabricantes. Se describen los equipos de las primeras dos etapas (etapa de recepción y distribución, y etapa de análisis, digitalización y monitoreo), con excepción de los receptores comerciales, ya que es en donde se manejan equipos específicos. Para la etapa de control y almacenamiento del sistema, los equipos a utilizar son más genéricos y no se profundizó más en sus características.

Etapa de recepción y distribución

En esta etapa es en donde se describen las antenas. En este anexo se presentan sus principales características técnicas y físicas además de mostrar gráficas de ganancia y/o factor de antena en función de su frecuencia.

Antenas omnidireccionales

-R&SHF214

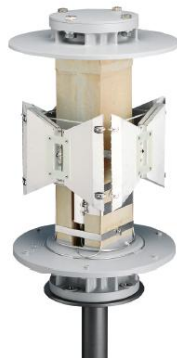
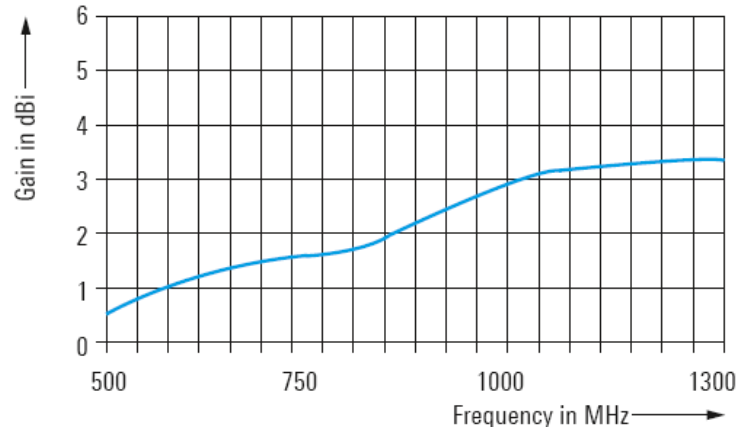


Figura A-1: Antena R&S HF214

Especificaciones	
Rango de frecuencias	500 MHz – 1.3 GHz
Polarización	Lineal horizontal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	< 3 (típica)
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (diámetro x altura)	310 mm x 490 mm
Peso	8 Kg

Tabla A-1: Especificaciones de la antena R&S HF214



Gráfica A-1: Ganancia de la antena R&S HF 214

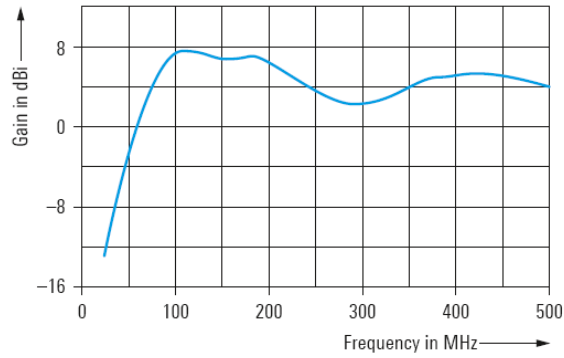
-R&SHE314A1



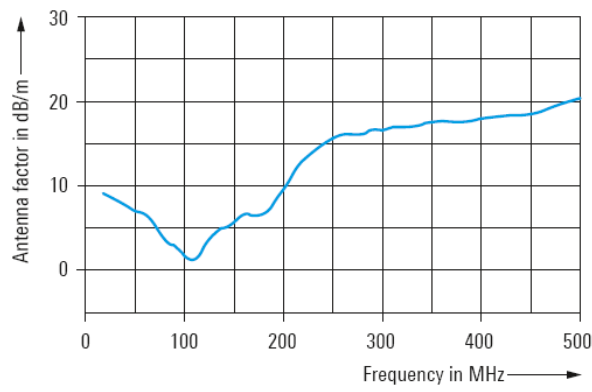
Figura A-2: Antena R&S HE314A1

Especificaciones	
Rango de frecuencias	20 MHz a 500 MHz
Polarización	Horizontal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	<2.5
Fuente de alimentación	18 V a 30 V DC (340 mA (tip.))
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundo)	1 m x 0.3 m x 1 m
Peso	8 Kg

Tabla A-2: Especificaciones de la antena R&S HE314A1



Gráfica A-2: Ganancia de la antena R&S HE314A1



Gráfica A-3: Factor de antena de la antena R&S HE314A1

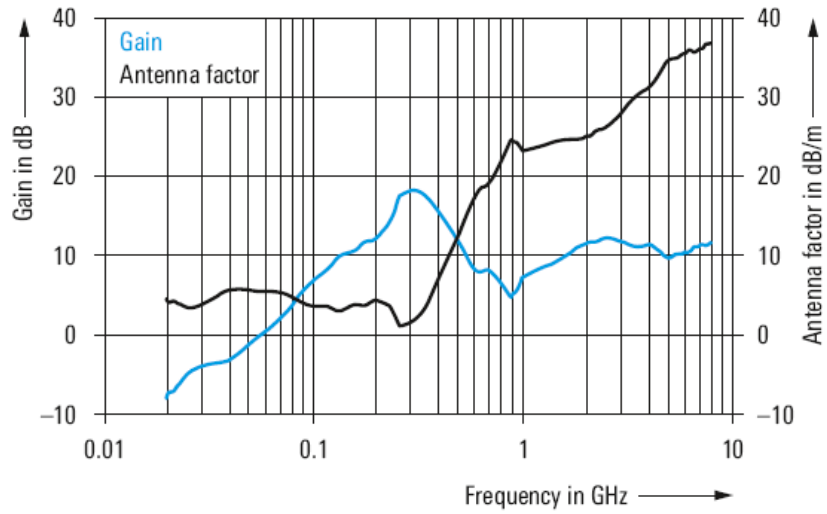
-R&SHE600



Figura A-3: Antena R&S HE600

Especificaciones	
Rango de frecuencias	20 MHz a 8 GHz
Polarización	Vertical
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	< 3; < 2 (tip.)
Fuente de alimentación	15 V a 28 V DC (180 mA (tip.))
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Diámetro x Altura)	135 mm x 550mm
Peso	2 Kg

Tabla A-3: Especificaciones de la antena R&S HE600



Gráfica A-4: Ganancia y factor de antena de la antena R&S HE600

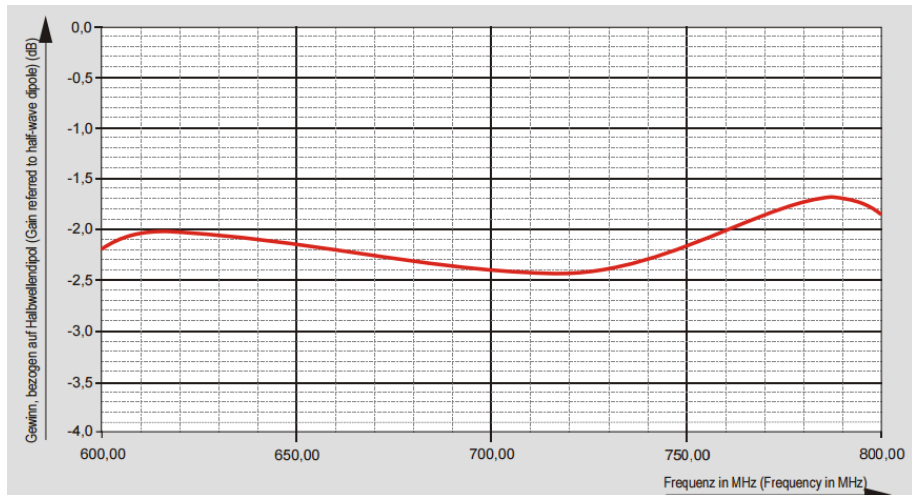
-MA700



Figura A-4: Antena MA700

Especificaciones	
Rango de frecuencias	600 – 800 MHz
Polarización	Vertical
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 1.8
Conector	Tipo N macho
Dimensiones (Diámetro x Altura)	110 mm x 310 mm
Peso	1150 gr

Tabla A-4: Especificaciones de la antena MA700



Gráfica A-5: Ganancia (dBd) de la antena MA700

-MA160

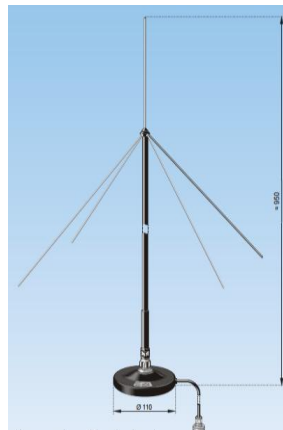
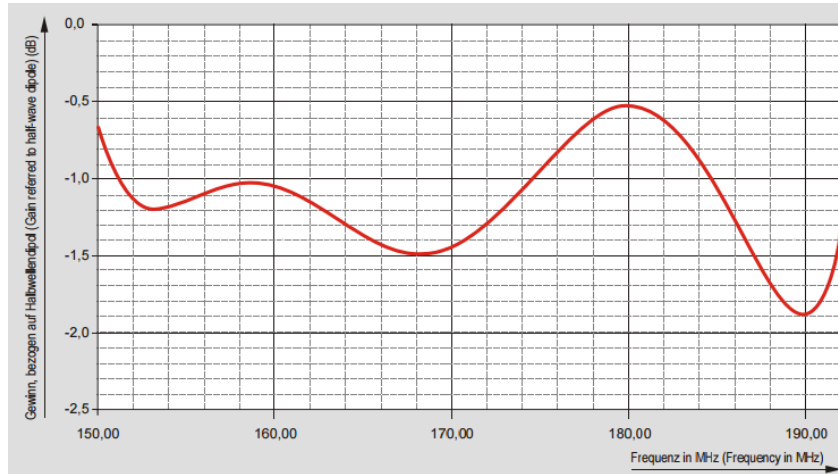


Figura A-5: Antena MA160

Especificaciones	
Rango de frecuencias	150 – 192 MHz
Polarización	Vertical
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 1.8
Conector	Tipo N macho
Dimensiones (Diámetro x Altura)	110 mm x 1102 mm
Peso	1600 gr

Tabla A-5: Especificaciones de la antena MA160



Gráfica A-6: Ganancia (dBd) de la antena MA160

Antenas directivas

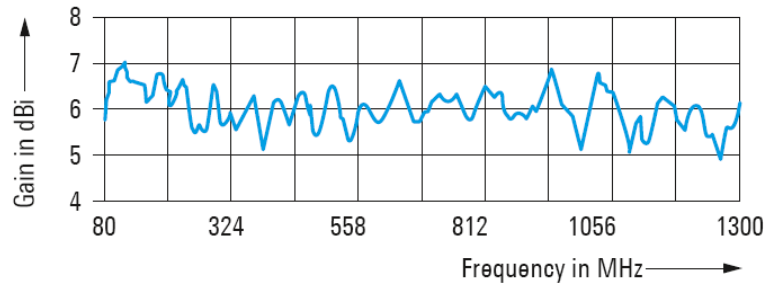
-R&S HL007A2



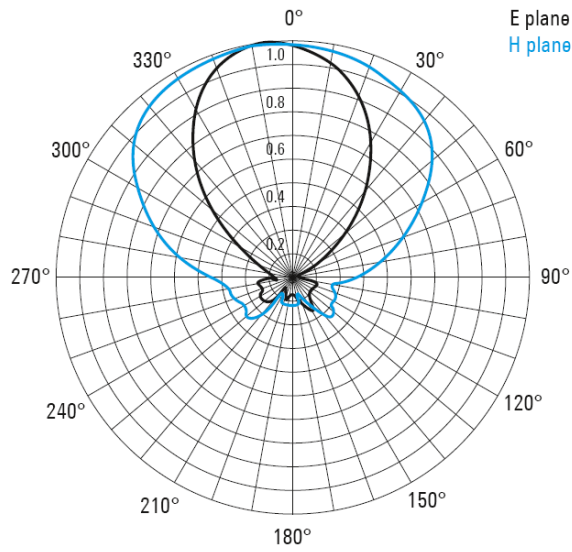
Figura A-6: Antena R&S HL007A2

Especificaciones	
Rango de frecuencias	80 MHz – 1.3 GHz
Polarización	Horizontal, vertical, $\pm 45^\circ$ (opcional)
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 2.5
Conector	Tipo N hembra x2
Dimensiones(Ancho x Alto x Profundo)	2 m x 2.2 m x 1.7 m
Peso	15 Kg

Tabla A-6: Especificaciones de la antena R&S HL007A2



Gráfica A-7: Ganancia de la antena R&S HL007A2



Gráfica A-8: Patrón de radiación de la antena R&S HL007A2

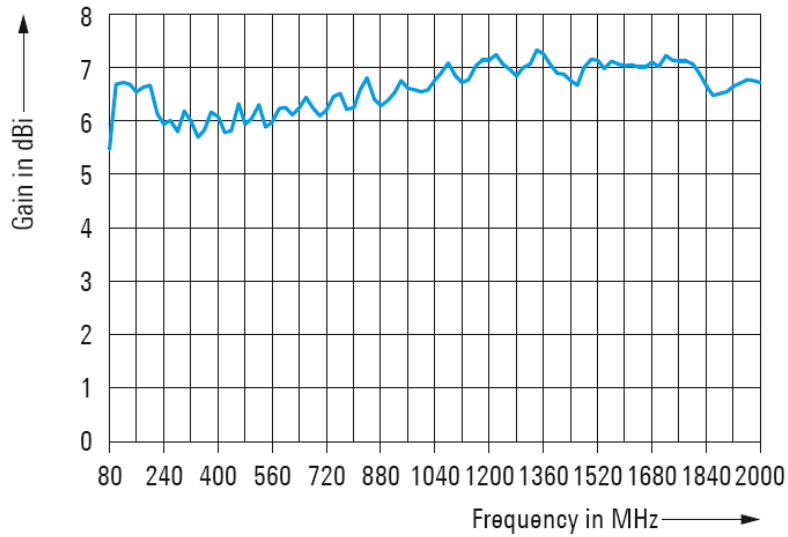
-R&S HL033



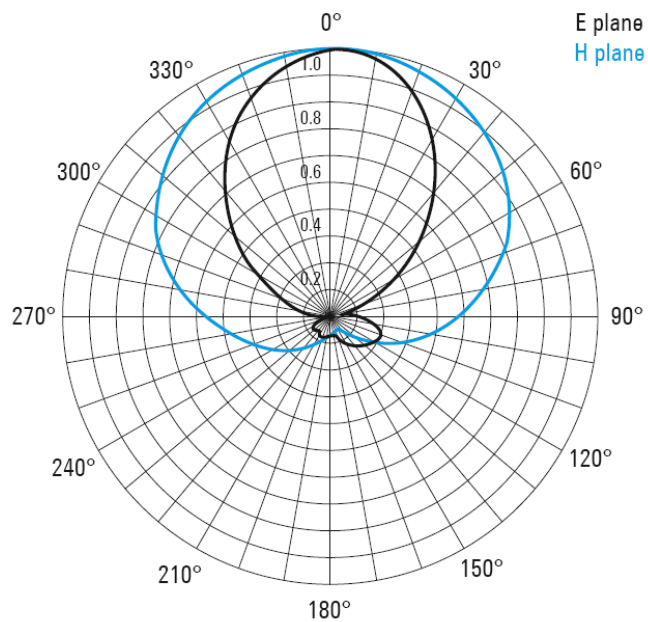
Figura A-7: Antena R&S HL033

Especificaciones	
Rango de frecuencias	80 MHz a 2 GHz
Polarización	Lineal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 2
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Ancho x Alto)	1960 mm x 1800 mm
Peso	5 Kg

Tabla A-7: Especificaciones de la antena R&S HL033



Gráfica A-9: Ganancia de la antena R&S HL033



Gráfica A-10: Patrón de radiación de la antena HL033

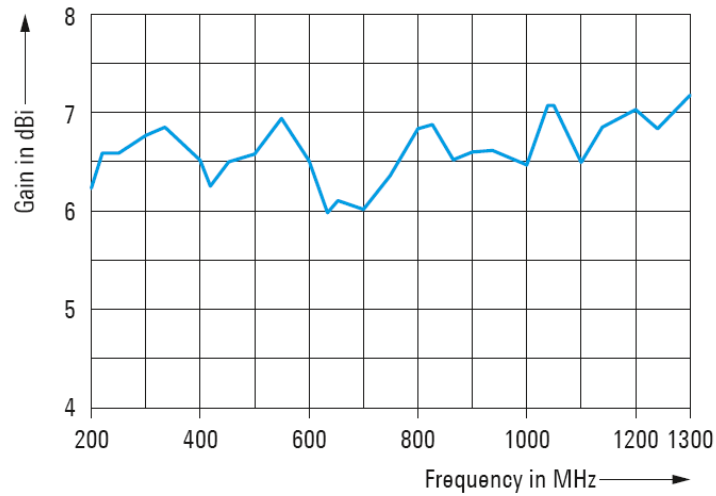
-R&S HL223



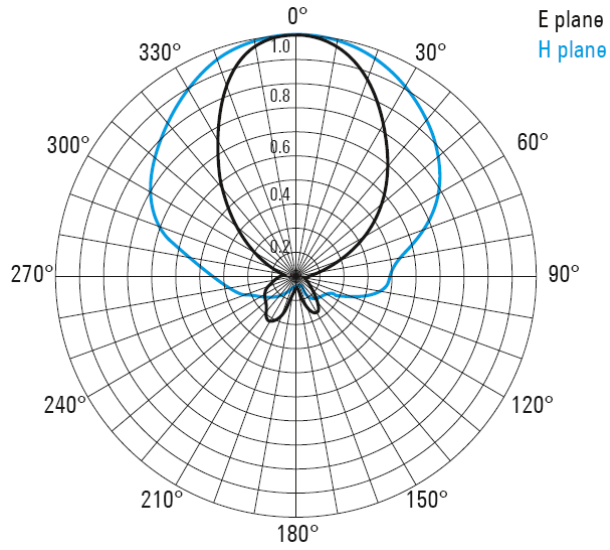
Figura A-8: Antena R&S HL223

Especificaciones	
Rango de frecuencias	200 MHz a 1.3 GHz
Polarización	Lineal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 2 ; 1.6 (tip.)
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundo)	765 mm x 120 mm x 710 mm
Peso	2 Kg

Tabla A-8: Especificaciones de la antena R&S HL223



Gráfica A-11: Ganancia de la antena R&S HL223



Gráfica A-12: Patrón de radiación de la antena R&S HL223

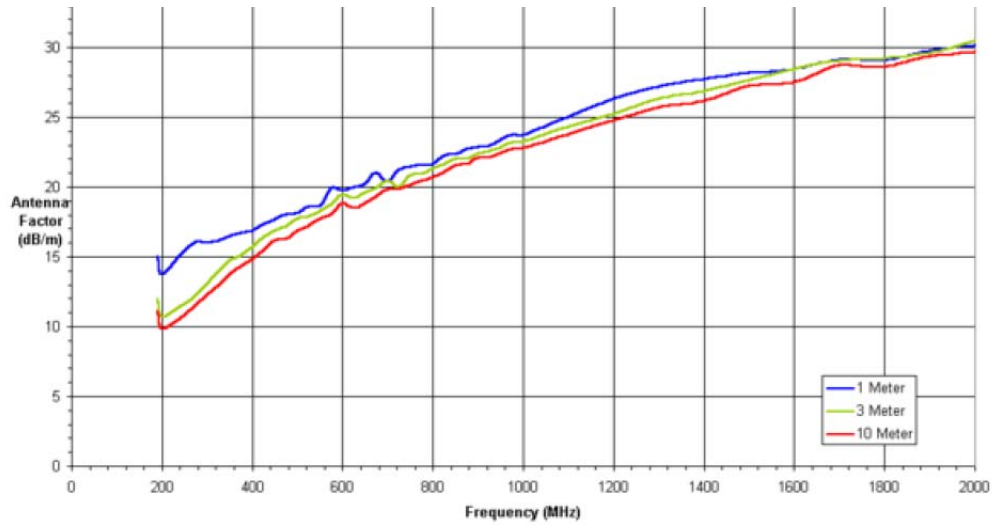
-SAS 512-2



Figura A-9: Antena SAS 521-2

Especificaciones	
Rango de frecuencias	190 MHz a 2 GHz
Polarización	Horizontal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 2; 1.62 (tip.)
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Ancho x Alto)	74.9 cm x 84.4 cm
Peso	1 Kg

Tabla A-9: Especificaciones de la antena SAS 512-2



Gráfica A-13: Factor de antena de la antena SAS 512-2

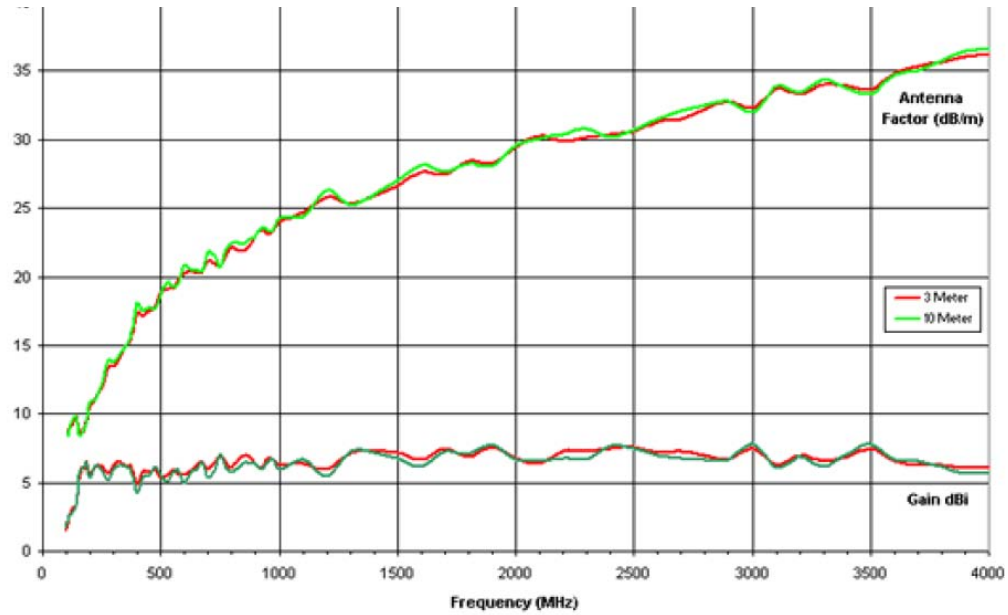
-SAS 515



Figura A-10: Antena SAS 515

Especificaciones	
Rango de frecuencias	120 MHz a 4 GHz
Polarización	Horizontal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 2; 1.6 (tip.)
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Ancho x Alto)	112.5 cm x 84.4 cm
Peso	1.27 Kg

Tabla A-10: Especificaciones de la antena SAS 515



Gráfica A-14: Ganancia y Factor de antena de la antena SAS 515

-SAS 521-2

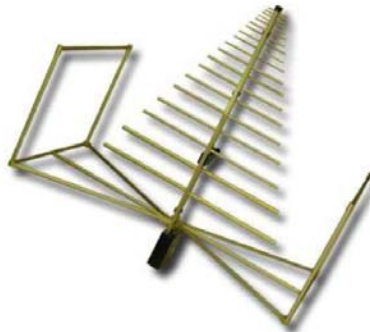
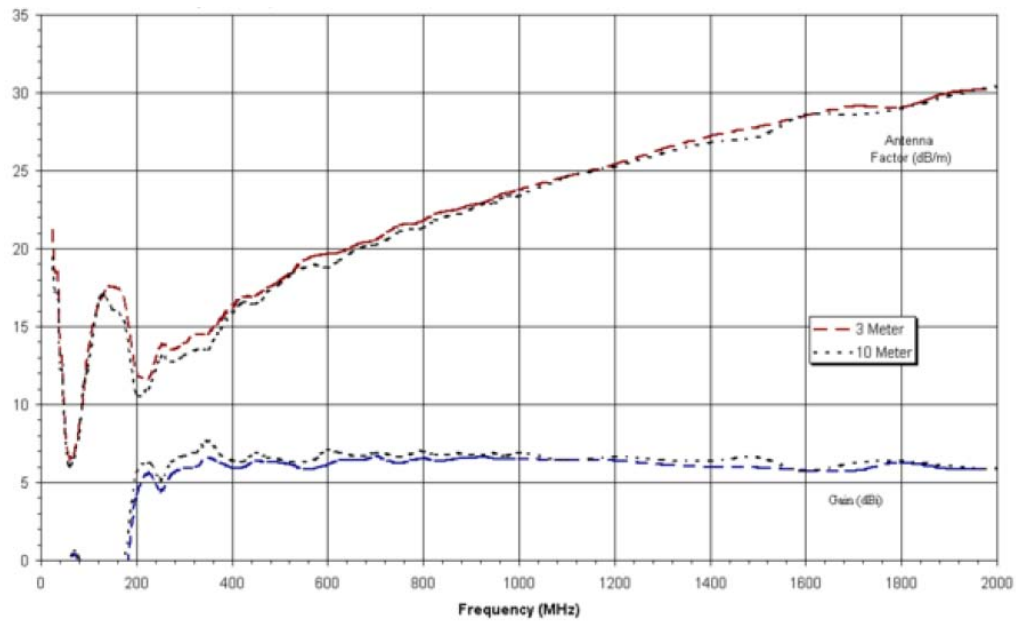


Figura A-11: Antena SAS 521-2

Especificaciones	
Rango de frecuencias	25 MHz a 2 GHz
Polarización	Horizontal
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 2 ; 1.55 (tip.)
Conector	Tipo N hembra
Dimensiones (Ancho x Alto)	98 cm x 95 cm
Peso	2 Kg

Tabla A-11: Especificaciones de la antena SAS 521-2



Gráfica A-15: Ganancia y Factor de antena de la antena SAS 521-2

-Sistema de antenas AS 2x SYA 406 TETRA

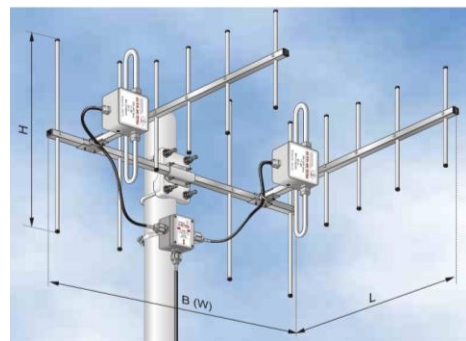
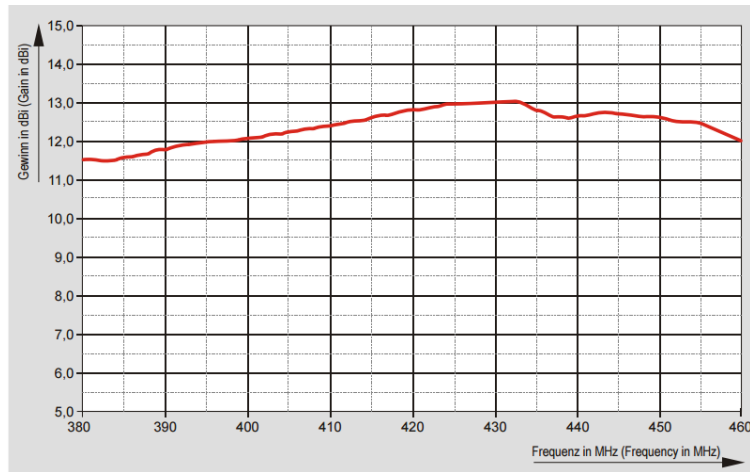


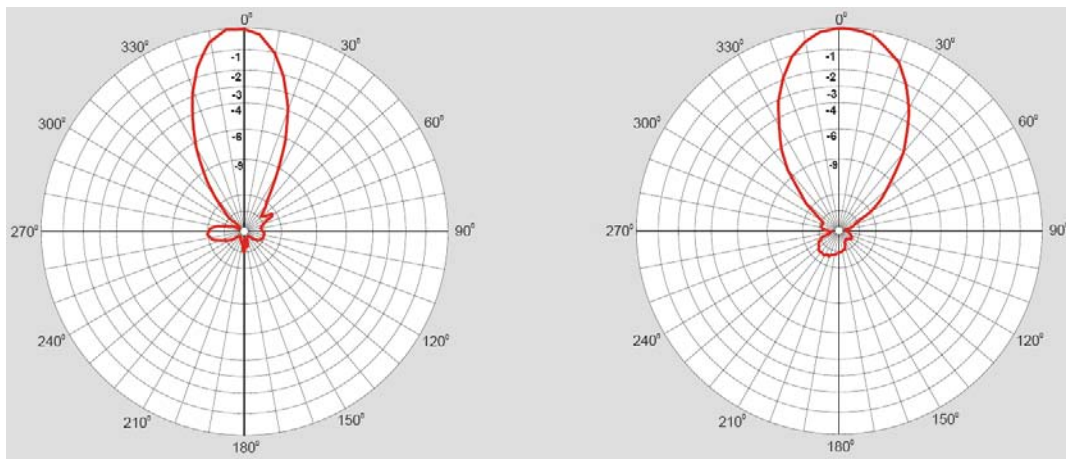
Figura A-12: Sistema de antenas AS 2x SYA 406 TETRA

Especificaciones	
Rango de frecuencias	380 a 460 MHz
Polarización	Vertical
Impedancia de entrada	50 Ω
VSWR	≤ 1.5
Conector	Tipo N hembra en el divisor
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	730 x 775 x 450 mm
Peso	3.05 Kg

Tabla A-12: Especificaciones del sistema de antenas AS 2x SYA 406 TETRA



Gráfica A-16: Ganancia del sistema de antenas AS 2x SYA 406 TETRA



Gráfica A-17: Patrón de radiación del sistema AS 2x SYA 406 TETRA (400 MHz; izquierda: horizontal; derecha: vertical)

Etapa de análisis, digitalización y monitoreo

En este apartado se muestran las principales características físicas y técnicas de los equipos de análisis, de digitalización y de los analizadores de espectro.

Equipos de análisis

-Deviser S7000 TV Analyser



Figura A-13: Deviser S7000 TV Analyzer

Interfaz		Cantidad
Entrada RF	75Ω tipo F	1
HDMI	Salida HDMI	1
USB	USB 2.0	1
LAN	10/100 M	1
Fuente de DC	12V/5 A	1
Entrada GPS	USB	1

Tabla A-13: Interfaces del equipo S7000

Características Generales	
Adaptador AC/DC	AC 100 - 240 V/50-60 Hz DC 12V/5 ^a
Batería	Li-ion, 7.4 V/ 13 Ah
Tiempo de carga	Alrededor de 5 horas
Tiempo de trabajo	5 horas
Dimensiones (ancho x alto x profundo)	245 mm x 194 mm x 105 mm
Peso	2.8 Kg aprox.

Tabla A-14: Características generales del equipo S7000

-Promax HD Ranger + ATSC y Promax HD Ranger 2 ATSC



Figura A-14: Promax HD Ranger + ATSC



Figura A-15: Promax HD Ranger 2 ATSC

Interfaz		Cantidad
Entrada RF	75Ω tipo F	1
USB	Mini USB	1
IP	RJ45 ethernet 10/100/1000 Mbps	1

Tabla A-15: Interfaces del equipo HD Ranger 2 ATSC

Características Generales	
Voltaje externo	12 V DC
Batería	Li-ion, 7.2 V/ 13 Ah
Tiempo de carga	3 horas para tener 80%
Tiempo de trabajo	5 horas en modo continuo
Dimensiones (ancho x alto x profundo)	290 x 185 x 95 mm
Peso	2.2 Kg
Consumo	50 W

Tabla A-16: Características generales del equipo HD Ranger 2 ATSC

-R&S ETL



Figura A-16: R&S ETL

Interfaz		Cantidad
Entrada RF	Tipo N 50Ω	1
USB	USB 1.1	2
LAN	RJ 45	1

Tabla A-17: Principales interfaces del Equipo ETL

Características Generales sin complementos agregados	
Alimentación	100 – 240 V/ 1.8 – 0.4 A; 50-60 Hz
Dimensiones sin asa (ancho x alto x profundo)	342.3 x 158.1 x 367 mm
Dimensiones con asa	408.8 x 158.1 x 465.3 mm
Peso	< 9 Kg
Consumo	Típico: 95 W; máx: 140 W

Tabla A-18: Características generales sin opciones del equipo ETL

Complementos de alimentación del equipo R&S ETL:

R&SETL-B230 DC power supply, 11 V a 19 V		
Rango de voltaje de entrada	11 V a 19 V	
Máxima potencia de entrada	120 W	
Consumo de corriente	6 A – 12 A	
R&SETL-B235 Li-ion battery pack, 10 Ah		
Capacidad	10 Ah	
Voltaje de salida	14.8 V	
Tiempo de operación	90 a 100 minutos	
Voltaje de carga	12 a 28 V	
Tiempo de carga	4 h	Con la pila extraída del equipo, en su cargador.
	7 h	En el ETL en modo standby.
	12 h	En el ETL en modo de operación.
Máxima corriente de carga	3 A	

Tabla A-19: Características de las opciones de batería y fuente de DC para el ETL

-R&S FSH3-TV



Figura A-17: R&S FSH3-TV

Interfaz		Cantidad
Entrada RF	Tipo N 50 Ω	1
Salida de video	BNC, seleccionable, mismo conector que el de video y TS-ASI, 75Ω	1
Salida TS-ASI	BNC, seleccionable, mismo conector que el de video y TS-ASI, 75Ω	1

Tabla A-20: Interfaces del equipo FSH3-TV

Características generales	
Fuente de alimentación AC	100 a 240 V AC; 50 a 60 Hz; 400 mA
Voltaje externo DC	15 a 20 V
Batería interna	Batería de NiMH
Tiempo de operación con batería totalmente cargada	De 3 a 4 horas
Tiempo de carga de la batería	4 horas con el equipo apagado
Consumo de potencia en modo de carga	12 W
Consumo de potencia	De 7 a 10 W
Dimensiones (ancho x alto x profundo)	170 x 120 x 270 mm
Peso	2.7 Kg

Tabla A-21: Características generales del FSH3-TV

Equipos de digitalización

-Cortex RSRS



Figura A-18: Cortex RSR de Zodiac Data Systems

Características	
Tasa de muestreo	5, 10, 20, 40 MS/s
Bits por muestra	8 o 16
Tiempo de grabación	Aprox. 2 horas con el máximo ancho de banda
Almacenamiento	>2TB, disco removible
Montaje	Rack
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	Aprox. 48.26 x 17.78 x 45.21 cm
Peso	30 Kg
Alimentación	100 – 240 V AC 50/60 Hz
Software	Equipo con software propio

Tabla A-22: Características del equipo Cortex

-R&S IQR100



Figura A-19: IQR de Rohde & Schwarz

Características	
Tasa de muestreo	Hasta 99.5 MS/s
Bits por muestra	16 bits para I y 16 bits para Q
Almacenamiento	2 TB para la unidad HDD
	1.9 TB para la unidad SSD
Tiempo de grabación	1.3 horas
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	249 x 150 x 401 mm
Peso	6.6 Kg
Alimentación	100 – 240 V AC; 50/60 Hz
Consumo de potencia	60 W
Software	Software propio con opción de usar otro diseñado para la aplicación
Interfaces de entrada	26-pin MDR
Interfaces de salida	26-pin MDR

Tabla A-23: Características del equipo R&S IQR100

-IQC5000B



Figura A-20: IQC5000B de X Com Systems

Características	
Tasa de muestreo	Hasta 200 MS/s
Bits por muestra	16 para I y 16 para Q
Tiempo de grabación	83 min. Con 4 TB de memoria y el máximo ancho de banda
Almacenamiento interno	2 unidades para unidad SSD de memoria de 2TB (4TB en conjunto)
Almacenamiento externo	Unidad de SSD de 8 o 15 TB
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	305 x 89 x 266 mm
Peso	3.85 Kg
Alimentación	100 – 240 V AC; 50/60 Hz
Consumo de potencia	72 W
Software	Propio y controlado en una PC con Windows 7
Interfaz de entrada	50-pin 3M MDR x 4

Tabla A-24: Características del equipo IQC5000B

-COM-3011



Figura A-21: COM-3011 de ComBlock

Características	
Ancho de banda	20 MHz - 3 GHz
Niveles de entrada	-65 dBm a -20 dBm (<200 MHz)
	-60 dBm a -20 dBm (< 1GHz)
	-55 dBm a -20 dBm (< 3 GHz)
Tasa de muestreo	100 MS/s
Bits por muestra	12 bits para I y 12 bits para Q
Alimentación	5 V DC; 700 mA
Software	Propio

Tabla A-25: Características de la plataforma COM-3011

-USRP X310



Figura A-22: USRP de Ettus Research

Características	
Ancho de banda	Depende de la tarjeta
Tasa de muestreo	200 MS/s
Bits por muestra	14 bits
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	27.7 x 3.9 x 21.8 cm
Peso	1.7 Kg
Alimentación	12 V DC
Consumo de potencia	45 W aprox.

Tabla A-26: Características del equipo USRP X310

-Noctar

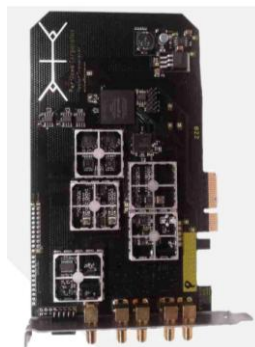


Figura A-23: Noctar de Per Vices Corporation

Características	
Ancho de banda	250 MHz
Frecuencias	100 kHz – 4 GHz
Tasa de muestreo	125 MS/s
Bits por muestra	12
Interfaz	PCIe

Tabla A-27: Características de la plataforma Noctar

Analizadores de Espectro

Marca	Modelo	Conector	Impedancia	Consumo
Tektronix	RSA5103B (con opción 65 para la salida de datos IQ)	Tipo N hembra	50 Ω	400 W máx.
Tektronix	RSA 6106B (con opción 5 para la salida de datos IQ)	Tipo N hembra	50 Ω	450 W máx.
Rohde & Schwarz	FSV4 (con la opción FSV-B17; interfaz digital)	Tipo N hembra	50 Ω	90 W Max. 180 W con todas las opciones
Rohde & Schwarz	FSVR7 (con la opción FSV-B17; interfaz digital)	Tipo N hembra	50 Ω	150 W. Max. 250 W con todas las opciones
Rohde & Schwarz	FSW8 (con la opción FSW-B17; interfaz digital)	Tipo N hembra	50 Ω	150 W sin opciones 250 W con todas las opciones

Tabla A-28: Especificaciones de los analizadores de espectro

Analizador	Resolution Bandwidth (RBW)	DANL Displayed average noise level (en 1 GHz con 1 Hz RBW)	Frecuencias de trabajo
Tek RSA5103B	0.1 Hz a 5 MHz	Typ. -157 dBm	1Hz a 3 GHz
Tek RSA 6106B	100 kHz, 300 kHz, 1 MHz y 5 MHz	Typ. -153 dBm	9 KHz a 6.2 GHz
R&S FSV4	1 Hz a 40 MHz	Typ. -150 dBm	10 Hz a 4 GHz
R&S FSVR7	1 Hz a 40 MHz	Typ. -150dBm	10 Hz a 7 GHz
R&S FSW8	1 Hz a 10 MHz	Typ. -156 dBm	2 Hz a 8 GHz

Tabla A-29: Especificaciones técnicas de los analizadores de espectro

Referencias

- [1] Diario Oficial de la Federación, “Política para la transición a la televisión digital terrestre”, México, 11 de septiembre de 2014.
- [2] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-R BT.1306-7: Error-correction, data framing, modulation and emission methods for digital terrestrial television broadcasting,” Geneva, June 2015.
- [3] Diario Oficial de la Federación, “Acuerdo por el que se adopta el estándar tecnológico de televisión digital terrestre y se establece la política para la transición a la televisión digital terrestre en México”, México, 2 de julio de 2004.
- [4] European Telecommunications Standards Institute, “EN 300 744 v1.6.1 Digital Video Broadcasting; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, 2009.
- [5] Mohammed El-Hajjar and Lajos Hanzo, “A Survey of Digital Television Broadcast Transmission Techniques”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, No. 4, Fourth quarter 2013.
- [6] Association of Radio Industries Businesses, “STD-B31 Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting”, Version 1.6, 2005.
- [7] Advanced Television Systems Committee, “Standard A/53: ATSC Digital Television Standard,” Parts 1-6, Washington, D.C., Jan. 2007.
- [8] David Sparano, “What exactly is 8-VSB anyway?”, The Miller Freeman Guide to Digital Television, 1997, 3 ed.
- [9] Advanced Television Systems Committee, “Standard A/110: ATSC Standard for Transmitter Synchronization,” Washington, D.C., April. 2011.
- [10] Walter Fischer, “Tecnologías para la radiodifusión digital de video y audio”, Rohde & Schwarz, Alemania, 2009.
- [11] Advanced Television Systems Committee, “Recommended Practice A/111: Design of multiple transmitter networks,” Washington, D.C., September 2009.
- [12] Young-Woo Suh, Young-Seok Jeong, Sungho Jeon, Il-Soo Kyung, Hae-Sul Yang, “An Efficient Mobile Coverage Measurement System for ATSC DTV Network”, Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, IEEE Symposium, London, June 2013.

[13] Chai-Chin Lin, Chih-Ming Chen, Jenn-Hwan Tarn, Hsueh-Ming Hang and Hsiao-Cheng Yu, “Analysis of ATSC Field Test Results in Taiwan”, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, No. 1, March 2002.

[14] M.V. Guerra, C.V. Rodriguez Ron and L. da Silva Mello, “SFN Channel Measurements in Brazil”, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol.12, No. 1, June 2013.

[15] Subcomisión Técnica de Televisión Digital, “Informe técnico sobre pruebas de campo de televisión digital terrestre”, Costa Rica, 2010.

[16] Pablo Angueria, Manuel M. Vélez, David De La Vega and Amaia Arrinda, “DTV (COFDM) SFN Signal Variation Field Tests in Urban Environments for Portable Outdoor Reception”, IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 49, No. 1, March 2003.

[17] Advanced Television Systems Committee, “Recommended Practice A/74: Receiver Performance Guidelines,” Washington, D.C., April 2010.

[18] Advanced Television Systems Committee, “Recommended Practice A/54: Guide to the use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No.1,” Washington, D.C., December 2003.

[19] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Informe UIT-R BT.2035-2: Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de televisión terrenal incluida la determinación de sus zonas de cobertura,” Ginebra, noviembre 2008.

[20] <http://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/broadcast/Pages/Bands.aspx>

Consultado el 24 de agosto del 2015.

[21] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, “CEPT/ERC Recommendation 74 02 E: Method of measuring the field strength at fixed points in the frequency range 29.7 – 960 MHz”, Bucharest, 1999.

[22] Rohde & Schwarz, “Antennas and Accessories, Catalog 2014/2015”. Version 07.00, Germany, June 2014.

[23] <http://funkeng.funkbau.de/Products/Measuringantennas/>

Fecha de consulta: 15 de septiembre del 2015.

[24] <http://www.ahsystems.com/catalog/log-periodic-antennas.php>

Fecha de consulta: 15 de septiembre del 2015.

[25] <http://www.deviser-instruments.com/broadband.html>

Fecha de consulta: 27 de agosto de 2015.

[26] <http://www.promax.es/esp/productos/medidores-de-campo-tv-cable-satelite>

Fecha de consulta: 07 de septiembre de 2015.

[27] http://www.rohde-schwarz.com.mx/es/products/radiodifusion/broadcasting_measurement

Fecha de consulta: 07 de septiembre de 2015.

[28] Rohde & Schwarz, "Application Note Easy Analysis and Precise Optimization of ATSC or ATSC Mobile DTV Single-Frequency Networks", April 2011.

[29] <http://www.zodiacaerospace.com/en/cortex-rsr-radio-signal-recorder>

Fecha de consulta: 20 de septiembre del 2015.

[30] <http://www.rohde-schwarz.com.mx/product/IQR.html>

Fecha de consulta: 20 de septiembre del 2015.

[31] <http://www.xcomsystems.com/product/IQC5000B-RF-Record-Playback-System>

Fecha de consulta: 20 de septiembre del 2015.

[32] <http://comblock.com/com3011.html>

Fecha de consulta: 20 de septiembre del 2015.

[33] <http://www.ettus.com/product/category/USRP-X-Series>

Fecha de consulta: 20 de septiembre del 2015.

[34] <http://www.pervices.com/noctar/>

Fecha de consulta: 20 de septiembre del 2015.

[35] Rohde & Schwarz, "Product Overview Signal and spectrum analyzers from Rohde & Schwarz ", Germany, February 2013.

[36] Procuraduría Federal del Consumidor, "Revista del Consumidor", Diciembre 2013, pp. 48 – 69.