Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA

“PROPUESTAS DE ANTENAS PARA LA RECEPCIÓN DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERESTRE EN CUBA”

Autor: Ing. Tuan Ernesto Cordoví Rodríguez

Tutor: Dr. C. Roberto Jiménez Hernández

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA

“PROPUESTAS DE ANTENAS PARA LA RECEPCIÓN DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERESTRE EN CUBA”

Autor: Ing. Tuan Ernesto Cordoví Rodríguez

Empresa de Antenas de Villa Clara

tuan@antenasvc.co.cu

Tutor: Dr. C. Roberto Jiménez Hernández

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Eléctrica de la UCLV

jimenez@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Los obstáculos son esas cosas que las personas ven cuando dejan de mirar sus metas”.

E. Joseph Cossman

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a:

Mis padres, por darme la vida y apoyarme en los momentos difíciles, porque gracias a ellos hoy estoy aquí;

Especialmente a mi querido hijo, que es el regalo más grande que dios me ha dado, por darme la fuerza y el valor suficiente para seguir luchando hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor DrC. Roberto Jiménez Hernández por demostrarme gran profesionalidad académica y apoyo desinteresado.

A los profesores del departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Eléctrica de la UCLV y de la CUJAE.

A los compañeros de las demás instituciones: Ministerio de las Comunicaciones, LACETEL, Telecable Internacional, RADIOCUBA, etc.

A la Empresa de Antenas de Villa Clara por el ofrecerme el lugar ideal para el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos y demás compañeros que de alguna forma u otra ha colaborado en mi formación profesional.

RESUMEN

El presente trabajo está encaminado al diseño de antenas para la recepción de la Televisión Digital Terrestre en Cuba, esto debido a los nuevos cambios tecnológicos en los que está inmersa la televisión en el país y al aceptado interés de la Empresa Antenas de Villa Clara de participar en estas transformaciones. El empleo del elemento activo constituye algo novedoso ya que en el país no se había construido o diseñado anteriormente con fines de recepción de la señal televisiva y en este caso se emplearon amplificadores MMIC que facilitan el diseño y presentan mejores características que los conformados con transistores. Para dar cumplimiento al propósito marcado se analizaron varios documentos con los que se pudieron estudiar las características de las antenas para el posterior diseño con la ayuda del software CST Microwave Studio 2015. Las mediciones con las antenas conformadas mostraron resultados satisfactorios en las realizaciones de las mediciones y validaciones. Tanto los parámetros típicos de las antenas como los parámetros de calidad de la recepción de la Televisión Digital Terrestre se mantuvieron dentro de los márgenes de aceptación.

ABSTRACT

The present work is directed to the design of antennas for the reception of Digital Terrestrial Television in Cuba, due to the new technological changes in which television is immersed in the country and to the accepted interest of the Antennas Villa Clara Enterprise to participate in these transformations. The use of the active element is something new since in the country had not been previously built or designed for reception of the television signal and in this case MMIC amplifiers were used that facilitate the design and have better features than those formed with transistors. In order to fulfill the marked purpose several documents were analyzed with which the characteristics of the antennas for the later design could be studied with the aid of the software CST Microwave Studio 2015. The measurements with the formed antennas showed satisfactory results in the realizations of the measurements and validations. Both the typical parameters of the antennas and the quality parameters of the Digital Terrestrial Television reception were kept within the acceptance margins.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO 1: CARACTERIZACIÓN DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE Y LAS ANTENAS PARA SU RECEPCIÓN EN CUBA 4

1.2 Televisión Digital Terrestre 4

1.2.1 Ventajas de la Televisión Digital Terrestre 5

1.2.2 Principales parámetros para medir la calidad de la Televisión Digital Terrestre 7

1.2.3 Norma de la Televisión Digital China DTMB 9

1.2 La Televisión Digital en Cuba 10

1.3 Antenas 11

1.3.1 Patrón de Radiación 12

1.3.2 Ganancia 13

1.3.3 Coeficiente de Radiación Trasera 13

1.3.4 Impedancia del punto de operación 14

1.3.5 Razón de Onda Estacionaria (ROE) 14

1.3.6 Ancho de Banda 15

1.4 Antenas exteriores para la recepción de la señal de la Televisión Digital 15

1.5 Antena Log-Periódica de Arreglo de Dipolos (LPDA) 16

1.5.1 Metodología de diseño de la Antena LPDA para la TDT 17

1.6 Antena de Reflector 22

1.6.1 Antena con Reflector Esquinado 22

1.6.2 Dipolo Mariposa *(Bow-Tie)* 23

1.6.3 Metodología para el diseño de la Antena con Reflector Esquinado para TDT ……24

1.7 Antenas interiores para la recepción de la Televisión Digital 25

1.7.1 Antena de Lazo 26

1.7.2 Amplificadores de señal para la Televisión Digital Terrestre 26

1.7.3 Características de los amplificadores de RF 27

1.7.4 Amplificadores con tecnología MMIC 27

1.8 Conclusiones del capítulo 29

CAPÍTULO 2: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LAS ANTENAS EXTERIORES E INTERIORES CON MÓDULO ACTIVO 30

2.1 Selección y descripción del software de simulación electromagnética a utilizar .. 30

2.1.1 CST Microwave Studio 30

2.2 Diseño y simulación de la Antena Log-Periódica de Arreglo de Dipolos (LPDA) para la recepción TDT 32

2.2.1 Diseño de la Antena LPDA para las Bandas de VHF y UHF 32

2.2.2 Simulación de la Antena LPDA 35

2.2.3 Optimización y análisis del comportamiento de la antena LPDA 36

2.3 Diseño y simulación de la Antena de Reflector Esquinado para la recepción de la Televisión Digital Terrestre 37

2.3.1 Diseño del Dipolo Mariposa 39

2.3.2 Optimización y Análisis del comportamiento de la Antena de Reflector Esquinado 39

2.4 Diseño y simulación de la antena interior para la recepción de TDT 42

2.4.1 Simulación de la Antena de Lazo 42

2.4.2 Optimización y análisis del comportamiento de la Antena de Lazo 43

2.5 Propuesta del módulo activo para antenas interiores 44

2.5.1 Diseño del Amplificador de RF 44

2.5.2 Diseño del circuito impreso 45

2.6 Características mecánicas de las antenas para TDT 46

2.6.1 Materiales utilizados y descripciones técnicas 46

2.7 Conclusiones del capítulo 48

CAPITULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDICIONES Y VALIDACIONES DE LOS PROTOTIPOS DE ANTENAS PROPUESTAS PARA LA TDT 49

3.1 Descripción técnica del equipamiento utilizado en las mediciones 49

3.1.1 Analizador de Espectro 49

3.1.2 Analizador de Televisión 50

3.1.3 Antena de referencia 50

3.1.4 Sistema de mediciones móviles 50

3.2 Construcción de los prototipos de antenas propuestas para la recepción de la TDT 51

3.2.1 Antena LPDA ADM010 51

3.2.2 Antena de Reflector Esquinado ADM020 52

3.2.3 Antena de Lazo para interiores 52

3.3 Mediciones de los parámetros radioeléctricos de las antenas 53

3.3.1 Mediciones de la razón de onda estacionaria (ROE) 53

3.3.2 Mediciones de ganancia y coeficiente de radiación trasera 57

3.3.3 Medición del patrón de radiación 60

3.3.4 Validación de las antenas exteriores a través de los parámetros de calidad de la recepción de la TDT en zonas de baja cobertura de la provincia de Villa Clara 61

3.4 Mediciones con la antena interior 65

3.4.1 Conformación del módulo activo 66

3.4.2 Validación de la antena interior a través de los parámetros de calidad de la recepción de la TDT dentro y fuera de la ciudad de Santa Clara 67

3.5 Conclusiones del capítulo 69

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

ANEXOS 75

Anexo I: Plan de canalización de la Televisión Digital actual en Cuba 75

Anexo II: Cálculos de la sección de VHF de la Antena LPDA en LPCAD 35 79

Anexo III: Características del coeficiente de radiación trasera (F/B) de la antena LPDA en función de la frecuencia 81

Anexo IV: Características técnicas del MMIC MAR-6 82

Anexo V: Instrumentos y accesorios empleados en las mediciones y validaciones 83

Anexo VI: Mediciones de pérdidas por retorno y ROE 85

Anexo VII: Zonas de coberturas del transmisor DTMB de canal 13 de SD de Santa Clara 88

Anexo VIII: Mediciones de parámetros de calidad de la recepción de la sea de TDT en algunas localidades de la Provincia de Villa Clara 88

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

TDT: Televisión Digital Terrestre

VHF: Muy Alta frecuencia *(Very High Frequency)*

UHF: Ultra Alta Frecuencia *(Ultra High Frequency)*

SD: Definición Estándar *(Standard Definition)*

HD: Alta Definición *(High Definition)*

DTMB: Multidifusión Digital Terrestre de Multimedia *(Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting)*

TOV: Umbral de Visibilidad *(Threshold Of Visibility)*

MER: Razón de Error en la Modulación (*Modulation Error Ratio)*

BER: Razón de Error de Bit (*Bit Error Ratio*)

C/N: Razón Portadora a Ruido

TDS-OFDM: Multiplexación por División Ortogonal en Frecuencia con Sincronismo en el Dominio del Tiempo *(Time Domain Synchronuous Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

ROE: Relación de Onda Estacionaria

F/B: Coeficiente de radiación trasera (Front to Back)

BW: Ancho de banda *(Band Wide)*

LPDA: Antena Log-periódica de Arreglo de Dipolos (Log-Periodic Dipoles Array)

MMIC: Amplificador Monolítico para Microondas *(Microwave Monolithic Integrated Circuit)*

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías en el ámbito de las telecomunicaciones han estado en un creciente desarrollo en los últimos años. Dentro de estas también se han desarrollado en el ámbito de las tecnologías de consumo y junto a esta el sector que pertenece a la Televisión.

Cuba actualmente está dando los primeros pasos en la TV digital, pero para garantizar el despliegue se necesitan nuevos tipos de antenas que garanticen la recepción en zonas de baja cobertura. Es por ello que se plantea la necesidad de antenas receptoras de la señal de televisión digital, para los canales del 7 al 13 de VHF y del 14 al 52 de UHF, con vista a respaldar el desarrollo de este programa nacional [1].

La Televisión Digital Terrestre (TDT) presenta problemas no favorables en la recepción porque a diferencia de la señal de TV Analógica la señal “se ve o no”, por tanto, esto hace que se necesiten antenas capaces de alcanzar los requisitos necesarios para una correcta recepción. Muchos fabricantes de antenas han proyectado sus nuevos productos hacia esta rama debido a los requerimientos de este tipo de señal. También existe interés en la búsqueda o perfeccionamiento de diseños que cumplan con los requisitos de recepción de Televisión Digital en el país.

La Empresa Antena de Villa Clara es una institución que juega en papel fundamental en los cambios científicos-tecnológicos en los que se encuentra inmerso el país con respecto a la TDT. Su objeto social está encaminado a desarrollar nuevos modelos de antenas que satisfagan las necesidades de la población y que contribuyan en la reducción de las zonas de baja coberturas de los transmisores de TDT instalados en la actualidad.

Considerando lo establecido anteriormente conduce como problema de investigación:

¿Cómo contribuir a la reducción de las zonas de baja cobertura de la señal de TDT que actualmente se encuentra en un proceso de desarrollo en Cuba?

Es por ello que se plantea como objetivo general: Proponer antenas receptoras de la señal de TDT para las bandas de frecuencias de la Televisión Digital Terrestre en Cuba.

Para dar cumplimiento al objetivo general se precisan como objetivos específicos:

1. Caracterizar las antenas para la recepción de la TDT a partir de los principales parámetros a medir para la correcta recepción de la TDT.
2. Diseñar con ayuda de la simulación de varios tipos de antenas para la recepción de la TDT y de un Módulo Activo de RF para las bandas de VHF y UHF asignadas para TDT en Cuba.
3. Validar los prototipos diseñados a partir del análisis de los resultados de las mediciones experimentales.

Como aporte práctico de este trabajo se dispone de las siguientes propuestas: una antena exterior de ganancia relativamente media para la recepción en la banda alta de VHF y la banda de UHF para uso individual, una antena exterior de ganancia relativamente alta para la banda de UHF para uso colectivo y una antena interior con un módulo activo de RF incorporado para la recepción en la banda alta de VHF y la banda de UHF. Estos diseños y su posterior fabricación están destinados especialmente para la población cubana para minimizar las deficiencias en los sistemas de recepción de la señal de TDT, lo cual constituye el aporte social.

Esta investigación abre nuevos caminos con respecto a la Televisión Digital, donde existe un marcado interés en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. También constituye un gran paso a la sustitución de importaciones con antenas fabricadas en Cuba, siendo este su aporte económico. Los beneficios fundamentalmente son para la población porque en la actualidad existe gran demanda de antenas para TDT.

En la investigación se hace un análisis de los principales parámetros radioeléctricos relacionados con la calidad de la señal digital recibida en las zonas de baja cobertura que conllevan al diseño y fabricación de antenas para la recepción de dichas señales. Se utiliza apoyo bibliográfico para la realización de los cálculos y simulaciones que posteriormente

son realizados por diversas herramientas de software para propósitos. Se toma en consideración las antenas fabricadas especialmente con conductores rectos con la tecnología actualmente disponible en la Empresa de antenas de Villa Clara. Se utiliza como componente fundamental para el diseño y fabricación del Módulo Activo los Amplificadores MMIC (Circuito Integrado Monolítico de Microondas).

El informe de dicha investigación quedará estructurado de la siguiente manera:

Introducción, Capítulos, Conclusiones, Referencias bibliográficas, Recomendaciones y Anexos.

El Capítulo 1 se enfoca en el análisis y estudio bibliográfico de las antenas empleadas para la televisión digital, de los amplificadores de RF y sus principales parámetros, así como, en los fundamentos teóricos y prácticos de la TDT y sus características en el país. El Capítulo 2 está orientado en la realización del diseño de los modelos seleccionados, la simulación de los mismos y el análisis de los resultados de la simulación, así como, el diseño del amplificador para la conformación del módulo activo. Y por último en el Capítulo 3 se validan los prototipos diseñados y se establecen comparaciones entre las simulaciones y los resultados obtenidos de las mediciones reales.

El trabajo también contará de conclusiones donde se establecerá un análisis crítico de los resultados obtenidos en correspondencia con los objetivos trazados. También presentará recomendaciones que tomarán en consideración aquellos aspectos que puedan enriquecer y perfeccionar el estudio realizado en futuras investigaciones. Además, presentará recomendaciones bibliográficas en las que se conformará un listado de la bibliografía consultada siguiendo las normas establecidas. Los anexos incluirán aquellos aspectos del trabajo que, por su longitud o complejidad, no se incluyen en el texto de la tesis pero que auxilian a una mejor comprensión de lo que se expone en ella.

CAPITULO 1: CARACTERIZACIÓN DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE Y LAS ANTENAS PARA SU RECEPCIÓN EN CUBA

En el presente capítulo serán abordados aspectos esenciales de la Televisión Digital fundamentalmente bajo la norma establecida en Cuba. Se analizan los principales parámetros de las antenas y las más utilizadas para la recepción de la señal de la Televisión Digital, tanto exteriores, como interiores. Por otra parte se propone el empleo de amplificadores de RF para estas aplicaciones.

1.2 Televisión Digital Terrestre

La Televisión Digital Terrestre (TDT) es un nuevo método de transmisión de la señal televisiva, que incluye la captación de la imagen y el sonido por las cámaras y micrófonos de un estudio de televisión, el procesamiento posterior en la edición y post producción, el transporte y distribución de las señales, la radiodifusión y la recepción por el televidente. Puede ser transmitida con otras modalidades: cable, satélite, internet y telefonía móvil, ofreciendo inmensas posibilidades a proveedores de servicios y usuarios [2]. Esta nueva tecnología utiliza, al igual que la Televisión Analógica, ondas radioeléctricas para transmitir la señal, pero la información se envía de forma binaria, o sea, mediante ceros y unos.

La comunicación digital comprende la transmisión de símbolos discretos a través de un canal ruidoso. Estos símbolos discretos pueden provenir bien de fuentes de datos discretos tales como computadoras, o bien de fuentes cuyas señales son analógicas pero que han sufrido un proceso de digitalización como, por ejemplo: voz, video, etcétera. La transmisión digital implica que las señales transmitidas son tomadas de un conjunto finito

de señales, correspondientes a los símbolos discretos y entonces el receptor decide qué señal del conjunto finito fue la recibida.

Los canales radioeléctricos de la televisión digital ocupan el mismo ancho de banda (6 MHz) que los canales utilizados por la televisión analógica pero, debido a las técnicas de compresión de las señales de imagen y sonido, tienen capacidad para un número variable de programas de televisión en función de la velocidad de transmisión, pudiendo oscilar entre un único programa de televisión de alta definición HDTV (gran calidad de imagen y sonido) a múltiples programas con calidad técnica similar a la actual SDTV. Estas señales comparten prácticamente toda la infraestructura de la cadena de transmisión con lo cual se logran importantes ahorros de costo y de consumo de energía [3].

En el mundo existen actualmente cuatro normas para el dominio digital, que no son compatibles entre sí: DVB-T, ATSC, ISDB-T, DTMB. Algunas tienen versiones y pueden no ser exactamente iguales en los distintos países, lo que significa que, aun usando una misma norma, las cajas decodificadoras y los televisores adquiridos en un país pueden no funcionar en otro. Las difusiones se realizan en la Bandas III (VHF), IV y V (UHF) desde 174 MHz hasta 826 MHz, según el país y los diferentes estándares [4].

La adopción de una norma es un acto de suma responsabilidad para cualquier país, porque define lo que va a ocurrir durante el período histórico de la TDT, que se estima sea de medio siglo, probablemente más, tomando como referencia las normas analógicas las cuales han mantenido su vigencia durante 60 años [5].

1.2.1 Ventajas de la Televisión Digital Terrestre

Los sistemas de transmisión de la TDT poseen algunos beneficios que se resumen como sigue [2] [6] [7]:

- Aumenta sensiblemente la calidad de sonido e imagen, tanto en su definición como en su robustez, frente a los efectos de las interferencias.
- Mejor aspecto de pantalla (de una razón 4:3 se pasa al cinematográfico 16:9).
- Posibilita servicios interactivos.
- Permite con el programa en curso, transmitir datos y audio adicionales (como son subtítulos, radio digital, alarmas, traducción, etc.).

- Los equipos pueden trasladarse de un sitio a otro a diferencia de las instalaciones de televisión satelital que son fijas.
- Mejor recepción (señal libre de ruido).
- Menor costo de transmisión por programa.
- Un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico.
- El ancho de banda liberado puede destinarse a la emisión de otros programas, emisiones de televisión de alta definición o a la transmisión de datos y nuevos servicios interactivos.
- Permite un consumo asincrónico a través del almacenado de programas en discos duros de decodificadores.
- Permite utilizar SFN (*Single Frequency Network*, Red de Frecuencia Única).

En la TV analógica, a medida que se desvanece gradualmente el nivel de señal, la imagen en pantalla se va deteriorando cada vez más hasta desaparecer por completo. La robustez fundamental que presenta la TV Digital es que mientras el nivel de señal se encuentre dentro del rango de aceptación, la misma se podrá disfrutar con alta calidad. A medida que disminuye el nivel de la señal, siendo débil con respecto a los ruidos u otras interferencias que influyen, aparece el característico Precipicio Digital *(Cliff Digital)* que es la incapacidad de detección del receptor, que a su vez empieza a "pixelarse" hasta dejar de verse la imagen por completo. Esta problemática justifica el dicho popular de "se ve o no se ve" [8]. En la Fig. 1.1 se puede observar un modelo de comparación de señal entre ambas tecnologías.

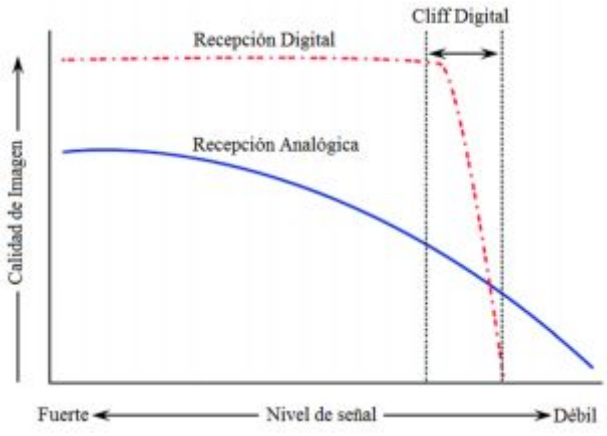


Fig. 1.1. Comparación entre los niveles de recepción de señal Analógica y Digital

1.2.2 Principales parámetros para medir la calidad de la Televisión Digital Terrestre

Los principales parámetros para medir la calidad de la televisión digital terrestre son los siguientes:

- **Potencia de la señal:** La potencia de la señal que se recibe en la toma de la vivienda o local, se mide en dBm. El valor admisible mínimo conocido como TOV Umbral de Visibilidad *(Threshold Of Visibility)*, según el Standard UIT-R BT. 2032-2 y en pruebas realizadas en laboratorios indican valores inferiores de -85 dBm para algunos receptores repartidos a la población cubana . Sin embargo en la práctica, en algunas mediciones realizadas con antenas exteriores en diferentes localidades del territorio nacional los niveles débiles oscilaban por debajo de -68 dBm los cuales también se en la Tabla I por la UIT-R la cual se elige como referencia [9] [10].

Tabla I: Indicadores de recepción de la señal en receptores de TVD

Rango de niveles según UIT-R BT.2035-2	Indicador según UIT-R BT.2035-2
>-15dBm	Muy intenso
-15dBm>nivel>-28dBm	Intenso
-28dBm>nivel>-53dBm	Moderado
<-68dBm	Débil

.

- **MER (*Modulation Error Ratio*, Razón de Error en la Modulación)**: El MER, en términos de QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*, Modulación de Amplitud de Cuadratura) que es la modulación mas usada en TDT, es la razón entre la amplitud del símbolo promedio (Sp) y la amplitud del error promedio (E) para el símbolo que normalmente se mide en *dB*.

$$MER = 20\log_{10}(Sp/E) \quad (1.1)$$

Es la equivalente a la Relación Señal a Ruido (S/N) pero en la modulación. Se define también como un factor que nos informa de la exactitud de una constelación

digital mostrado en la Fig. 1.2. El valor aceptable del parámetro MER no está determinado. La mayoría de los receptores actuales decodifican correctamente la señal que toma, si se dispone de una MER > 20dB con un valor mínimo aconsejable de 22dB. El valor mínimo aconsejable para la MER en una antena es de 23dB. La MER puede verse alterada por las señales multitrayecto, interferencias, ruidos provocados por el hombre, entre otros [11].

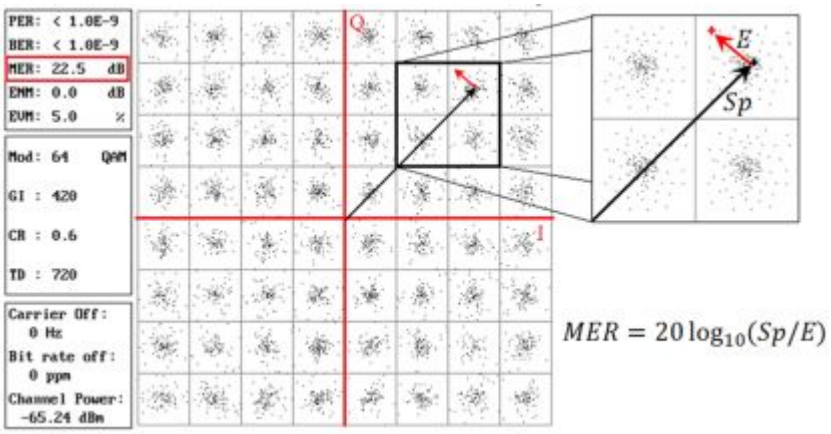


Fig. 1.2. Interpretación física de MER dentro de la modulación digital 64QAM

- **El BER (*Bit Error Ratio*):** Es el parámetro fundamental que nos determina la calidad de la señal demodulada (trama de transporte) de los sistemas de televisión digital terrestre. Es el número de bits o bloques incorrectamente recibidos, con respecto al total de bits o bloques enviados durante un intervalo específico de tiempo. Esta es la medida fundamental para determinar la calidad de la señal. Para una correcta decodificación de la señal digital, únicamente se define un valor del BER < 2 x 10^{-4} después de la decodificación en el receptor. Por encima de este valor, es imposible realizar la decodificación debido al gran número de errores presentes en el flujo de datos [11] [12].
- **C/N (Relación Portadora a Ruido):** es también importante a la hora de realizar la decodificación. Si la C/N está por debajo de cierto valor, la decodificación no se puede realizar (Martínez, 2010).

Todos estos parámetros descritos anteriormente se pueden calcular con instrumentos de medida como son los Medidores de Campo Portátiles con diversas funcionalidades como el de la siguiente Fig. 1.3, donde se pueden observar dos mediciones de campo a una distancia

considerable de un transmisor de dos antenas: una exterior y otra interior pasiva dentro de un local, a través del instrumento, el Analizador de TV DEVISER S7000.

Fig. 1.3. Lectura típica de un instrumento de medición portátil para TDT

Se muestra la validez de los parámetros de medida, los cuales para la antena exterior están dentro de los parámetros aceptables, mientras que en la interior, todos los parámetros se encuentran deteriorados, y es por ello que la tasa de errores es considerable y mayor a la recomendada, y en este caso, la imagen en el televisor “no se ve”.

1.2.3 Norma de la Televisión Digital China DTMB

El sistema DTMB *(Digital Terrestrial Multimedia Broadcast)* es el estándar de televisión para terminales fijos y móviles de China. Este DTMB surge de la fusión de los estándares ADTB-T (desarrollado por la universidad de Shanghái), DMB-T (desarrollado por la universidad de Beijing) y el TiMi *(Terrestrial Interactive Multiservice Infraestructure)* propuesto por la Academia de Ciencias de Radiodifusión.

Dentro de las principales características del estándar tenemos:

- ✓ Tasa de transmisión de bits: de 4,813Mbps a 32,486Mbps.
- ✓ La transmisión de datos es implementada mediante el estándar TDS-OFDM *(Time Domain Synchronuous Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), el cual, de

acuerdo con el co-desarrollador de DMB-T con la Universidad Tsing Hua, es capaz de trasmitir calidades "aceptables" de señal para receptores HDTV moviéndose (por ejemplo, en coche o tren) a velocidades de hasta 200 km/h.

- ✓ DTMB no define *codecs* de compresión (como MPEG-4 y MPEG-2), dejando esa decisión a discreción del transmisor. Eso significa que los receptores tendrán que ser capaces de descifrar múltiples formatos, lo que los hará más caros, pero a su vez los distribuidores de señal podrán prestar otro tipo de servicio que permita a los canales de televisión emitir con las características que ellos deseen, dando servicio a la alta definición e incluso a la interactividad con el usuario.
- ✓ Difusión de SD, HD, y servicios multimedia.
- ✓ Para los *Codecs* de Audio la norma establece *Dolby Digital*, también conocido como AC-3 (*Audio Codec 3*) y SR-D (*Spectral Recording-Digital*).
- ✓ Flexibilidad de servicios.
- ✓ Procesamiento de datos en dominio del tiempo y frecuencia.
- ✓ Difusión de entre 6 y 15 canales en SD y 1 o 2 en HD.

1.2 La Televisión Digital en Cuba

El 10 de septiembre del 2013 fue publicado en la Gaceta Oficial de la República de Cuba, el acuerdo 7455 del Consejo de Ministro mediante el que se aprueba el estándar internacional de trasmisión de televisión digital terrestre DTMB, se autoriza su introducción y despliegue en Cuba con las adecuaciones y mejoras tecnológicas necesarias para el país luego de varios años de estudio y la realización de pruebas técnicas [13].

El despliegue de la Televisión Digital Terrestre es un proyecto integral de creación de infraestructura social, con la finalidad de mejorar el nivel de vida del pueblo, introduciendo una tecnología de punta que beneficia a toda la población y anticiparse a la inevitable obsolescencia tecnológica. Se estima que en el año 2020 el 90 % de todos los televisores en el mundo estarán preparados para captar las señales digitales, lo que provocará una aguda escasez de piezas de repuesto para los televisores y demás equipos que trabajan con señal de tipo analógico. Es un cambio inevitable que cada país tiene que enfrentar y que se enmarca en el proceso de digitalización que ya ha tenido lugar en muchas tecnologías,

como la telefonía fija y móvil, el almacenamiento y la transmisión de datos, Internet, la prensa, el cine, las transmisiones satelitales y las comunicaciones en general.

Se prevé que la Televisión Digital estará instalada totalmente en Cuba en el año 2021, cuando se aplicará el "apagón analógico", luego de transitar por tres etapas para introducir ese sistema de trasmisión que traerá ventajas como la mayor calidad en el servicio [13].

Las características de la Televisión Digital permiten un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, razón por la cual, el espectro dedicado a la transmisión de televisión será reducido a la Banda III de VHF desde el canal 7 al 13 y la Banda de UHF desde el canal 14 al 52 [14].Además se pretende emigrar hacia la banda de UHF, o sea, a partir de 470 MHz y hasta aproximadamente 700 MHz (canal 51). Esta reducción del espectro hace necesaria una nueva distribución de canales a los centros transmisores de televisión en el país. En el Anexo I se muestra el plan de canalización para Televisión Digital en Cuba y el transmisor con su canal correspondiente para cada municipio específico en la actualidad [15].

1.3 Antenas

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que los crean. La solución de las ecuaciones da lugar a formas de onda guiadas como las que ocurren en las líneas de transmisión y guías de ondas, o a otras, libres en el espacio como las radiadas o recibidas por las antenas. El IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define una antena como "aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas". El objetivo de las antenas es actuar de interfaz entre una onda electromagnética guiada (a través da una línea de transmisión, guía de onda etc.) y una onda electromagnética no guiada, radiada en un medio, en general, el aire [16].

El transmisor puede ser descrito como una fuente de Thevenin compuesta por un generador de voltaje en serie con su impedancia de salida, proporcionando una potencia a la antena transmisora según la Fig. 1.4. Dicha antena radia una onda esférica, la cual, a partir de largas distancias se aproxima a una onda plana. La antena receptora intercepta una porción de la onda y proporciona la potencia recibida a la impedancia de carga del receptor [17].

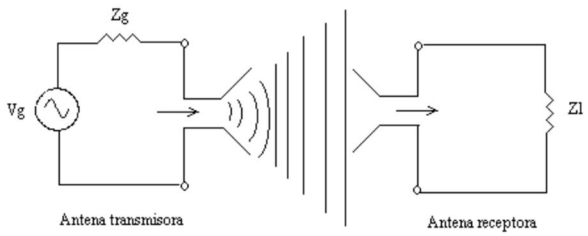


Fig. 1.4. Esquema de funcionamiento entre antenas transmisoras y receptoras.

Para el caso de la antena transmisora, su propósito es radiar eficientemente la energía electromagnética hacia direcciones convenientes, como es el caso de la antena transmisora de un canal de TDT determinado, que debe darle cobertura a una localidad determinada, haciendo uso de la máxima potencia disponible. En el caso de una antena receptora, su función es captar ondas radioeléctricas, debilitadas y contaminadas con ruido, en direcciones convenientes, como es el caso de las antenas receptoras de señales de TDT bien orientadas, que permiten que el receptor recupere la información contenida en esta señal. Estas últimas constituyen el objetivo de este trabajo.

Para facilitar el propósito de la radiación, la longitud física de la antena debe ser comparable con la longitud de onda de operación. A medida que la frecuencia es mas alta, el tamaño real de la antena es menor, y a la inversa [18].

1.3.1 Patrón de Radiación

Se define como la representación gráfica de las características de radiación en función de la dirección angular. La onda electromagnética radiada se compone de un campo eléctrico E y uno magnético H, los cuales son perpendiculares entre sí y a su vez son perpendiculares a la dirección de propagación que es radial, desde la fuente hacia el infinito. En la Fig. 1.5 se muestran algunos diagramas de radiación típicos [19].

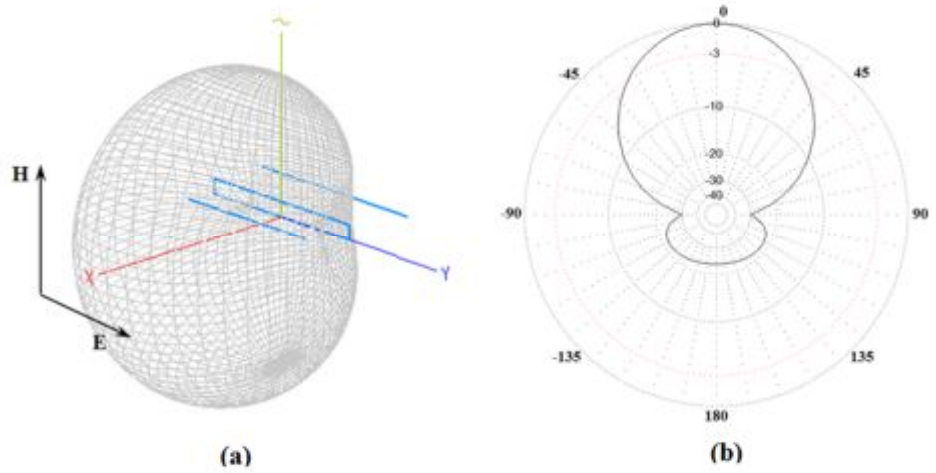


Figura 1.5. Diagramas de radiación (a) en 3D y (b) en coordenadas polares.

1.3.2 Ganancia

La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena, considerando la eficiencia de radiación. Matemáticamente se ve en la siguiente expresión:

$$G(\theta,\emptyset) = \eta\left[\frac{4\pi U(\theta,\emptyset)}{P_{in}}\right] \quad (1.2)$$

Es uno de los parámetros más usados para describir el desempeño de una antena práctica. Está normalmente dada en decibeles isotrópicos [dBi], ya que representa la ganancia en comparación con una antena isotrópica, aunque también puede estar expresada en [dBd], que es la ganancia comparada con una antena dipolo de media longitud de onda. En este caso, se debe sumar 2,147 para pasar la ganancia de [dBd] a [dBi].La ganancia de una antena es la misma, tanto para recibir como para transmitir [16].

1.3.3 Coeficiente de Radiación Trasera

Es la relación entre la ganancia de la antena (Fig. 1.6) en la dirección de máxima radiación y la ganancia de la antena en cualquier otra dirección comprendida entre 90 º y 270º de la dirección de máxima radiación [19].

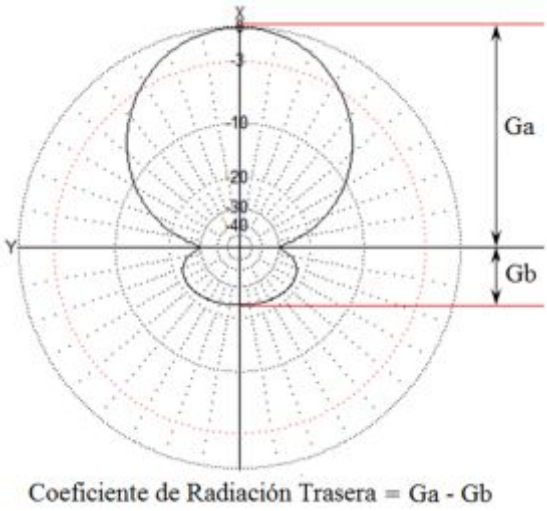


Fig.1.6. Representación del Coeficiente de Radiación Trasera

1.3.4 Impedancia del punto de operación

La impedancia de una antena se define como la relación fasorial entre el voltaje y la corriente en sus terminales de entrada. Dicha impedancia es en general compleja. Desde el punto de vista de circuito, la antena 100 % eficiente tiene entre sus terminales una impedancia, cuya parte real es la resistencia de radiación, y una componente imaginaria reactiva, que depende del campo cercano que dicha antena genera. Si el sistema de radiación está bien diseñado, esta componente imaginaria debe ser despreciable con respecto a la parte real [18].

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a \qquad (1.4)$$

La resistencia de la antena se puede considerar como la suma de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas.

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a \qquad (1.5)$$

1.3.5 Razón de Onda Estacionaria (ROE)

La razón de onda estacionaria es una medida de las reflexiones ocurridas en el sistema director de onda (línea de transmisión, guía de onda, etc.) acorde al grado de adaptación de impedancia de la antena con este. Mientras mayor sea el grado de adaptación, menor potencia será reflejada y, por lo tanto, mayor cantidad de ésta será irradiada o recibida por

la antena. Un valor de ROE igual a uno implica que la antena está completamente adaptada y un 100% de la potencia está siendo aprovechada si se desprecian las pérdidas en calor.

En la práctica, un nivel aceptable de adaptación de impedancia se logra en la mayoría de las aplicaciones con una ROE igual a 2, que equivale a que un 90% de la potencia recibida por la antena está siendo dirigida hacia el receptor. Por lo tanto se debe tener un valor para la ROE menor o igual a 2 para considerar a las antenas de TV con un nivel aceptable de adaptación de impedancia.

1.3.6 Ancho de Banda

El ancho de banda puede ser considerado como el rango de frecuencias, a ambos lados de una frecuencia central, donde las característica de radiación e impedancia de interés se encuentran a un valor aceptable de los de la frecuencia central [20] . Para el caso de las antenas para recepción de TV digital se considerará un ancho de banda aceptable la gama de frecuencia donde la ROE (Relación de Onda Estacionaria) está por debajo de 2.0 y donde la Ganancia no disminuya por debajo de 3dBi con relación a la máxima.

1.4 Antenas exteriores para la recepción de la señal de la Televisión Digital

Son las antenas que típicamente que se colocan en la fachada de los edificios o en la cubierta. Para recibir señales de TV Digitales es importante que la antena pueda recibir canales de VHF (canales del 7 al 13 en el país) y de UHF (canales del 14 al 52).

Para la recepción satisfactoria de la televisión se requiere generalmente una antena exterior, para lograr la mejor relación señal ruido posible, que garantice una recepción correcta [21].

Una antena para la recepción de la TV digital debe cumplir básicamente las siguientes características [22]:

- Tener una buena captación de la señal, sobre todo en zonas de señal débil.
- Evitar la captación de señales reflejadas en edificios, montañas u otros obstáculos causantes de las dobles imágenes o imágenes fantasma.
- Evitar también reflexiones de la señal en el propio sistema de radiación.
- Tener la mínima afectación posible de interferencias.
- Ser adecuada para el mayor número de canales posibles.

Los tipos de antenas más utilizados para recepción de TDT se muestran en la Fig. 1.7 a continuación, que son las más comunes utilizadas en la población a raíz del comienzo del despliegue de la TDT, que se ofrecen actualmente en las tiendas pertenecientes al Ministerio del Comercio Interior (MINCIN), como es el caso de la ADM 001, la LPV345 importadas a través de las Tiendas Recaudadoras de Divisas, y las antenas introducidas al país por los colaboradores internacionalistas. Dentro del grupo de antenas mas utilizadas se encuentran las Antenas Uda-Yagi, las Log-Periódicas y las de Panel.

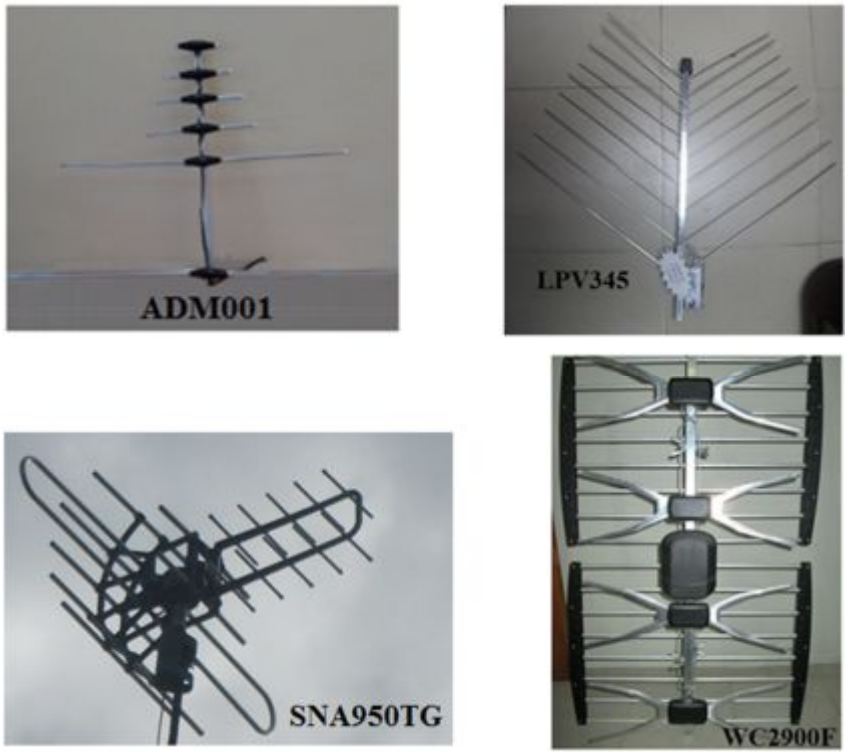


Fig. 1.7. Ejemplos típicos de antenas para la recepción de TDT introducidas en el país

1.5 Antena Log-Periódica de Arreglo de Dipolos (LPDA)

La Antena Log-periódica de Arreglo de Dipolos es una antena direccional que consiste en un conjunto de dipolos alimentados a una línea de trasmisión central con inversión de la fase entre estos, donde cada grupo de elementos resuena a una frecuencia distinta y en un rango determinado. La unión de todos los elementos resonantes a diferentes frecuencias en una disposición logarítmica, hace que se pueda conformar una antena con un ancho de banda seleccionado por el diseñador. Se compone de una sucesión de elementos dipolos semejantes, cuyas distancias mutuas y frecuencias de resonancia hacen que tome forma

geométrica repetitiva, con tamaños diferentes. La antena se alimenta con una línea de transmisión en los extremos del elemento más pequeño, mostrado en la Fig. 1.8.

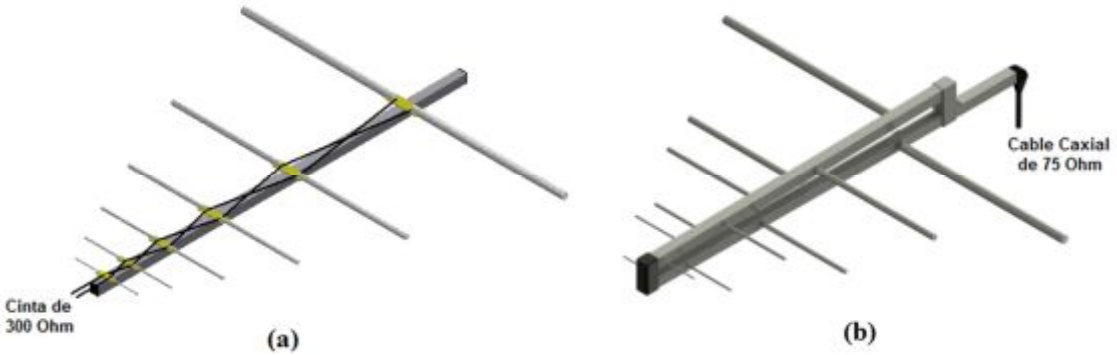


Fig. 1.8. Métodos de alimentación de antenas LPDA, (a) con línea bifilar, (b)con cable coaxial.

El valor de la impedancia de entrada depende en gran medida de la impedancia característica Z0 de la línea de trasmisión que alimenta los dipolos. La alimentación de la antena se lleva a cabo por cinta bifilar de 300 Ω o cable coaxial de 75 Ω. Cada dipolo esta alimentado por una línea bifilar que se entrecruza, desfasándolos 180 grados, para garantizar la radiación *"end fire"* hacia los elementos más pequeños. Pero en el caso de la Figura 1.9 b, los dipolos están soportados estructuralmente por su línea de alimentación. En este último caso los dipolos se encuentran ubicados de forma alternada para garantizar el desfasaje [18] [20].

1.5.1 Metodología de diseño de la Antena LPDA para la TDT

El procedimiento más completo para dar los criterios de diseño de la antena LPDA fue desarrollado por el trabajo de tesis doctoral de R.L. Carrel desarrollado en 1961 en la Universidad de Illinois [18]. La geometría de esta antena se muestra en la figura 1.9.

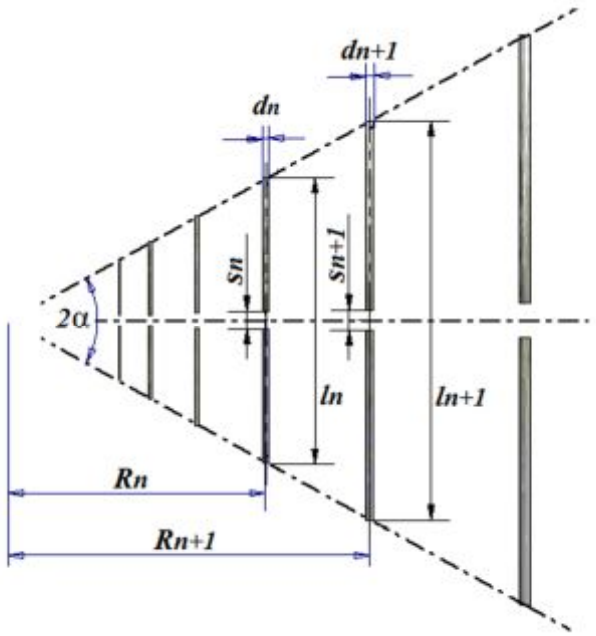


Fig. 1.9. Geometría de la antena LPDA

Las características de radiación, la ganancia y la longitud física dependen de las formas geométricas del conjunto log-periódico, definido por el factor de escala τ en la ecuación (1) [18] [20]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} \tag{1.7}$$

Y el factor de forma σ en la ecuación:

$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2l_{n+1}} \tag{1.8}$$

Además de estos factores geométricos, está definida por el ángulo agudo α mostrado en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{1-\tau}{4\sigma}\right] \tag{1.9}$$

Los factores tau (τ) y sigma (σ) son los únicos factores que consideramos para el diseño de la LPD, τ es la razón de la longitud de un elemento con su vecino próximo más largo, σ es conocido como el espaciamiento constante relativo con el cual se determina el ángulo del vértice de la antena. En la práctica no se escalan todas las dimensiones de la antena y,

habitualmente, el diámetro y la separación de los terminales de alimentación de cada dipolo se mantienen constantes para todos los elementos [23].

A continuación se muestran los pasos a llevar a cabo para realizar el método de diseño propuesto por Carrel donde se propone a "h" que es la longitud del brazo de un elemento [18].

1. Especificada la ganancia directiva en dBi requerida para el diseño, se obtienen los valores de τ y σ, utilizando la gráfica de la Fig. 1.10.

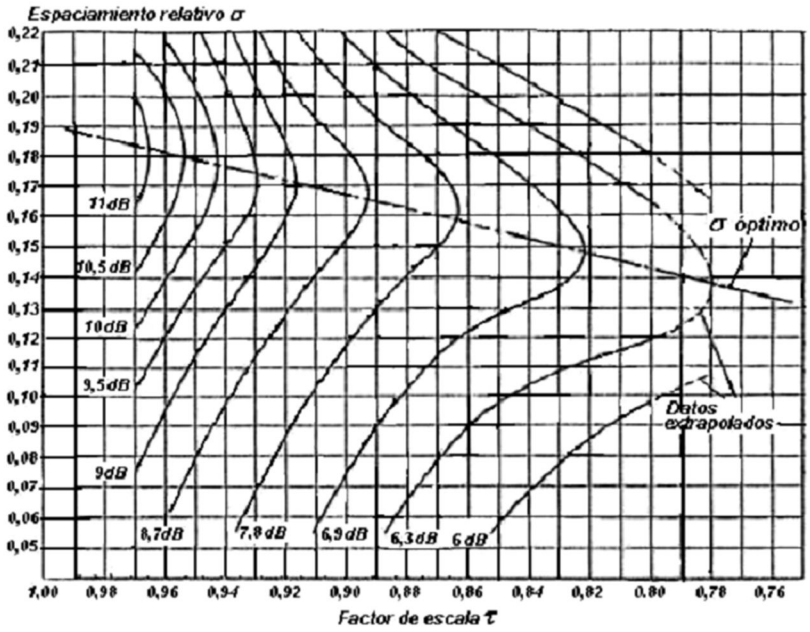


Fig. 1.10. Curva de ganancia directiva en dBi para distintos valores de "τ" y "σ", Z_0=100Ω y h/a = 177 con terminación en cortocircuito en el elemento más largo

2. Calcular α en grados mediante la ecuación (1.9):

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{1-\tau}{4\sigma}\right] \quad (1.9)$$

3. Determinar el ancho de banda de la región activa a través de la ecuación empírica introducida por Carrel:

$$Bar = 1.1 + 7.7(1-\tau)^2 \cot\alpha \quad (1.10)$$

4. Determinar el ancho de banda deseado:

$$B = f_{max}/f_{min} \quad (1.11)$$

5. Determinar el ancho de banda de diseño:

$$B_S = B * B_{ar} \quad (1.12)$$

6. Buscar la longitud axial que debe tener la antena:

$$L = \frac{\lambda_{max}}{4}(1 - 1/B_S)\cot\alpha \quad (1.13)$$

donde $\lambda_{max} = 2l_{max} = c/f_{min}$ (1.14)

7. Determinar la cantidad de elementos que debe tener la geometría del sistema:

$$N = 1 - \frac{\ln(B_S)}{\ln(\tau)} \quad (1.15)$$

8. Calcular la impedancia característica promedio de los elementos:

$$Z_d = 120[\ln(l_n/d_n) - 2{,}25] \quad (1.16)$$

Donde $\ln/dn$ es la razón longitud a diámetro del elemento n-simo del conjunto.

9. Determinar la impedancia característica aproximada del alimentador de los dipolos:

$$Z_0 = R_0'\left[X + (X^2 + 1)^{1/2}\right] \quad (1.17)$$

donde

$$X = R_0'/8\sigma' Z_d \quad (1.18)$$

y $\sigma' = \sigma/(\tau)^{1/2}$ (1.19)

Donde:

R_0' → Impedancia de entrada de la antena

10. Determinar el espaciamiento centro a centro de la línea de alimentación de los dipolos:

$$Sl = d\cosh(Z_0/120) \quad (1.20)$$

Donde d es el diámetro de los conductores del alimentador.

11. Determinar la longitud del elemento mayor:

$$L_1 = S(\lambda_{max}/2) \quad (1.21)$$

Donde "S" depende ligeramente de "Z_0" y de la relación "l/d" o "h/a" (relación longitud del brazo al radio), pudiendo calcularse desde el gráfico de la Fig. 1.11 o por la expresión empírica propuesta por Jiménez [24]

$$S = k_1 exp \quad (1.22)$$

Cuyas constantes son evaluadas acorde a la relación "l/d" y por tanto acorde al valor de Zd.

Para "l/d" = 3300 Z_a = 702,2 [Ω] k_1 = 1,085 k_2 = 4

Para "l/d" = 177 Z_a = 351,138 [Ω] k_1 = 1,03 k_2 = 8

Para "l/d" = 33 Z_a = 149,58 [Ω] k_1 = 1 k_2 = 16

Para todos los casos 100 ≤ Z_0 ≤ 400 [Ω] y el error máximo relativo es del orden de 1,61 % para Z_0 = 400 [Ω].

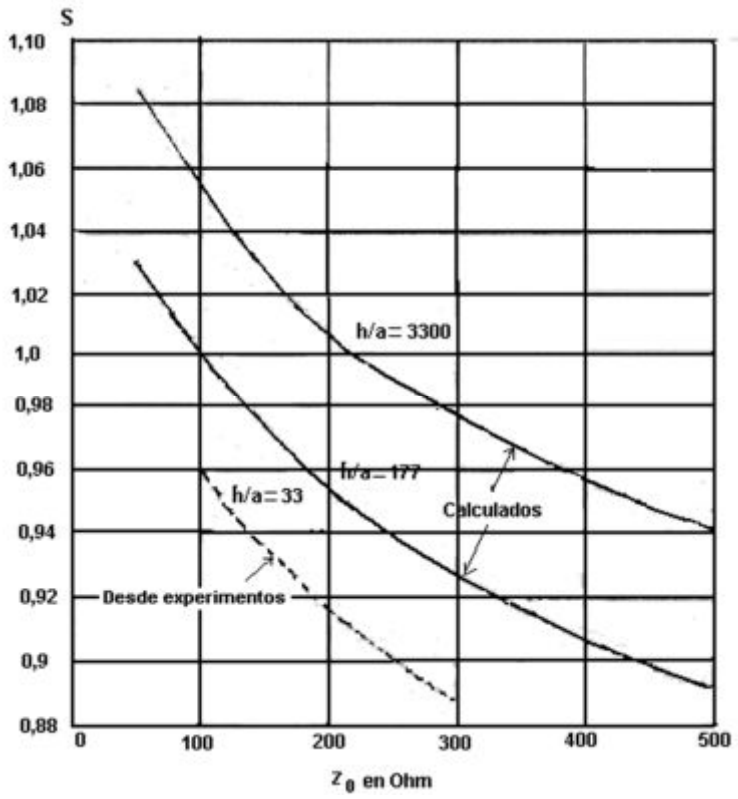


Fig. 1.11. Gráfico de los valores de S Vs $Z0$

12. Hallar las longitudes de los brazos:

$$l_1 = S\,(\lambda max/4) \quad (1.23)$$

$$h_1 = l_1/2 \quad (1.24)$$

$$h_n = \tau h_{n-1} \quad (1.25)$$

13. Determinar los espaciamientos centro a centro entre dipolos:

$$d_1 = 4\sigma h_1 \quad (1.26)$$

$$d_2 = 4\sigma h_2 \quad (1.27)$$

$$d_n = 4\sigma h_n \quad (1.28)$$

Para el caso de la recepción de TV todo el cálculo se ve adaptado para las frecuencias comprendidas dentro de las bandas de VHF banda III o UHF Banda IV y V.

1.6 Antena de Reflector

Para la recepción de la TDT en lugares alejados del transmisor se utilizan antenas de relativa alta ganancia en la banda de UHF como las antenas Uda-Yagi, pero estas poseen anchos de banda relativamente estrechos y aunque las antenas log-periódicas son de mayor ancho de banda, son más complejas eléctrica y mecánicamente [21].

Dentro el grupo de antenas de reflector, una variante a tener en cuenta para el uso en la recepción de la TV es la Antena de Reflector Esquinado, la cual, con el mismo tamaño de la Antena Uda-Yagi, posee 1 dBi más de ganancia. También puede operar en un ancho de banda de 2 a 1 con 5 o 6 dBi más de ganancia que en un ancho de banda de 1.5 a 1 de la Uda-Yagi. El ancho de banda de una antena con reflector lo determina principalmente el tipo de alimentador agregado, como el dipolo Mariposa *(Bow-Tie)* de Brown-Woodward [25].

1.6.1 Antena con Reflector Esquinado

La antena de Reflector Esquinado es muy utilizada en la recepción de TV en UHF por su relativa alta ganancia, ancho de banda satisfactorio, bajo nivel de lóbulos laterales y coeficiente de radiación trasera aceptable. Está constituida por un dipolo colocado a lo largo del plano de la bisectriz dentro de dos planos reflectores, con un ángulo determinado en el vértice, el cual se recomienda como compromiso de diseño 90º, como se muestra en la Fig. 1.12, el cual está alimentado por lo general con un dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$). Generalmente se utiliza planos reflectores de rejilla [25] [26].

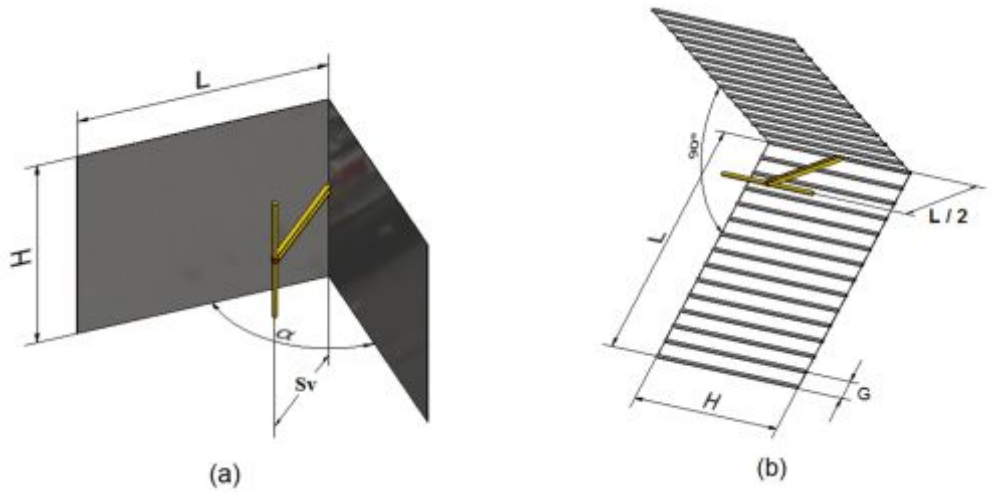


Fig. 1.12. Variantes de antenas con reflector esquinado, (a) con planos de chapas conductoras y (b) con plano de rejilla de conductores rectos

1.6.2 Dipolo Mariposa *(Bow-Tie)*

La alimentación, tanto con dipolo recto o doblado para cubrir la banda de UHF del canal 14 al 52 no resulta conveniente, debido a su ancho banda relativamente estrecho.

Por esa razón se eligió como elemento excitado el dipolo del tipo Mariposa *(Bow-Tie)*, el cual es prácticamente definido por ángulos, y por tanto es inherente de banda ancha, con todas sus variantes prácticas posibles, fabricados con chapa o malla.

Un dipolo, como el mostrado en la Fig. 1.13, con tales características físicas-eléctricas permite cubrir todo el ancho de banda de los canales de TV en UHF, con una ROE por debajo de 2 con respecto a un alimentador de impedancia de 300Ω y un ángulo de vértice α que puede variar entre 60º y 80º [26].

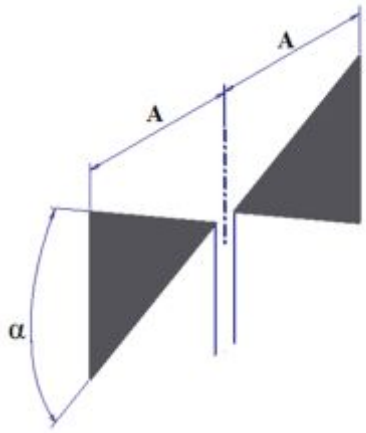


Fig. 1.13. Dipolo triangular Bow-Tie

Para el desarrollo de antenas del tipo Mariposa se puede tomar en consideración los experimentos realizados por Brown and Woodward, mostrados en su artículo "Características de Radiación Determinada Experimentalmente en Antenas Cónicas y Triangulares", donde en este último se muestran resultados en la Fig. 1.14. En el artículo se dan a conocer una serie de resultados de gran relevancia, principalmente aquellos de la impedancia (Z): la parte real resistiva (R) y la parte imaginaria reactiva (X). Los resultados fueron realizados con monopolos, pero en este caso cabe destacar que los valores de R y X se multiplican aproximadamente por 2 porque se trata del dipolo [27].

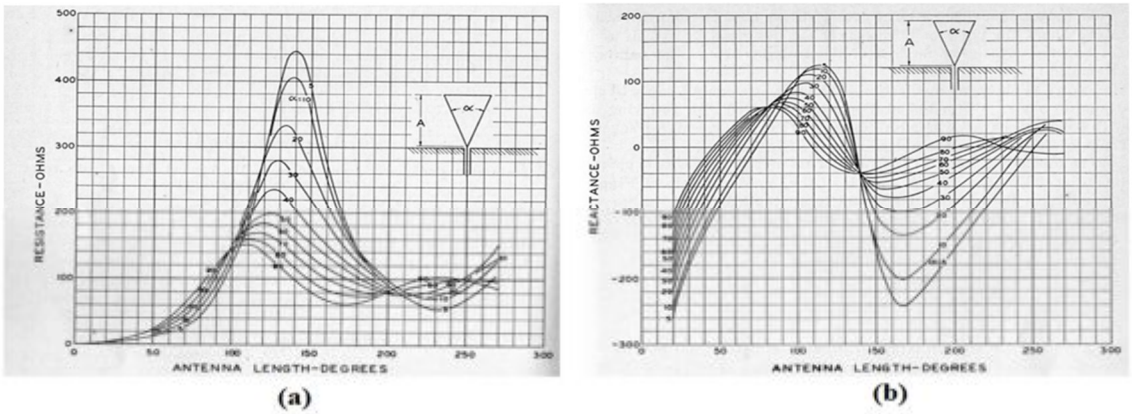


Fig. 1.14. Curvas de Z medidas en el monopolo triangular para diferentes ángulos de apertura de vértice α: (a) Resistencia, (b) Reactancia

1.6.3 Metodología para el diseño de la Antena con Reflector Esquinado para TDT

Para el diseño se recomienda los requerimientos recomendados por John D. Kraus en su libro *"Antennas"*, el cual propone algunos criterios de diseño prácticos para el caso de la antena con reflector de rejilla mostrada en la Fig. 1.15, destinada a cubrir un determinado ancho de banda con una ganancia que puede variar entre 11 dBi a 14 dBi, los cuales son:

- Espaciamiento S_v entre el vértice y el dipolo de 0,4λ.
- Longitud L de cada plano reflector de 1,13λ.
- La longitud H de cada varilla de 1,2λ.
- El espaciamiento centro a centro de las varillas de los paneles reflectores de 0,092λ.
- El diámetro de cada varilla del reflector de 0,015λ.
- El largo del dipolo Mariposa (Bow-Tie) de 0.8λ a la frecuencia central.

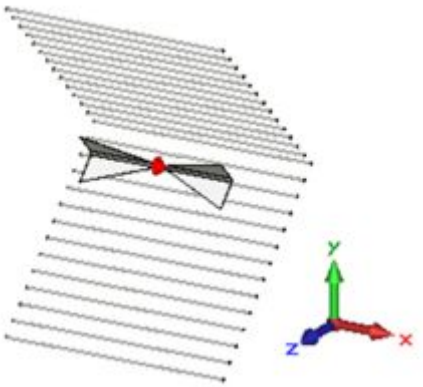


Fig. 1.15. Modelo de diseño propuesto por J. D. Kraus

Los parámetros anteriores son considerados para la longitud de onda media (λc) en el centro de la banda de trabajo y para una ganancia de 13 dBi. El ángulo es de 45º en los vértices de los extremos interiores de cada monopolo Mariposa o Bow-Tie con un doblé de 90º para alimentación con cinta de 300Ω [25].

1.7 Antenas interiores para la recepción de la Televisión Digital

En general las antenas interiores son menos eficientes que las exteriores, debido a que reciben una señal más pequeña y es más recomendable usarlas en una vivienda que este relativamente cerca del transmisor de TV. A continuación mostramos las características básicas de las antenas interiores en TDT [19]:

- Son capaces de captar tanto la banda alta de VHF (170MHz a 230MHz) como la de UHF (470 a 872MHz)
- Suelen tener una ganancia de 2 a 3 dBi las pasivas, cuando se le incorporan elementos activos pueden variar de 20 a 30 dBi.
- Generalmente necesitan un decodificador de TDT
- Son omnidireccionales, ya que suelen ser simples dipolos, lo que no permite orientar directamente la antena a un repetidor y por este motivo no son tan eficaces.
- Para que sean eficientes conviene que estén relativamente cerca del transmisor, de lo contrario, se le incorporaría un elemento activo.
- Son económicas, ya que no requieren de muchos elementos.

En las Fig. 1.16 se muestran varios ejemplos de antenas interiores más comunes utilizadas en la población, que se ofrecen actualmente en la red de Tiendas Recaudadoras de Divisas.

Fig. 1.16. Antenas interiores y Amplificadores para VHF y UHF importados

1.7.1 Antena de Lazo

Entre las antenas, que presentan las características de ser simples, baratas y versátiles se encuentran las antenas de lazo. Este tipo de antenas toman formas diferentes como las de un rectángulo, cuadrado, triángulo, elipse, circunferencia y muchas otras configuraciones. Por la simplicidad en el análisis y construcción, el lazo circular es el más popular y ha recibido la atención más amplia. Dentro de las antenas para recepción en interiores, la más usada es la antena de lazo para la recepción de la TV en la banda de UHF. Se trata de un simple lazo de alambre conductor resonante de diámetro eléctrico aproximadamente una λ en el centro de la banda de UHF, con impedancia de aproximada de 200Ω en el punto de alimentación [28]. Posee una ganancia que varía entre 3.5 dBi a 4.5 dBi en la banda de UHF de TDT.

1.7.2 Amplificadores de señal para la Televisión Digital Terrestre

Los amplificadores de bajo ruido forman parte de los receptores de señal de RF. Estos están ubicados después de la antena receptora y su función es elevar el nivel de señal útil recibida, con la característica principal de tener la menor cifra de ruido posible. Los parámetros fundamentales de los amplificadores son:

- Ganancia.
- Cifra de ruido.
- Eficiencia.
- Ancho de banda.

1.7.3 Características de los amplificadores de RF

En general, los amplificadores presentan características que describen su funcionamiento y limitaciones en una banda de frecuencia. Las características de los amplificadores pueden ser descritas en función de múltiples parámetros, y dependiendo de su aplicación.

Las características de los amplificadores de bajo ruido (LNA) se mencionan a continuación [29].

- Ganancia, que está definida por la potencia de salida y de entrada del sistema.

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{1.29}$$

- Cifra de ruido, que define la relación señal a ruido del amplificador.
- Eficiencia, la cual está definida por:

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{out}}{P_{dcin}+P_{in}} \tag{1.30}$$

  Donde P_{dcin} es la potencia del amplificador en corriente directa.

- Ancho de banda, definido por:

$$BW = f_H - f_L \tag{1.31}$$

  Donde:

  f_H es el límite en frecuencia más alto de operación.

  f_L es el límite en frecuencia más bajo de operación.

1.7.4 Amplificadores con tecnología MMIC

Los amplificadores *Microwave Monolithic Integrated Circuits* o Amplificadores monolíticos (MMIC) se caracterizan por un gran ancho de banda, que algunos puede llegar hasta 8 GHz o aún superior, y una ganancia aproximadamente constante a lo largo de todo el rango de frecuencias. A esto se añade una gran estabilidad y simplicidad circuital [30].

En la Fig. 1.17 se puede ver el encapsulado de estos dispositivos, que tienen un tamaño muy pequeño, aproximadamente de dos milímetros de diámetro. En este caso se muestra el MAR-6 con su circuito equivalente.

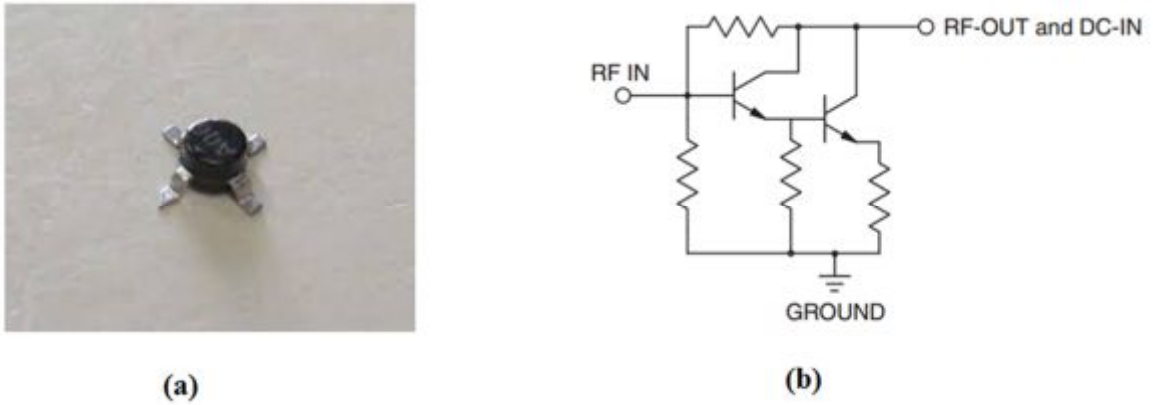


Fig. 1.17. Modelo MMIC del tipo MAR-6, (a) componente real y (b) circuito equivalente

Se podrían resumir los beneficios y mejoras de la cifra de ruido con las siguientes especificaciones típicas de este tipo de circuitos integrados:

- Mayor linealidad y bajo ruido
- La integración del circuito de corriente, el cual simplifica el diseño de la red de acoplamiento.
- Realimentación interna, la cual facilita la adaptación de impedancias a lo largo de un ancho de banda mayor.
- Estabilidad incondicional a lo largo de un mayor rango de frecuencias
- Gran ancho de banda

Mediante el uso de soluciones MMIC a la medida se pueden mejorar las características del sistema, así como la funcionalidad y fiabilidad. Además se reduce el número de componentes, el tamaño del circuito, peso y consumo de potencia, así como los tiempos de ensamblado [31].

1.8 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo quedaron expuestos los principales parámetros y características de la TDT en cuanto a la calidad y sus principales ventajas. Se demuestra que los parámetros de calidad para la correcta recepción de la TDT son fundamentales y deben estar sobre niveles establecidos. Razones por la cual se proponen diversos modelos típicos de antenas las cuales poseen las características propias, tanto en exteriores como en interiores. Por otra parte, se propone el uso de amplificadores para la recepción de señales débiles con tecnología MMIC que por sus ventajas resultan ser los más idóneos para el posterior diseño del módulo activo. También se exponen metodologías de diseño que se utilizarán como punto de partida para la simulación, a través herramientas de software, en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 2: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LAS ANTENAS EXTERIORES E INTERIORES CON MÓDULO ACTIVO

En este capítulo se realiza una breve descripción de las herramientas de software especializadas en las bandas de VHF Y UHF. Se realiza el diseño y simulación de dos antenas exteriores y una interior propuestas utilizando software para las mismas y el análisis de los parámetros radioeléctricos fundamentales. También se realiza el diseño un módulo activo correspondiente con tecnología MMIC para señales de TDT. Por medio del cálculo y simulación por software de las mismas tiene como objetivo analizar el comportamiento en cada banda de frecuencias de trabajo. Por último, se proponen algunas características constructivas para su posterior fabricación.

2.1 Selección y descripción del software de simulación electromagnética a utilizar

Para el modelado y simulación del diseño de las antenas de TDT se utilizó el software *CST Microwave Studio 2015*. Esta herramienta estimula al desarrollo de tecnologías en las bandas de VHF y UHF con una gran variedad de opciones.

2.1.1 CST Microwave Studio

El programa de simulación *CST Microwave Studio 2015 (CST-MS)* es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en tres dimensiones (3D) basado en el método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo. Es un programa creado por la empresa CST *(Computer Simulation Technology)*, que se dedica a proporcionar software para el diseño electromagnético en todas las bandas de frecuencia. Algunas aplicaciones típicas incluyen dispositivos de RF y microondas para comunicaciones móviles

inalámbricas. Es un programa muy completo con multitud de opciones de configuración, ajuste y presentación de resultados, que permiten obtener una visión del comportamiento de los diseños electromagnéticos. Dispone de una interfaz gráfica muy potente, que permite generar todo tipo de superficies y volúmenes, pudiéndose combinar de forma booleana para generar nuevas formas según convenga.

La complejidad que entraña el uso de este programa ha implicado el estudio minucioso de tutoriales y guías de uso para comprender los fundamentos de la generación de estructuras y el funcionamiento de los motores de simulación.

A la hora de diseñar, se definen las unidades en las que se trabajan, MHz para la frecuencia, así como mm para las dimensiones físicas. El material que se utiliza en el diseño se puede escoger entre un conductor eléctrico perfecto (PEC) y un material real con su permisividad y sus pérdidas [32] [33]. Otro aspecto importante es elegir el rango de frecuencias con el que se trabaja.

El programa dispone de 5 módulos de cálculo:

- ✓ *Transient Solver*
- ✓ *Eigen Mode Solver*
- ✓ *Frequency Domain Solver*
- ✓ *Resonant: Fast S-Parameter solver*
- ✓ *Resonant: S-Parameter Fields solver*

El módulo Solucionador Transiente *(Transient Solver)* es la más utilizada en la simulación de antenas, fundamentalmente en las simulaciones efectuadas. Es un simulador electromagnético en 3D de propósito general que proporciona la propagación del campo bajo estudio en el dominio del tiempo. Es la herramienta más flexible del programa y permite simular la mayoría de problemas electromagnéticos.

Una vez elegido el simulador *Transient Solver*, se pueden definir 2 tipos de puertos:

- ✓ *Waveguide Port.*
- ✓ *Discrete Port.*

A la hora de realizar las simulaciones de las antenas, se ha optado por utilizar Puerto Discreto (*Discrete Port) y* Puerto de Guía de Onda *(Waveguide Port)* con el fin de satisfacer las diversas variantes de alimentación de las antenas.

Con la utilización del software se encontrarán los diferentes parámetros como son el patrón de radiación, la impedancia de entrada compleja, la razón de onda estacionaria (ROE), la ganancia directiva, el coeficiente de radiación trasera, el ángulo de elevación y la polarización, entre otros, variando las características físico-constructivas de la antena, y se obtendrá un método de diseño para las antenas utilizadas, según los resultados obtenidos.

2.2 Diseño y simulación de la Antena Log-Periódica de Arreglo de Dipolos (LPDA) para la recepción TDT

En la práctica se ha demostrado que en la TDT, a pesar de la robustez de la señal, ésta se puede deteriorar por agentes ruidosos de cualquier naturaleza que afectan la recepción. Es por ello que la Comisión de la TV Digital encomendó a la Empresa de Antenas de Villa Clara la tarea de realizar antenas multibandas con ganancia de potencia relativamente mediana. Estas antenas deben poseer aproximadamente entre 5 dBi y 7 dBi de ganancia de potencia para viviendas que estuvieran cercanas al transmisor, aproximadamente hasta 30 km, pero como principal característica, que tuviera buen desempeño en la banda de VHF, desde el canal 7 al 13, y en la banda de UHF, desde el cana 14 al 52.

Para el diseño de la antena multibanda primeramente se realiza el cálculo teórico de la antena LPDA empleando el método de Carrel con el apoyo del software LPCAD 35 para antenas LPDA. Posteriormente se utiliza el software *CST Microwave Studio 2015* para mejorar las características de impedancia y radiación obtenidas mediante la variación de los parámetros factor de escala (τ), factor de forma (σ) y espaciamiento centro a centro de la línea de alimentación de los dipolos (S).

2.2.1 Diseño de la Antena LPDA para las Bandas de VHF y UHF

La antena principal está formada por dos secciones LPD: sección para VHF y sección para UHF, calculadas inicialmente con los mismos parámetros τ y σ con el objetivo de obtener comportamientos radioeléctricos relativamente similares en las bandas de

frecuencia de trabajo. Posteriormente se unirán y se analizará el comportamiento a través de la simulación.

Para los cálculos se elige una ganancia directiva recomendada de 7 dBi. Se selecciona el valor mayor para compensar las pérdidas de propagación debido a que en UHF son aún mayores. Con esa ganancia y llevada a la Fig. 1.1 se encuentran los valores aproximados de τ y σ óptimo para 7dBi:

$\tau = 0.82 \qquad \sigma = 0.15$

Para hallar el σ óptimo se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\sigma_{opt} = 0.243\tau - 0.051 \tag{2.1}$$

Esta ecuación representa la línea recta con pendiente positiva en la Fig. 1.10. Se utiliza para encontrar el valor de σ de forma rápida [34].

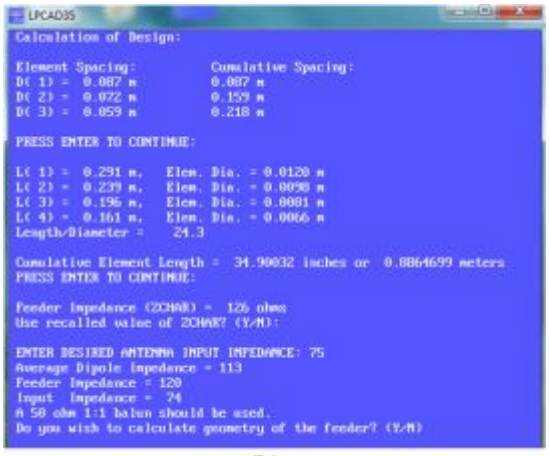
Calcular alfa (α) en grados mediante la ecuación:

$$\alpha = \tan^{-1}[(1-\tau)/(4\sigma)]$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{1-0.82}{4*0.138}\right] = 16.7°$$

A continuación se muestran los pasos de diseños utilizados en LPCAD 35 a través de la Fig. 2.1.

(a)



(b)

Fig. 2.1. Presentación del software LPCAD 35 para el diseño de la antena LPDA sección de UHF: (a) ventana de inserción y cálculo de los parámetros esenciales, (b) cálculo de los parámetros constructivos de los dipolos, (c) cálculo de la línea de transmisión y (d) presentación de las características generales de la antena

En el diseño de la antena LPDA se tienen en cuenta que los parámetros de diseños τ y σ son los que regulan la ganancia, el ancho de banda y la longitud de la misma. A través de LPCAD 35 se pueden lograr los ajustes de los parámetros para lograr la antena con el mejor desempeño, ya que este software utiliza las ecuaciones de diseño ofrecidas en algunas bibliografías [34] para un mejor diseño en el menor tiempo posible. En este software se realizaron dos antenas básicas: la del canal 7 al 13 y la del canal 14 al 52, que posteriormente se unieron para formar una sola para las 2 bandas.

El cálculo de antenas LPDA con el LPCAD 35 consiste en introducir valores como: la frecuencia inferior (f_{min}), la frecuencia superior (f_{max}),τ, σ y el diámetro del primer elemento. Con estos datos el software puede calcular el número de dipolos, que en este caso es 4, la longitud, el diámetro, y el espaciamiento entre ellos como se muestra en la Fig. 2.1 (a) a través de los valores iniciales de longitud del primer elemento con L_1 = 291 mm y separación con respecto al segundo d_1 = 87 mm. También permite calcular la impedancia de la línea de transmisión que alimenta los dipolos a partir de la impedancia de entrada de 75 Ω. Se eligió la opción de una línea de transmisión tubular cuadrada con arista de 18 mm para realizar el cálculo de la separación (S_l = 32.8 mm) centro a centro. En la Fig. 2.1 (d) se muestran las características generales de la antena diseñada que se tendrán en cuenta

para la simulación posterior. En el Anexo II se muestran los cálculos de la sección de VHF en LPCAD 35.

2.2.2 Simulación de la Antena LPDA

Para el cálculo y modelado electromagnético se utilizó la herramienta del software *CST Microwave Studio 2015* teniendo en cuenta su poder de cálculo. Este se realiza a través del método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo donde queda discretizada la estructura a través de mallas, las cuales conllevan mayor tiempo de cálculo y recursos al poseer mayor densidad en dicha estructura. Es por ello que algunos detalles, como tornillos, tuercas, aislantes, etc. no se consideran en la simulación para evitar el mallado con mucha densidad. En la Fig. 2.2 se puede observar un modelo sobre el CST-MS y el equivalente real.

Fig. 2.2. Modelos de la antena LPDA de 7 elementos de 75Ω propuesta: (a) real, (b) CST-MS

Como parámetros de la simulación se tuvo en cuenta que la antena debe operar desde 174 MHz hasta 216 MHz, y desde 470 MHz hasta 698 MHz, que el diámetro de todos los dipolos es igual, debido a que solo existe disponibilidad de varillas de 10 mm para la posterior fabricación del prototipo. La alimentación se realiza por el extremo delantero con un cable coaxial, a través de un balun 1:1, por lo que se debe considerar la inserción de la alimentación con puerto de guía de onda que simule dicho cable. Los parámetros de diseño fundamentales elegidos para una ganancia dentro del rango requerido son: $\tau = 0.82$ y $\sigma = 0.15$. Queda como último requerimiento que la antena no debe exceder los 800 mm de longitud total.

2.2.3 Optimización y análisis del comportamiento de la antena LPDA

Con la última optimización se obtuvo una antena que posee características de ROE por debajo de 2 en las Bandas de VHF Banda III (canal 7-13) y UHF (canal 14-52) para 75Ω de impedancia. Las demás bandas son rechazadas producto que la ROE se encuentra con valores muy por encima de 2. Estos resultados se obtuvieron realizando un barrido del parámetro constructivo correspondiente a la separación centro a centro de los tubos de la línea de alimentación S_l, donde los mejores resultados se obtuvieron con el valor de 28 mm. Tal comportamiento se muestra en la Fig. 2.3.

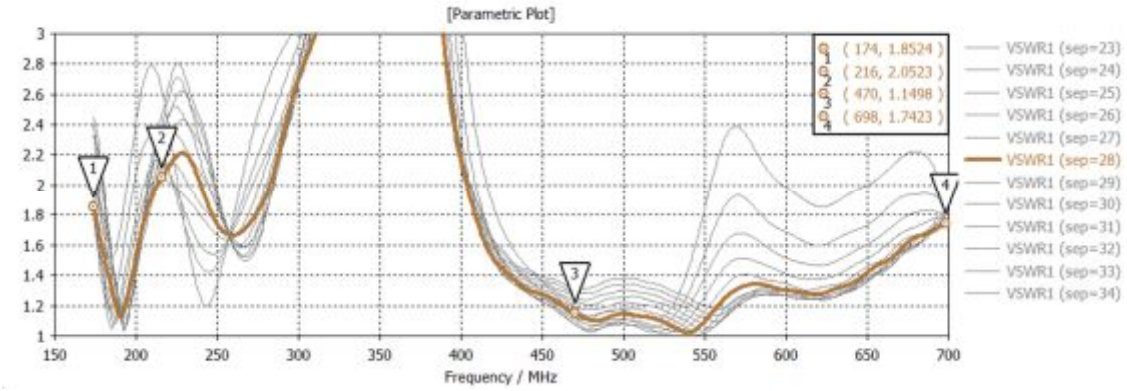


Fig. 2.3. Comportamiento de la ROE en las bandas de frecuencia de trabajo para la línea de 75Ω

La Ganancia de potencia, en la banda de VHF, posee un valor promedio de 5.8 dBi, mientras que en la banda de UHF posee 7 dBi. La ganancia en VHF es menor debido a que en esa sección se redujeron los parámetros de $\tau = 0.78$ y $\sigma = 0.14$ para disminuir la longitud de la antena en general y poder cumplir con la longitud recomendada. En VHF no son críticos los problemas de las pérdidas de propagación y de cobertura de los transmisores. Es por ello que la antena no requiere ganancia relativamente alta en esa banda. El comportamiento de la ganancia en función de la frecuencia se muestra en la Fig. 2.4 para ambas bandas de trabajo.

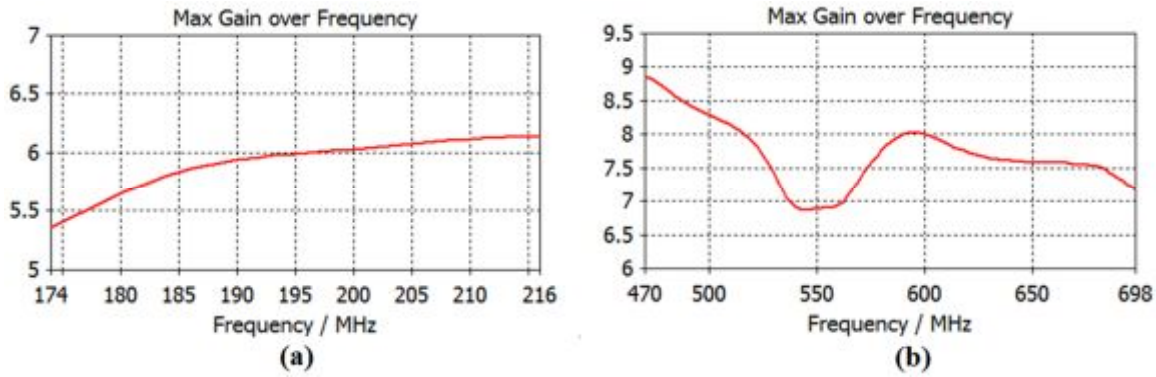


Fig. 2.4. Comportamiento de la ganancia de potencia en la banda de trabajo: (a) VHF y (b) UHF

La antena posee un coeficiente de radiación trasera promedio de 13 dB para la banda de VHF y 17.8 dB para la banda de UHF. En el Anexo III se muestran estas características en función de la frecuencia. Esta relación se puede observar mediante el patrón de radiación en el plano horizontal, en el espacio libre, para la frecuencia de 195 MHz que representa el centro de la banda de VHF y 600 MHz, cerca del centro de la banda de UHF mostrado en la Fig. 2.5.

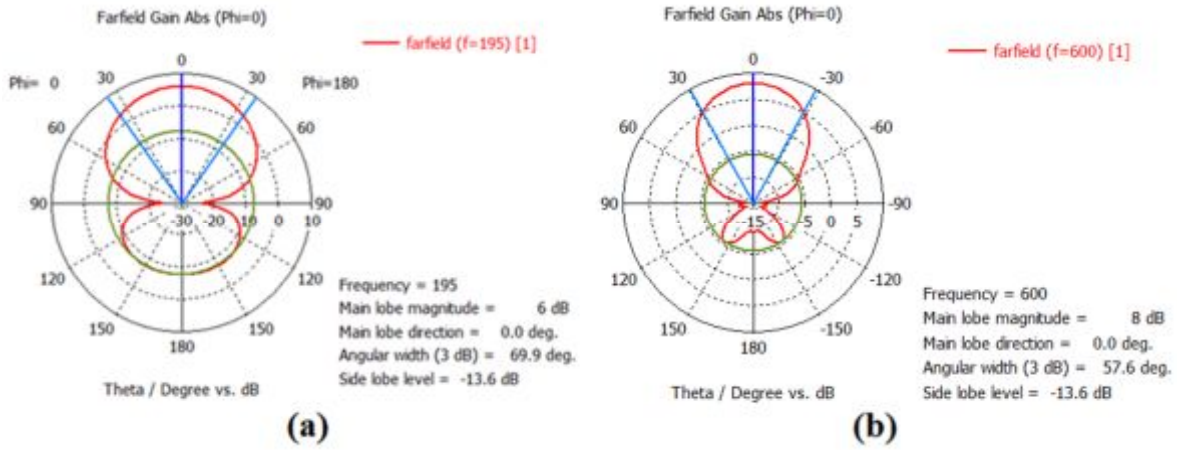


Fig. 2.5. Patrón de radiación en el plano horizontal en el centro de la banda de trabajo: (a) VHF y (b) UHF

2.3 Diseño y simulación de la Antena de Reflector Esquinado para la recepción de la Televisión Digital Terrestre

En primer lugar se realizó el cálculo y simulación de una antena con los requerimientos recomendados por John D. Kraus en su libro *"Antennas"*, el cual propone algunos criterios

de diseño prácticos para el caso de la antena con reflector de rejilla mostrados en el epígrafe 1.6.3 [25].

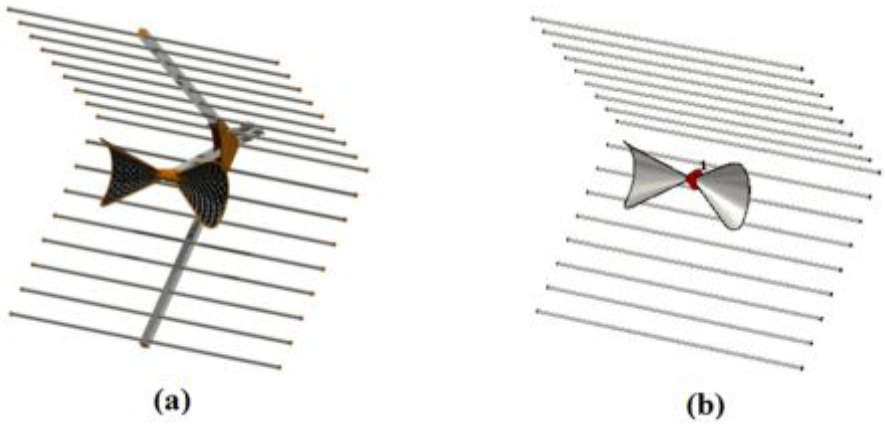
En la Tabla I se muestran los valores en milímetros según las recomendaciones anteriores. Estos valores fueron tomados con el objetivo de realizar una primera simulación con el software CST-MS para el análisis posterior de los resultados. Donde queda estructurado el reflector con 27 varillas de 616 mm cada una.

Tabla I: Dimensiones de la antena recomendada

Parámetro	**Valores en mm**
S_v	205
L	580
H	616
G	47
Diámetro Varillas	8
Longitud Mariposa	411

La máxima ganancia está cerca del extremo superior de la banda, en 674 MHz, con 13.6 dBi de ganancia de potencia, mientras que en las frecuencias del extremo inferior y central se encuentra entre 11 dBi y 13 dBi. Queda demostrado que la ganancia aumenta con la frecuencia, favoreciendo a las más altas y disminuye en las más bajas. L y H son menores en longitudes eléctricas, en las frecuencias más bajas y trae consigo un decremento de la ganancia [25]. La ROE está entre 1.6 y 3.2, valores muy elevados para antenas de TV.

En la Fig. 2.6 se puede observar el modelo para simulación con el CST-MS y el modelo real equivalente.



(a) (b)

Fig. 2.6. Modelos de la antena de Reflector Esquinado para 300 Ω con 17 varillas: (a) real, (b) CST-MS

2.3.1 Diseño del Dipolo Mariposa

Utilizando un dipolo del tipo Mariposa se obtienen mejores resultados, tomando un ángulo de 80º en el vértice de ambos monopolos [27]. Doblándolo en forma semicónica se puede lograr reducir el tamaño del dipolo para evitar un posible contacto físico con los paneles del reflector esquinado como se muestra en la Fig. 2.7. En este caso se utiliza con los bordes redondeados, que permite mayor facilidad para la colocación de un borde de goma o plástico para cubrir los cortes filosos que pueden producir accidentes.

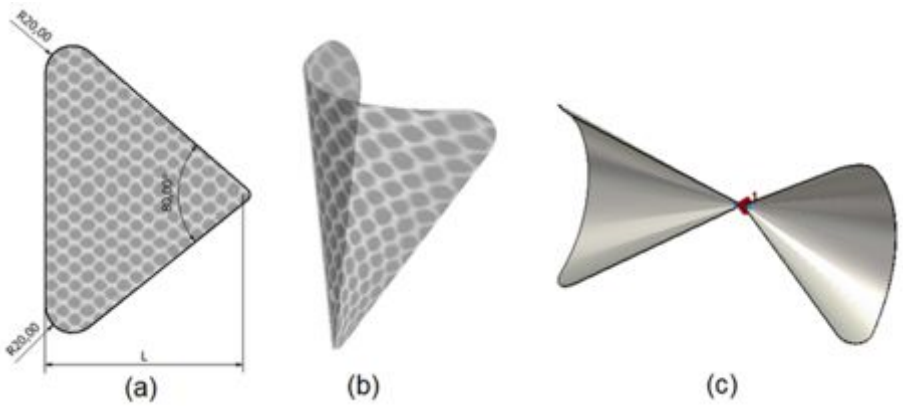


Fig. 2.7 Dipolo Mariposa (Bow-Tie) propuesto como alimentador de la antena reflector esquinado (a) monopolo fabricado con chapa mallada, (b) doblado semicónico del monopolo y (c) dipolo propuesto

2.3.2 Optimización y Análisis del comportamiento de la Antena de Reflector Esquinado

La propuesta anterior recomendada por John D. Kraus resulta tentadora pero costosa y poco resistente mecánicamente. Es por ello que dio lugar a reducir el número de varillas, aumentando la separación G entre ellas, y de los planos reflectores a 500 mm, teniendo en cuenta la longitud de onda en el centro de la banda, lo cual se muestra en la Tabla II.

Tabla II: Dimensiones propuestas optimizadas

Parámetro	Valores en mm
Sv	250
L	500

H	700
G	62.5
Diámetro de Varillas	8
Longitud Bow-Tie	305

El número de varillas se fue reduciendo hasta quedar en 17, y como compensación se incrementaron las longitudes de las varillas a 700 mm para favorecer las frecuencias más bajas. La ROE presenta una mejoría por debajo de 1.5 en toda la banda y se puede observar el comportamiento en la Fig. 2.8.

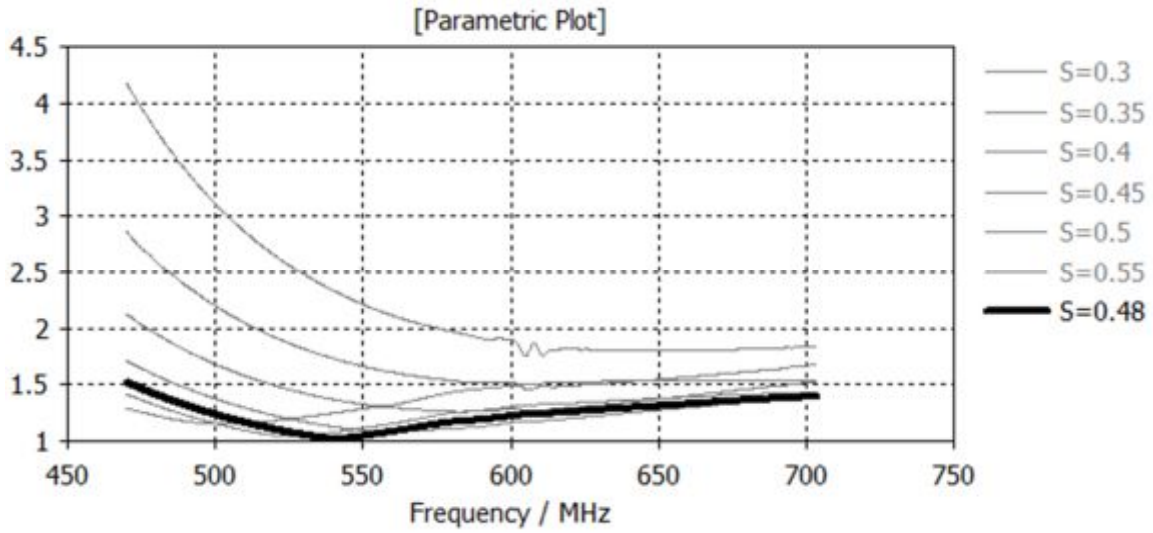


Fig. 2.8. Comportamiento de la ROE de la antena con 17 varillas, optimizada en longitud L, H y con separación del dipolo al vértice del reflector diedro $S_v = 0.48\lambda$

La ganancia máxima posee un decremento de 1 dBi con relación al modelo original. Según la Fig. 2.9, la guanacia posee el valor máximo de 12.5 dBi en el centro de la banda de UHF y decrece en los extremos hasta 10.3 dBi en el inferior. El coeficiente de radiación trasera es 45 dB máximo en la frecuencia inferior y disminuye hasta 23 dB a la frecuencia superior.

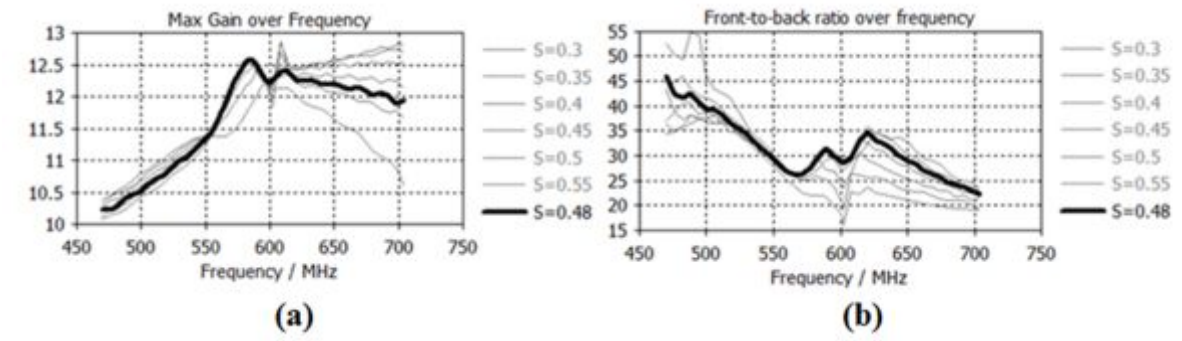


Fig. 2.9. Comportamiento de la antena con 17 varillas optimizada: (a) ganancia de potencia y (b) coeficiente de radiación trasera o F/B

En la Fig. 2.10 se muestra los patrones de radiación en diversos planos característicos de este modelo optimizado en 600 MHz.

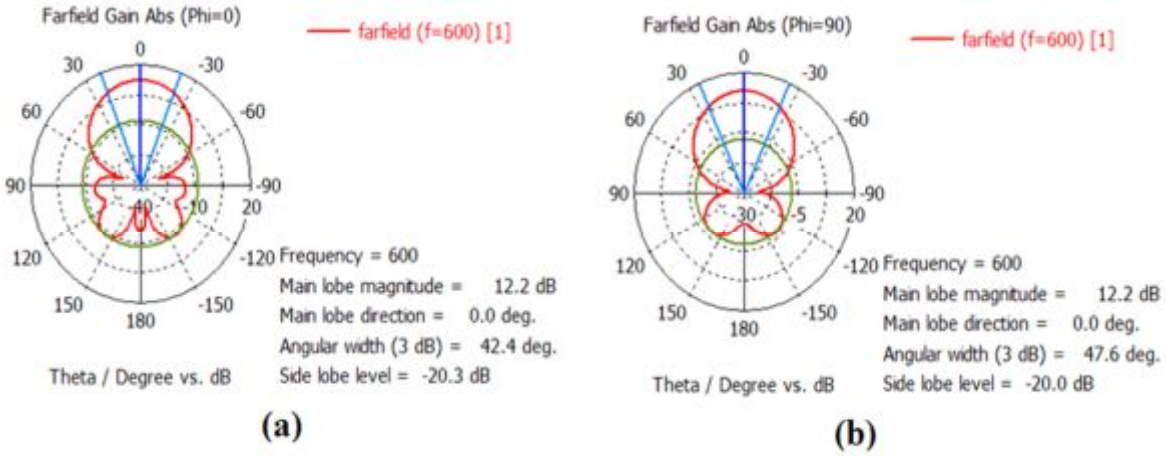


Fig. 2.10. Patrón de Radiación de la antena de Reflector Esquinado en el centro de la banda, (a) Patrón de radiación en el Plano Horizontal E y (b) En el Plano Vertical H

Los lóbulos laterales pueden favorecer la influencia de las reflexiones multitrayecto de la señal y otros ruidos de gran magnitud, pero también se aprovechan las bondades y robustez de la señal digital bajo la Norma China DTMB contra éstos, como son: el Código PN Pseudo-aleatorio de Ruido (*PN-Pseudo-random Noise*) como intervalo de guarda de cada símbolo, que permite una sincronización más rápida del sistema y una estimación del canal más precisa, y la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, o Modulación por División de Frecuencia Ortogonal) utilizada en redes inalámbricas bajo estas influencias [35].

2.4 Diseño y simulación de la antena interior para la recepción de TDT

Para el diseño de la Antena de Lazo (*Loop*) primeramente se debe definir las dimensiones constructivas de la antena como son (a) el radio del lazo y (b) el material empleado. Eléctricamente en los lazos grandes se puede asumir el criterio de que el perímetro de la circunferencia del lazo (C_l) es aproximadamente igual a la longitud de onda (λ), por tanto, se define C_l como [36]:

$$C_l = 2\pi a \simeq \lambda\,[m] \tag{2.2}$$

Dónde para definir λ se trabajará con la frecuencia central o frecuencia de trabajo f_0.

$$f_0 = \frac{f_{máx} + f_{min}}{2}\ [MHz] \tag{2.5}$$

$$f_0 = \frac{704 + 470}{2} = 587\ MHz$$

Por tanto:

$$\lambda = \frac{C}{f_0} = \frac{300}{587} = 0.511\ m$$

$$C_l = 2\pi a = 0.511\ m$$

Luego el radio del lazo queda definido por:

$$a = \frac{0.511}{2\pi} = 0.0813\ m \simeq 81.3\ mm$$

El radio del conductor empleado se seleccionó de 4 mm aproximadamente para el diseño.

2.4.1 Simulación de la Antena de Lazo

Al estar definidas las dimensiones fundamentales de la antena, se realiza el diseño con el software CST-MS y se establece la alimentación de la antena empleando un puerto discreto de 300 Ω, ya que dicho valor es típico para estas antenas. Utiliza un puerto discreto balanceado proporcionando la disposición del lazo con la polarización horizontal establecida, luego se procede a la simulación del diseño.

En la Fig. 2.11 se muestra el modelo simulado con el software y el modelo real equivalente.

Fig. 2.11. Modelos de la antena de Lazo para 300 Ω: (a) real, (b) CST-MS

2.4.2 Optimización y análisis del comportamiento de la Antena de Lazo

Al proceder con la optimización del prototipo diseñado se obtuvo un valor del radio del lazo de 93 mm aproximadamente. La frecuencia de resonancia para este caso se acercó más a la frecuencia central (fc) de la banda para un valor aproximado de 570 MHz pero el ancho de banda (BW) en cuanto a impedancia posee valores de ROE inferiores a 2. Solo se alcanza un ancho de banda de 90 MHz aproximadamente. Este valor es debido a que la antena de lazo presenta como característica una Q (relación entre la fc y el BW) alta con relación a otros tipos de antenas. En la Fig. 2.12 se muestran los resultados en CST-MS.

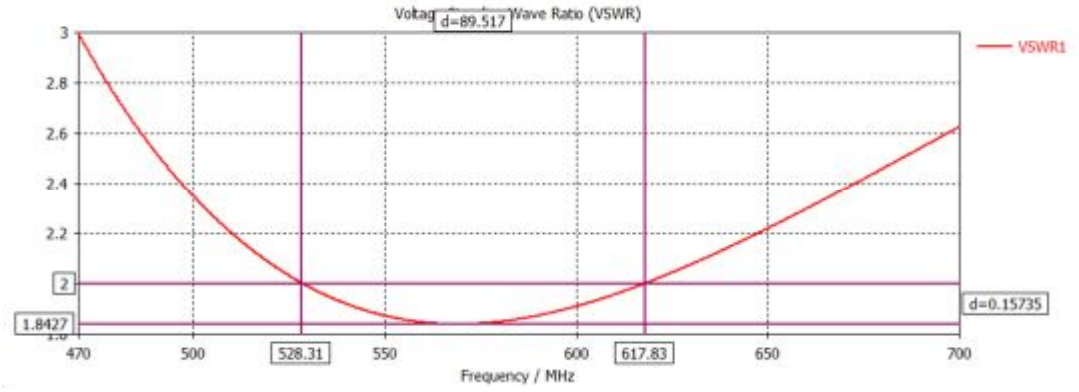


Fig. 2.12. Comportamiento de la ROE de la antena de lazo con radio de 97 mm

En la Fig. 2.13 se muestran los patrones de radiación en el centro de banda así como la ganancia (3.89 dBi) de la antena, que se presenta dentro de los valores característicos relativos de las antenas de lazo de longitud aproximadamente una λ.

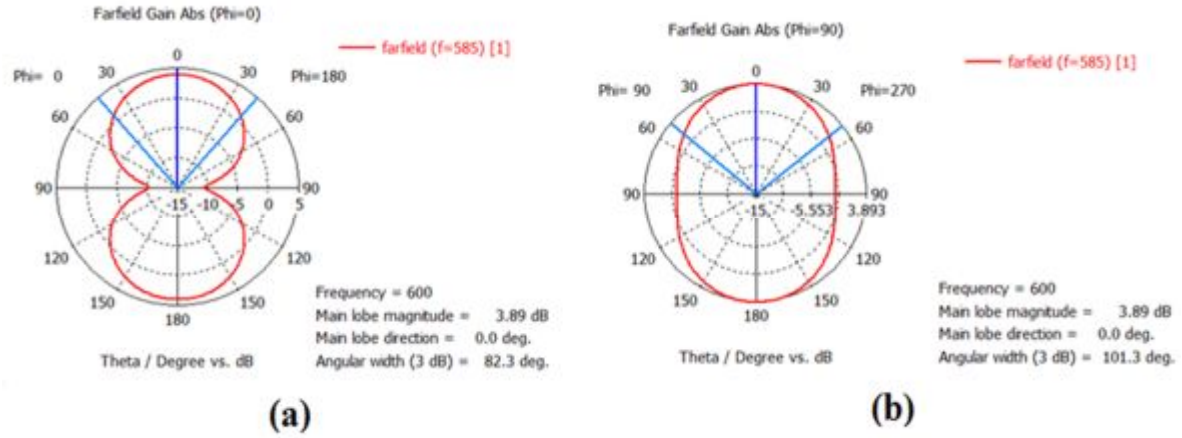


Fig. 2.13. Patrón de Radiación de la antena de Lazo en el centro de la banda de trabajo, (a) Patrón de radiación en el Plano Horizontal E y (b) En el Plano Vertical H

2.5 Propuesta del módulo activo para antenas interiores

Para el diseño del módulo activo o amplificador de RF se consideran las ventajas de la tecnología MMIC. El componente electrónico MMIC escogido para el diseño fue el MAR-6 porque presenta características de ganancia típica promedio de 20 dB en UHF y la más baja cifra de ruido con valor de 3.0 dB de la serie MAR-X. Las características técnicas del MAR-6 se muestran en el Anexo IV.

2.5.1 Diseño del Amplificador de RF

En la Fig. 2.14 se tiene el circuito típico del MMIC. La señal a amplificar se aplica al terminal de entrada a través de un capacitor de paso. En el terminal de salida se encuentra un resistor conectado al positivo de la alimentación que proporciona la corriente de funcionamiento del dispositivo. Un capacitor de bloqueo de corriente directa acopla la señal de salida al paso siguiente. Un choque de RF opcional proporciona una ganancia más constante en la parte alta del ancho de banda.

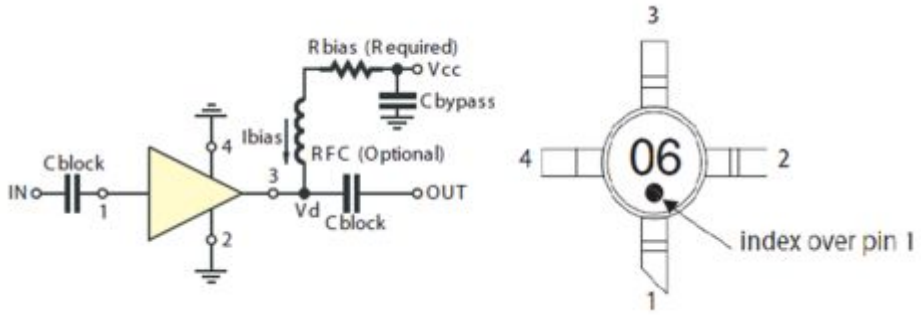


Fig. 2.14. Esquema del circuito del MMIC MAR-6.

El circuito permite configuraciones en cascada de una manera sencilla debido a que tanto la entrada como la salida presentan la misma impedancia (50Ω ó 75Ω). No requieren redes de adaptación de impedancia entre etapas amplificadoras lo cual complicaría el diseño y fabricación del amplificador.

2.5.2 Diseño del circuito impreso

Para el diseño de la placa de circuito impreso, el esquema anterior presentado se utiliza como soporte de la herramienta de cálculo analítico de líneas de transmisión del software CST-MS. Este brinda todo tipo de variedad de líneas de transmisión, fundamentalmente de microcintas, con las que se diseñan los amplificadores de RF. Se le dieron las dimensiones a la placa empleándose un sustrato de baquelita, que presenta una permisividad dieléctrica de 4.75, y se determinó la lámina de cobre de espesor igual a 0.035 mm. Estos valores dieron como resultado líneas de transmisión con impedancia de 75 Ω, que se corresponde con la impedancia interna, de entrada y salida del módulo de RF empleado.

Empleando el software *PCB Wizard 3.50 Pro Unlimited*, que es un software de fácil operación para el diseño de circuitos impresos sencillos, se diseñó el circuito a utilizar mostrado en la Fig. 2.15.

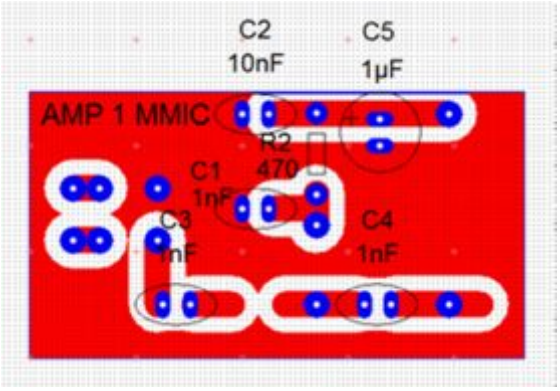


Fig. 2.15. Circuito impreso del módulo activo con MMIC para VHF y UHF

2.6 Características mecánicas de las antenas para TDT

Para la fabricación del prototipo se utilizaron algunos materiales disponibles en la Empresa de Antenas de Villa Clara, entre otros reciclados, principalmente plásticos de tubos de PVC para el conformado estructural. Los modelos constructivos de antenas diseñadas se realizaron con el software Autodesk Inventor que es muy utilizado para el modelado y simulación de estructuras mecánicas.

2.6.1 Materiales utilizados y descripciones técnicas

La antena LPDA de 75 Ω propuesta en el futuro puede tener gran aceptación en el mercado nacional por lo que debe estar catalogada técnicamente como antena ADM010. Está caracterizada como robusta, no requiere del ensamble en general por parte del cliente, pues solo se deben colocar los dipolos y posteriormente su fijación al mástil. Posee una adecuada descripción técnica y en la Fig. 2.16 se muestran algunos detalles técnicos.

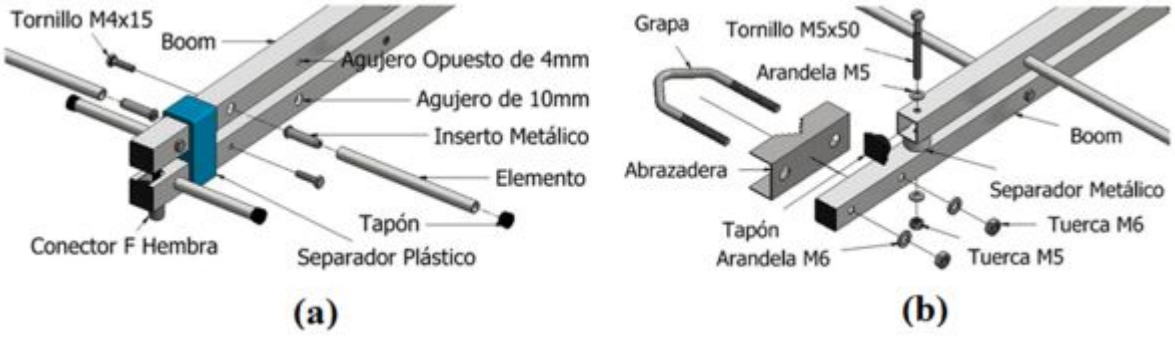


Fig. 2.16. Modelo de descripción técnica de la antena LPDA del tipo ADM 010: (a) elementos y alimentación, (b) fijación

Los materiales para llevar a cabo la realización de la Antena de Reflector Esquinado también se encuentran disponibles. Se cuenta con la tecnología para la realización de una producción masiva de antenas reflector esquinado, a la cual se le designó el modelo comercial ADM020 mostrado en la Fig. 2.17.

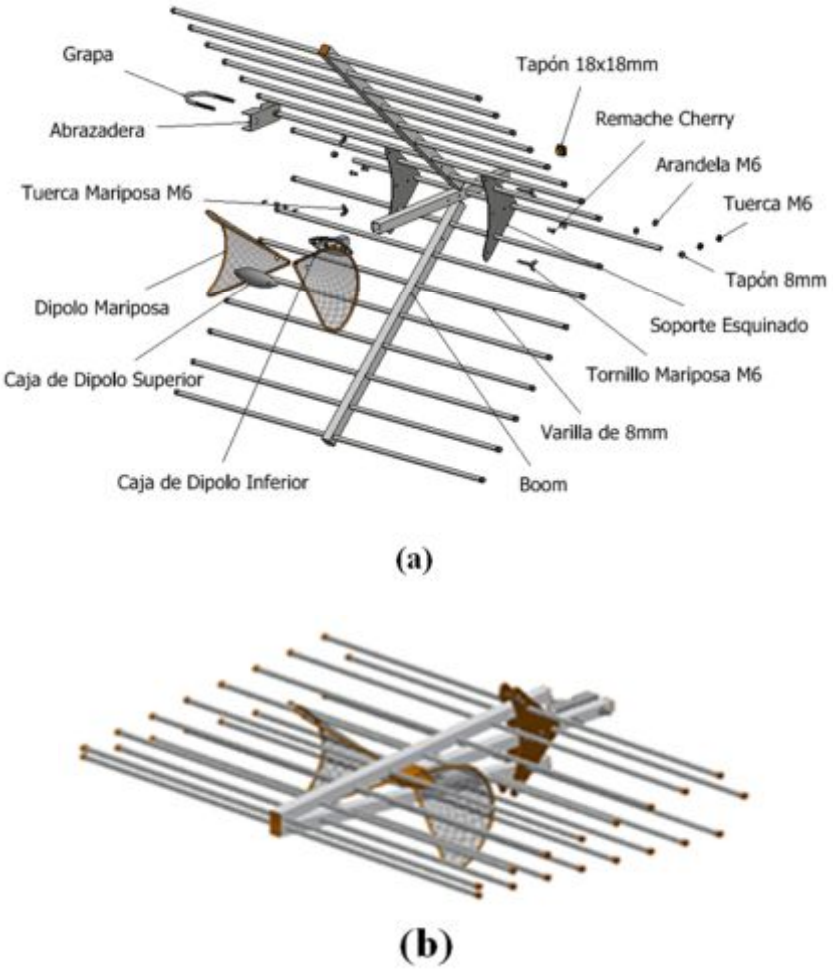


Fig. 2.17: Modelo de la antena ADM020 para propósitos comerciales: (a) despiece de la antena y (b) plegado de la antena para su empaquetado y transportación

El modelo del prototipo propuesto como antena interior requiere materiales más complejos. Considerando la facilidad de manipulación del PVC, se elige el conformado de la estructura en general. Este último modelo aun está en proceso de análisis para su posterior fabricación por lo que no se tiene en cuenta como modelo comercial. A continuación en la Fig. 2.18 se muestra un modelo de despiece donde se encuentran señalados los componentes que conforman la antena para su fabricación.

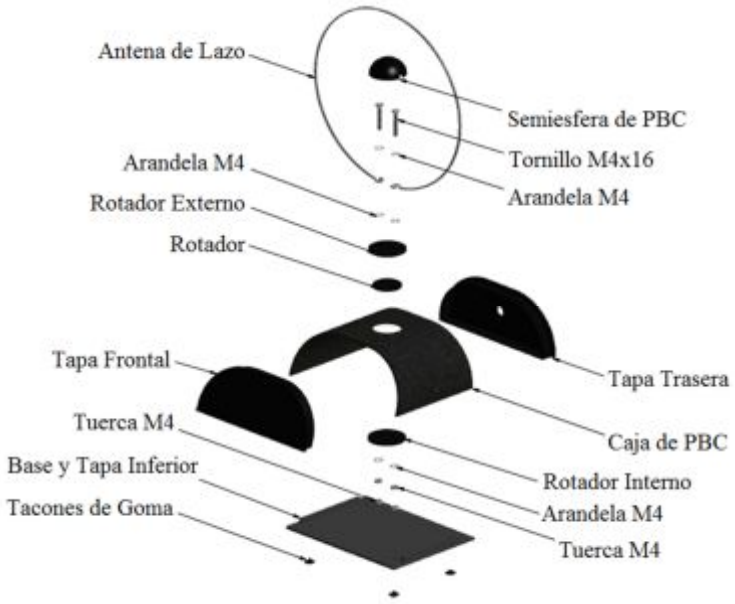


Fig. 2.18. Modelo de despiece de la Antena Interior de Lazo para prototipo

El diseño del amplificador también se realizo a nivel de prototipo. Se está valorando la posibilidad de la realización de los mismos para que se puedan utilizar tanto en antenas interiores como en exteriores.

2.7 Conclusiones del capítulo

En el capítulo se diseñaron dos modelos de antenas exteriores y un modelo de antena interior utilizando la herramienta de software *CST Microwave Studio*. La utilización del software LPCAD 35 redujo la complejidad del cálculo y diseño de la antena LPDA. Según los resultados de las simulaciones la antena LPDA posee mayor ancho de banda y está destinada para trabajar tanto en la banda de VHF como la de UHF aunque por su ganancia relativamente mediana su uso se limita en localidades cercanas del transmisor. Por otra parte la Antena de Reflector Esquinado posee ganancia relativamente alta y destinada para localidades lejanas que reciben la señal de TDT en canales de UHF. También por su capacidad de recepción se puede utilizar como antena colectiva donde se requiere la entrega de altos niveles de señal para su distribución hacia múltiples TV Digitales o Set Top Box en una misma edificación. La ganancia relativamente baja de la antena interior puede ser compensada con el diseño de un módulo activo con MMIC para su incorporación en la misma. Por último se exponen características constructivas que dan lugar a la fabricación de los prototipos que serán objetos de mediciones y validaciones en el siguiente capítulo.

CAPITULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDICIONES Y VALIDACIONES DE LOS PROTOTIPOS DE ANTENAS PROPUESTAS PARA LA TDT

En este capítulo, fundamentalmente, se darán a conocer los resultados experimentales después de la construcción de los prototipos de antenas propuestas y realizar las comparaciones de los resultados simulados con los medidos. Las mediciones experimentales se realizaron en la Empresa de Antenas de Villa Clara y en algunas localidades del territorio villaclareño.

3.1 Descripción técnica del equipamiento utilizado en las mediciones

Los instrumentos y accesorios empleados se muestran en el Anexo V y se describen a continuación. Estos instrumentos son utilizados en el Laboratorio de I+D de la Empresa de Antenas de Villa Clara y que estuvieron disponibles para realizar las mediciones experimentales de los prototipos.

3.1.1 Analizador de Espectro

Para la realización de las mediciones se utilizaron dos tipos de analizadores de espectro:

El analizador de espectro HAMEG HM5014-2 se utilizó como generador de señal. Posee un margen de frecuencia de salida 150 kHz hasta 1050 MHz y niveles de salida desde -50dBm hasta 1dBm. Se utiliza principalmente para generar una señal sinusoidal de 0 dBm en frecuencias dentro de las bandas de la TDT que junto con la incorporación de una antena transmisora tiene como objetivo la generación de la señal de referencia que es utilizadas para realizar mediciones de parámetros típicos de las antenas.

El analizador de espectro DEVISER DSA-8853T es de última generación y fue utilizado para medir las pérdidas por retorno, potencia recibida y conformado del patrón de radiación [37]. En el Anexo V se muestran las características de este instrumento.

Se empleó como accesorio principal el Puente de Medición de pérdidas por retorno RLB150N5A con un rango de frecuencia de 5-3000 MHz, cable RG-6 de 50Ω, Adaptador de Impedancia de 75Ω a 50Ω con una atenuación de 5.7 dB y un Balun con adaptación de impedancia de 300Ω a 75Ω

3.1.2 Analizador de Televisión

El Analizador de TV S7000 permite medir parámetros característicos de la TDT como lo son: la potencia y niveles de la señal, relación señal a ruido, MER, BER, constelación de la modulación digital y el espectro del canal. El mismo opera tanto con señales analógicas como digitales y presenta un puerto USB que permite la extracción de datos. Posibilita el monitoreo de la señal en tiempo real y propicia los 12 V de corriente directa utilizado para el modulo activo [38].

3.1.3 Antena de referencia

La antena PROMAX AM-030 es una antena dipolo patrón o de referencia montada sobre un mástil que permite la medida de la intensidad de campo eléctrico. El parámetro conocido como factor K es el que nos permite obtener la intensidad de campo eléctrico recibido por la antena a partir de la lectura del medidor de nivel de señal que se utilice. La antena dispone de 4 juegos de brazos de dipolos que pueden montarse en diversas configuraciones diferentes para cubrir el rango de frecuencias de 45 a 850 MHz. Para el caso de las mediciones de la ganancia se utilizó la variante de VHF Banda III para los canales del 7 al 13 y la variante de UHF para los canales del 14 al 69 [39].

3.1.4 Sistema de mediciones móviles

El sistema TIDYCAST TD2011 se utiliza para conocer el comportamiento de la señal de los transmisores de TDT determinados en el terreno a través de una unidad móvil. A estos dispositivos está integrado el software *Measurement Studio* capaz de medir y registrar los siguientes parámetros de calidad de señal digital con un umbral de potencia recibida hasta -100dBm. Permite la medición de los parámetros cada 1 segundo en un ambiente de

total movilidad, con una antena monopolo de 0dB posicionada en la cubierta del vehículo. Los puntos muestreados quedan posicionados en un mapa de Google gracias al GPS que se integra con el software a través de un dispositivo Bluetooth y los datos se registran en un proyecto que se salva en el software [40].

3.2 Construcción de los prototipos de antenas propuestas para la recepción de la TDT

Teniendo en cuenta la disposición de los materiales existentes se procede a la fabricación de las antenas propuestas a nivel de prototipo. Se tuvieron en cuenta los modelos mecánicos mostrados anteriormente como guía para la fabricación. Estos prototipos permiten la realización de mediciones experimentales.

3.2.1 Antena LPDA ADM010

Las antenas más demandadas para la recepción de la TDT son las antenas multibandas, capaces de trabajar en todas las bandas de frecuencia. Por tal motivo se dio la tarea de realizar varios prototipos para mediciones y pruebas en el terreno en diferentes lugares con problemas de cobertura con respecto a los transmisores existentes. Además se validó un prototipo en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones (LACETEL) que tiene la misión de realizarlo para cualquier producto que esté relacionado con la Televisión Digital bajo la Norma DTMB de 6 MHz establecida en Cuba tanto extranjeros, como de construcción nacional. Aprovechando la excelente formación de sus trabajadores y la moderna tecnología se le envió un prototipo de Antena Log-Periódica ADM 010 como se muestran en la Fig. 3.1.

(a) (b)

Fig. 3.1. Antenas LPDA prototipos: (a) prototipo bajo pruebas, (b) validado por LACETEL

3.2.2 Antena de Reflector Esquinado ADM020

Existen lugares con poca cobertura de los canales de UHF donde se necesitan antenas de relativa alta ganancia. La Antena de Reflector Esquinado constituye una solución para tales fines y fundamentalmente para lugares que se consideran lejanos del transmisor. También existe la modalidad de antenas colectivas que requiere una sola para múltiples televisores digitales o cajas decodificadoras (*Set Top Box*) y se necesita una antena de ganancia considerable que garantice los niveles apropiados en los terminales de cada vivienda o local. En la Fig. 3.2 se muestran los prototipos de antena.

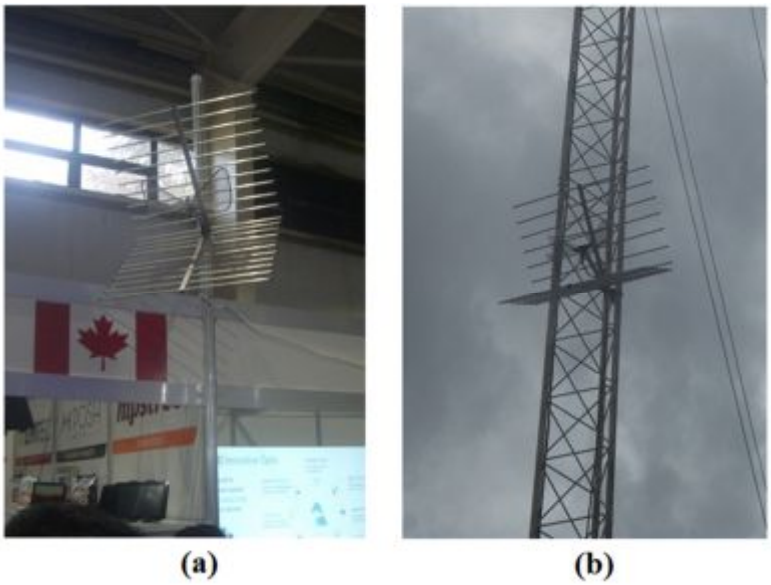


Fig. 3.2. Antenas de Reflector Esquinado prototipos: (a) Prototipo bajo pruebas, (b) instalado como antena colectiva para 8 televisores digitales.

3.2.3 Antena de Lazo para interiores

La Antena de lazo está diseñada para localidades cercanas al transmisor y para viviendas con dificultades en la instalación de antenas exteriores. Constituye una variante económica pero su desempeño puede estar limitado en zonas alejadas del transmisor o la existencia de ruidos que deterioran la señal. En la Fig. 3.3 se muestra el prototipo.

Fig. 3.3. Antenas Interiores de lazo prototipos: (a) prototipo bajo pruebas, (b) instalado en una vivienda a 15 km de un transmisor de UHF de TDT.

3.3 Mediciones de los parámetros radioeléctricos de las antenas

Luego de la fabricación de los prototipos se procede a la realización de las diversas mediciones con el objetivo de comprobar experimentalmente algunas de las características de estas, como las pérdidas por retorno, razón de onda estacionaria en el alimentador correspondiente (ROE), ganancia, coeficiente de radiación trasera y el patrón de radiación. Las mediciones se realizan en un espacio abierto con el objetivo de reducir el error debido a la influencia de las ondas reflejadas en los objetos cercanos. También se obtienen resultados de las mismas en localidades elegidas para la validación.

3.3.1 Mediciones de la razón de onda estacionaria (ROE)

Con el Analizador de Espectro DSA8853T se midieron las pérdidas por retorno de las antenas empleando un Puente de Pérdidas por Retorno. El instrumento no posee la opción de medición de ROE directamente. Las mismas se realizan manteniendo la configuración establecida en el sistema de la Fig. 3.4. La instrumentación requerida posee terminales con impedancia de 50 Ω y las antenas 300 Ω y 75 Ω. Se logró adaptar la impedancia en el sistema con adaptadores de 300 Ω a 75 Ω y de 75 Ω a 50 Ω.

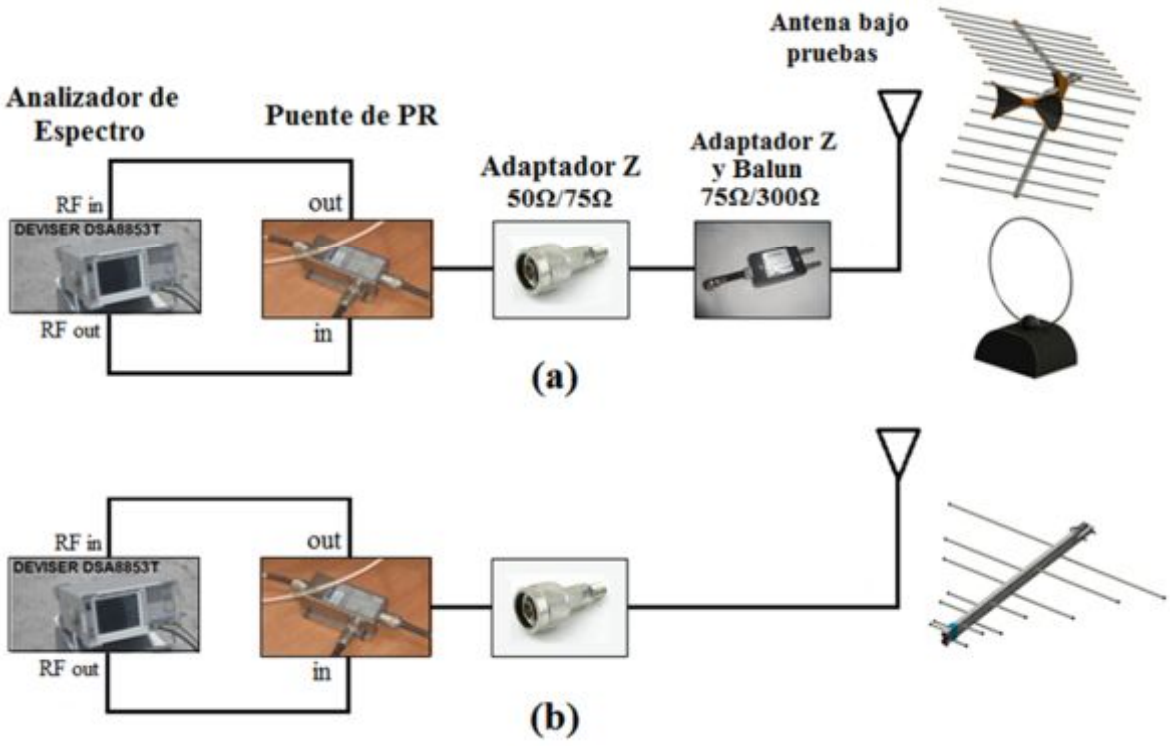


Fig. 3.4. Esquema del sistema para mediciones de pérdidas por retorno: (a) para antenas de Reflector Esquinado y de Lazo con impedancia de 300 Ω y (b) para la antena LPDA con impedancia de 75 Ω

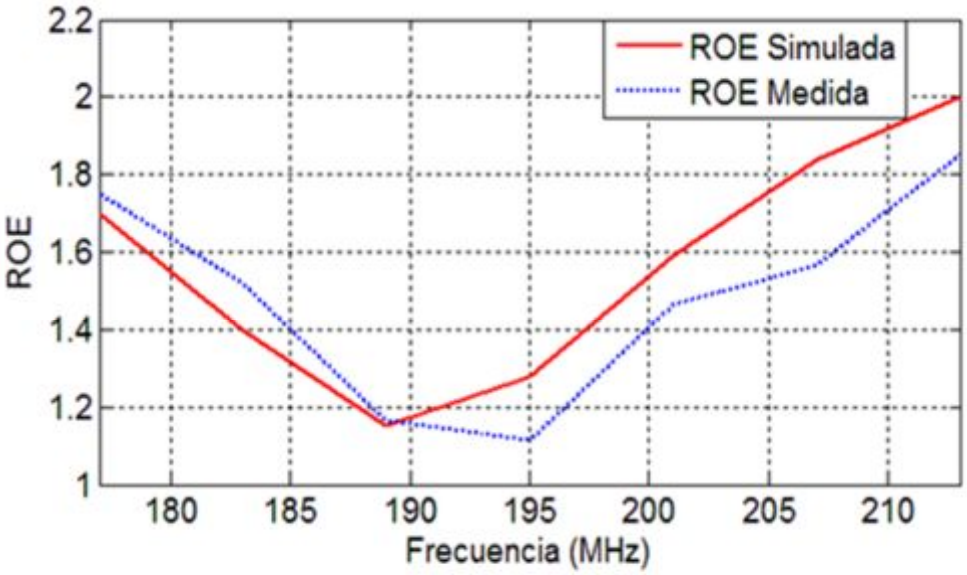
Para determinar la ROE de la antena se calcula el módulo del coeficiente de reflexión a partir de la medición de las pérdidas por retorno (R_l) y a través de las siguientes ecuaciones:

$$R_l = 20 \log |\Gamma| \quad \text{[dB]} \tag{3.1}$$

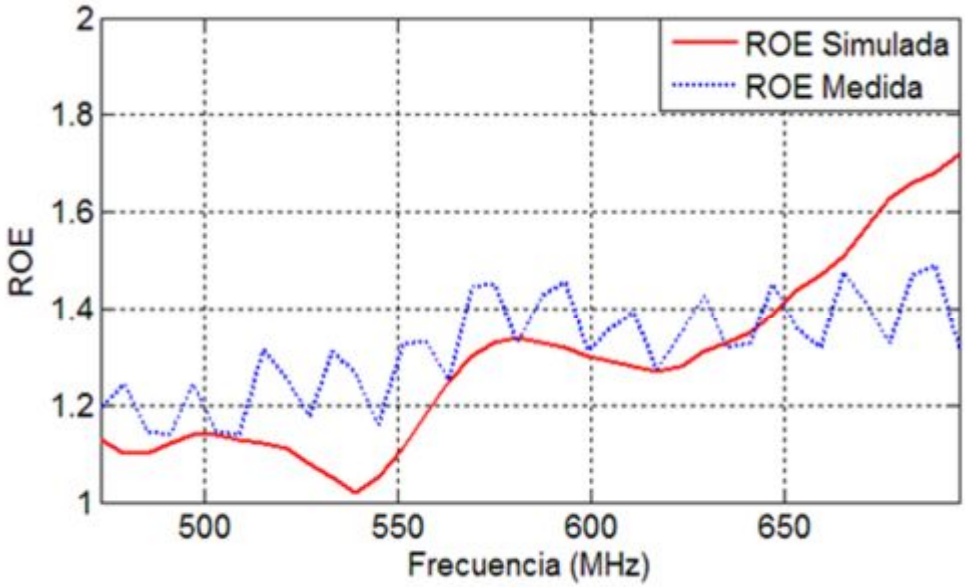
$$|\Gamma| = 10^{-(\frac{R_l}{20})} \tag{3.2}$$

$$\text{ROE} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{3.3}$$

Utilizando MATLAB se compararon los valores de ROE medidas y simuladas en ambas antenas. En a Fig. 3.5 se muestran los resultados de las mediciones de los prototipos en comparación con la simulación. En el Anexo VI se muestra el código para la comparación de la ROE simulada y medida en MATLAB y las pérdidas por retorno ofrecidas por el analizador de espectro.


ROE Simulada
ROE Medida
ROE
Frecuencia (MHz)
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
180
185
190
195
200
205
210

(a)


ROE Simulada
ROE Medida
ROE
Frecuencia (MHz)
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
500
550
600
650

(b)

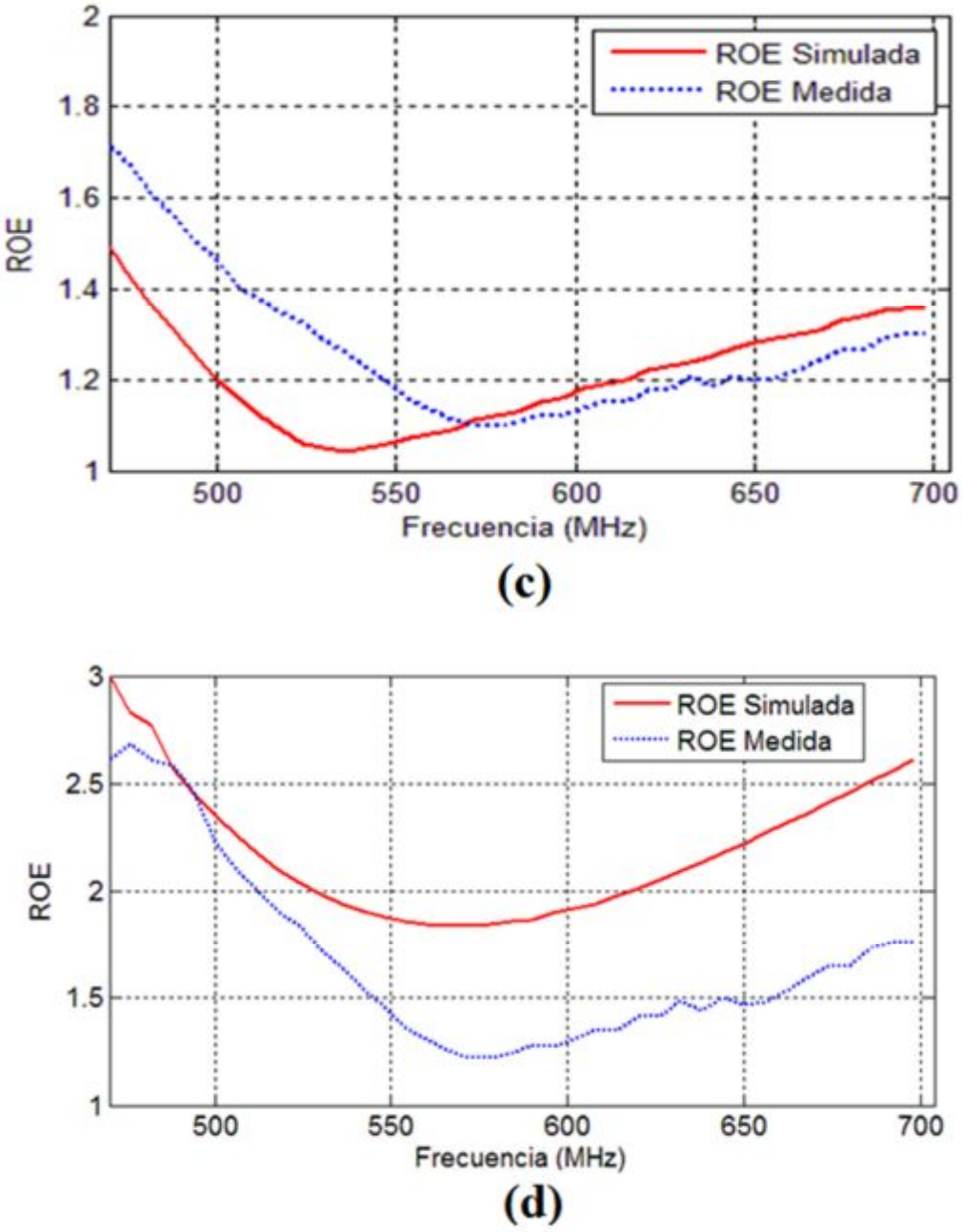


Fig. 3.5. Comparación grafica entre la ROE medida y simulada de las antenas prototipos: (a) LPDA en VHF y (b) LPDA en UHF, (c) Reflector Esquinado en UHF y (d) de Lazo.

Las antenas LPDA y Reflector Esquinado poseen buen desempeño en cuanto a la adaptación de impedancia en las bandas de frecuencia para la cual fueron diseñadas porque que poseen ROE menor que 2. La Antena de Lazo, según las mediciones, solo posee valores menores de 2 por encima de 512 MHz donde posee buen desempeño

fundamentalmente en la frecuencia central del canal de TDT seleccionado para las posteriores pruebas de validación.

3.3.2 Mediciones de ganancia y coeficiente de radiación trasera

Para la comprobación de estos parámetros fundamentales de la antena se realizaron los procedimientos de medición bajo el método comparativo. Se eligió como transmisor (Tx) el generador de tracking del Analizador de Espectro HM5014-2 con 0 dBm de potencia de salida junto con la antena transmisora y como receptor, la entrada de RF del analizador de espectro DSA8853T. Se tuvo en cuenta la zona del campo lejano (*Far field*) o Zona de Fraunhofer en la cual no existe influencia mutua entre los objetos distantes con respecto a las antenas bajo pruebas, que pudieran distorsionar las mediciones [41]. Para garantizar la distancia de separación óptima entre la antena transmisora y receptora se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$F_f = 2(D_{max})^2/\lambda \ [m] \tag{3.4}$$

Se elige la dimensión máxima (D_{max}) de la antena LPDA que es la de mayor longitud y λ es la longitud de onda de la frecuencia central de prueba para la medición en UHF. En este caso la antena transmisora debe estar a una distancia mínima $F_f = 2.56$ m con respecto a la antena prototipo instalada bajo prueba. Según las condiciones del sitio de prueba, se eligió para todos lo prototipos una distancia de 5 m y 3m de altura sobre el suelo. En la Fig. 3.6 se muestra un esquema que describe la medición realizada.

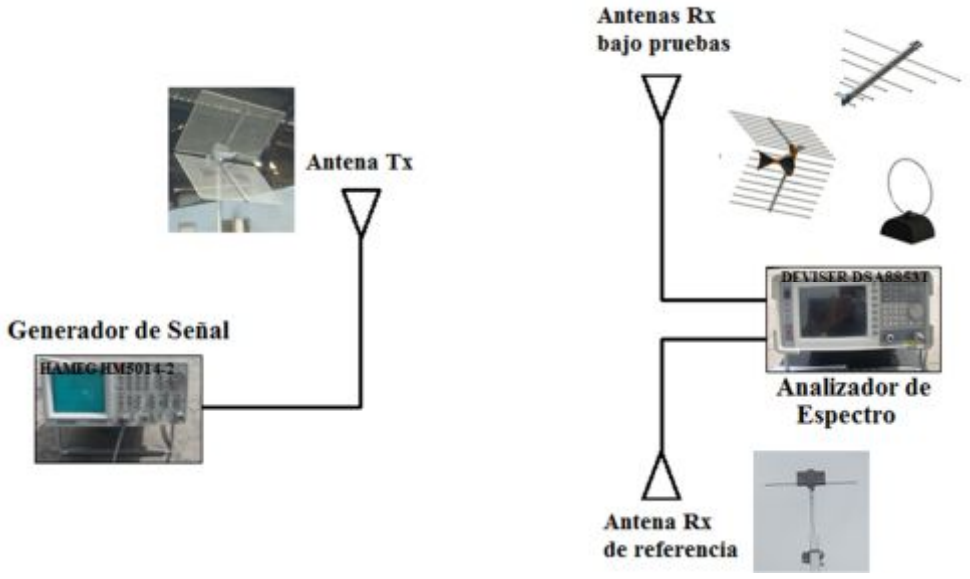


Fig. 3.6. Esquema del sistema para mediciones de ganancia y coeficiente de radiación trasera (F/B)

El Método Comparativo consiste en la medición de la potencia recibida por las antenas prototipos y su comparación con la potencia recibida con una antena de referencia de ganancia conocida [25]. Se utilizó un dipolo de referencia del tipo AM-030 mostrado en el Anexo V con el objetivo de realizar comparaciones con los niveles de potencia recibidos. Este dipolo posee una ganancia de 2.15 dBi en el centro de la banda de VHF Banda III y UHF donde están comprendidos los canales de TV [39]. En este caso se le acopló los brazos de dipolos destinados a trabajar en UHF. Las ecuaciones para calcular la ganancia y el coeficiente de radiación trasera de las antenas son las siguientes:

$$G_{ant} = P_{front} - P_{dip} + 2.15 \text{ [dBi]} \quad (3.4)$$

$$F/_B = P_{front} - P_{back} \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

G_{ant}: Ganancia aproximada de la antena bajo prueba.

$F/_B$: Coeficiente de Radiación Trasera.

P_{front}: Potencia recibida por la antena bajo prueba en dirección al transmisor.

P_{back}: Potencia recibida por la antena bajo pruebas en dirección contraria al transmisor.

P_{dip}: Potencia recibida por el dipolo λ/2 de referencia con los brazos correspondiente a la banda de trabajo.

La frecuencia que se pretendía seleccionar para realizar mediciones es el centro de la banda en UHF de la TDT, era de 584 MHz, pero en esta frecuencia no se puede operar porque se encuentra coincidente con la del canal 32 de la TDT, de Santa Clara, que ocupa un ancho de banda desde 578 MHz hasta 584 MHz, produciendo interferencias y errores en las mediciones. Es por ello que se elige realizar las pruebas en 600 MHz. Los resultados de las mediciones en UHF se muestran a continuación en la Tabla III.

Tabla II: Mediciones de Potencia, Ganancia y Coeficiente de radiación Trasera en UHF 600 MHz

Antenas bajo pruebas	**P_{front} (dBm)**	**P_{back} (dBm)**	**G (dBi)**	**F/B (dB)**

Antena LPDA	-27.7	-43.5	7.15	15.8
Antena de Reflector Esquinado	-22.9	-49.4	11.95	26.5
Antena de Lazo	-31.3	-31.3	3.55	0
Dipolo referencia AM-030	-32.7	-32.7	2.15	0

Se utilizó en 600 MHz una antena transmisora de Reflector Esquinado conformada con similares características del prototipo propuesto pero con el reflector fabricado con malla, que brinda la posibilidad de un patrón de radiación más directivo y orientado hacia las antenas de pruebas. Esta característica reduce relativamente la recepción de las señales reflejadas desde el suelo y se suman con diferencia de fase a la señal que se recibe directamente de la antena transmisora, distorsionando los parámetros medidos.

Las operaciones anteriores se repitieron una vez más en la antena LPDA, pero en el centro de la banda de VHF Banda III de la TDT, en 195 MHz. La antena se desempeña tanto en VHF como en UHF, pues requiere analizar los parámetros radioeléctricos al menos en la frecuencia central de cada una de estas bandas. Para la frecuencia de 195 MHz la distancia mínima de separación que debe estar ubicada la antena transmisora con respecto a la receptora LPDA es de 0.83 m. Por tanto se tuvo también en cuenta una separación de 5 m. Como antena transmisora, en este caso, se utilizó una antena directiva Uda-Yagi de 3 elementos de banda estrecha especialmente para la banda de VHF Banda III debido a que la antena de Reflector Esquinado utilizada como transmisora solo se desempeña en UHF. Como antena de referencia se continuó la utilización de la antena AM-030 pero con los brazos acoplados del dipolo destinados a trabajar en VHF Banda III. En la Tabla IV se muestran los resultados.

Tabla III: Mediciones de Potencia, Ganancia y Coeficiente de radiación Trasera en VHF Banda III 195 MHz

Antenas bajo pruebas	P_{front} **(dBm)**	P_{back} **(dBm)**	**G (dBi)**	**F/B (dB)**
Antena LPDA	-33.7	-46.8	5.55	13.1
Dipolo referencia AM-030	-37.1	-37.1	2.15	0

A modo de análisis y comparación con respecto a las simulaciones de las antenas propuestas se obtuvieron conclusiones a modo estadístico de las pruebas realizadas con los prototipos. En la Tabla V se muestran los resultados del comportamiento de los diferentes parámetros obtenidos.

Tabla IV: Comparación de las mediciones de ganancia y coeficiente de radiación trasera con relación a las simulaciones realizadas

Antenas bajo pruebas	**Gan. Sim. (dBi)**	**Gan. Med. (dBi)**	**Variación de Gan. (dBi)**	**Error de Gan. (%)**	**F/B Sim. (dB)**	**F/B Med. (dB)**	**Variación de F/B (dB)**	**Error de F/B (%)**
LPDA en VHF	6	5.55	-0.45	7.50	13.6	13.1	-0.50	3.68
LPDA en UHF	6.77	7.15	0.38	5.61	17.4	15.8	-1.60	9.20
Reflector Esquinado	12.2	11.95	-0.25	2.05	28.7	26.5	-2.20	7.67
Lazo	3.89	3.55	-0.34	8.74	0	0	0	0

La mayor variación del coeficiente de radiación trasera ocurrida fue en la antena de reflector esquinado con -2.2 dB que no es considerable porque todavía continua relativamente alto y típico para antenas de reflector de este tipo. En cuanto a la ganancia, la mayor variación se obtuvo en la antena LPDA con solo 0.38 dBi en UHF, que tampoco es considerable. Las mediciones de ganancia fueron muy favorables porque no hubo variaciones de más de 1 dBi a pesar de la utilización del Método Comparativo que es el de menor exactitud dentro de los demás métodos conocidos para las mediciones de parámetros de antenas [42].

3.3.3 Medición del patrón de radiación

Para la medición del patrón de radiación se tomó solo en consideración el correspondiente al plano horizontal, utilizando el esquema de equipos y antenas mostrados en la Fig. 3.6. Los prototipos bajo prueba se colocaron sobre un mástil giratorio de 3 m con base graduada con resolución de 10º y a 5 m de distancia de la antena transmisora. Se fue girando gradualmente el mástil y se fue extrayendo los valores de potencia recibida para cada ángulo hasta completar los 360°. Estos valores fueron normalizados y colocados las

ejes de coordenadas polares representados en la Fig. 3.7 junto al patrón de radiación de las antenas ofrecidos por la simulación en la frecuencia de 600 MHz mostrado en la banda de UHF y el patrón de radiación de la antena LPDA en 195 MHz en VHF.

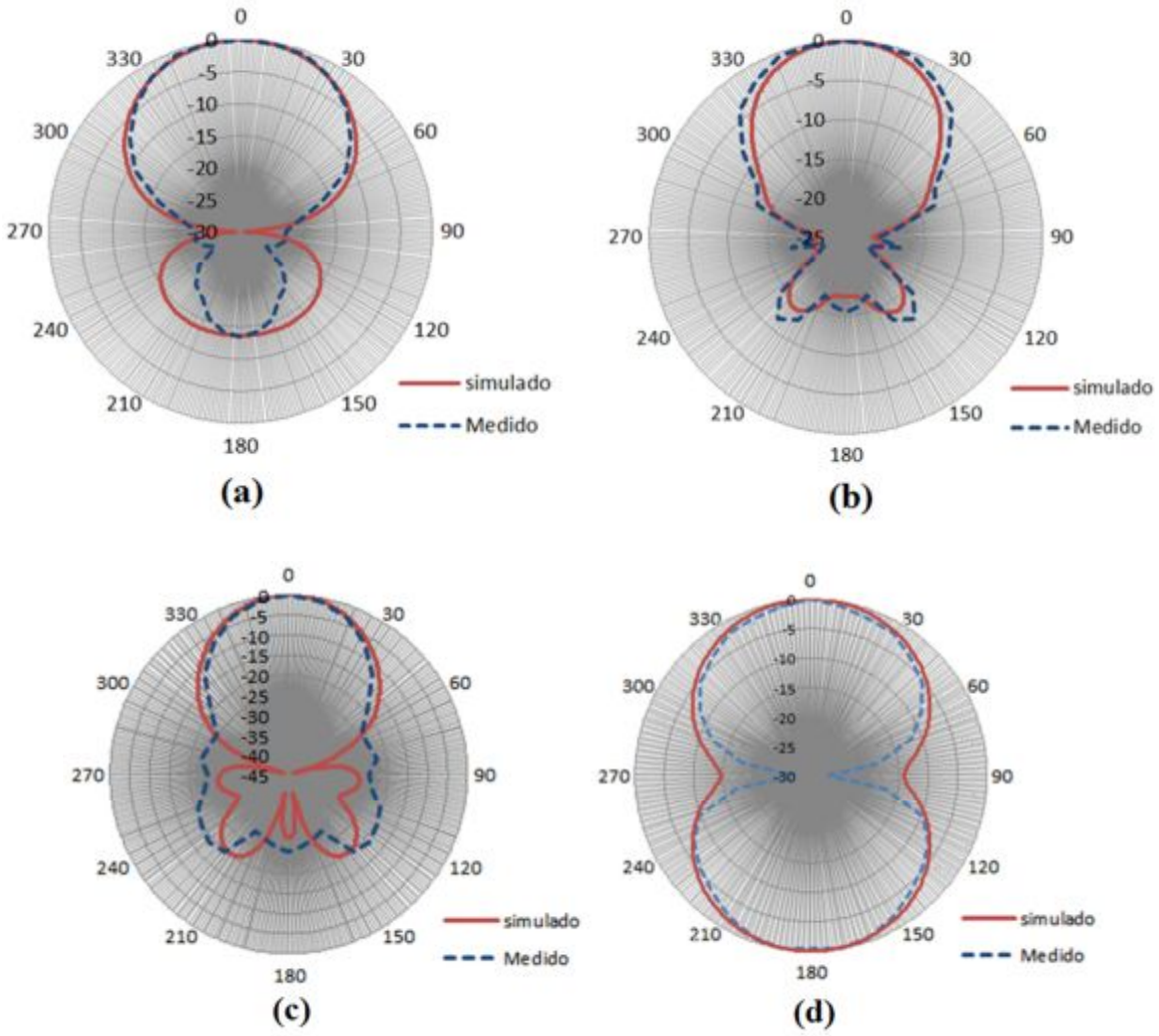


Fig. 3.7. Comparación gráfica entre los Patrones de Radiación en el Plano Horizontal simulado y medido: (a) antena LPD en 195MHz VHF, (b) antena LPDA en 600 MHz UHF, de UHF canal 32

3.3.4 Validación de las antenas exteriores a través de los parámetros de calidad de la recepción de la TDT en zonas de baja cobertura de la provincia de Villa Clara

A continuación se muestran los resultados de las mediciones realizadas con el analizador de TDT S7000 en diferentes localidades del territorio dentro de la provincia de

Villa Clara, tomando como referencia los transmisores de la TDT de mayor importancia. En la Fig. 3.8 se muestra el esquema de las mediciones realizadas en el terreno.

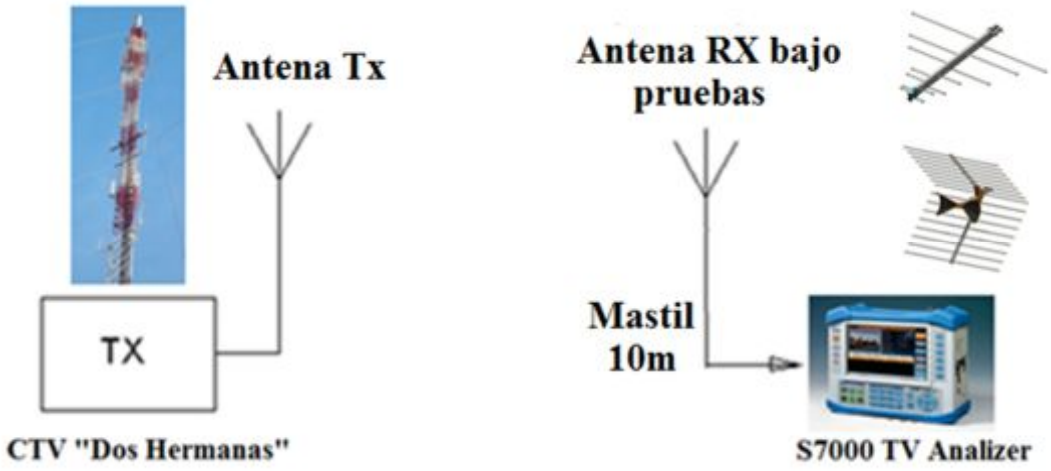


Fig. 3.8. Esquema del sistema para mediciones de parámetros de calidad de la recepción de la TDT

Las localidades escogidas para las mediciones de la señal de la TDT fueron los poblados de Cifuentes, Sagua la Grande e Isabela de Sagua en la provincia de Villa Clara solamente debido a la poca disponibilidad de transportación hacia otras localidades. Por otro lado, se escogieron estos sitios debido a que su recorrido es por la misma carretera y está comprendida dentro de la zona de baja cobertura según los mapas de intensidad de campo simulado en el software EMLAB enviada por la empresa RADIOCUBA. Los mapas representan el comportamiento de la intensidad de campo eléctrico en el terreno de la provincia de Villa Clara a 10 m de altura sobre el suelo. Estos indican como zonas de baja cobertura o con posibles dificultades para la recepción las que están en blanco. Para el caso de VHF los valores deben estar como mínimo en 48 dBµV/m y para UHF deben estar al menos en 54 dBµV/m. En la Fig. 3.9 se muestra el mapa de cobertura de intensidad de campo correspondiente al canal 32 de Alta Definición (HD) de la ciudad de Santa Clara con frecuencia central en 581 MHz y que transmite con una potencia de 1 kW. Se decide realizar pruebas en este canal, por estar cerca del centro de la banda de UHF para la TDT y es uno de los canales de mayor aceptación por parte de la población en toda la provincia. En el Anexo VII se muestra el mapa correspondiente el canal 13 de Definición Estándar (SD), que tiene una potencia de 2.5 kW.

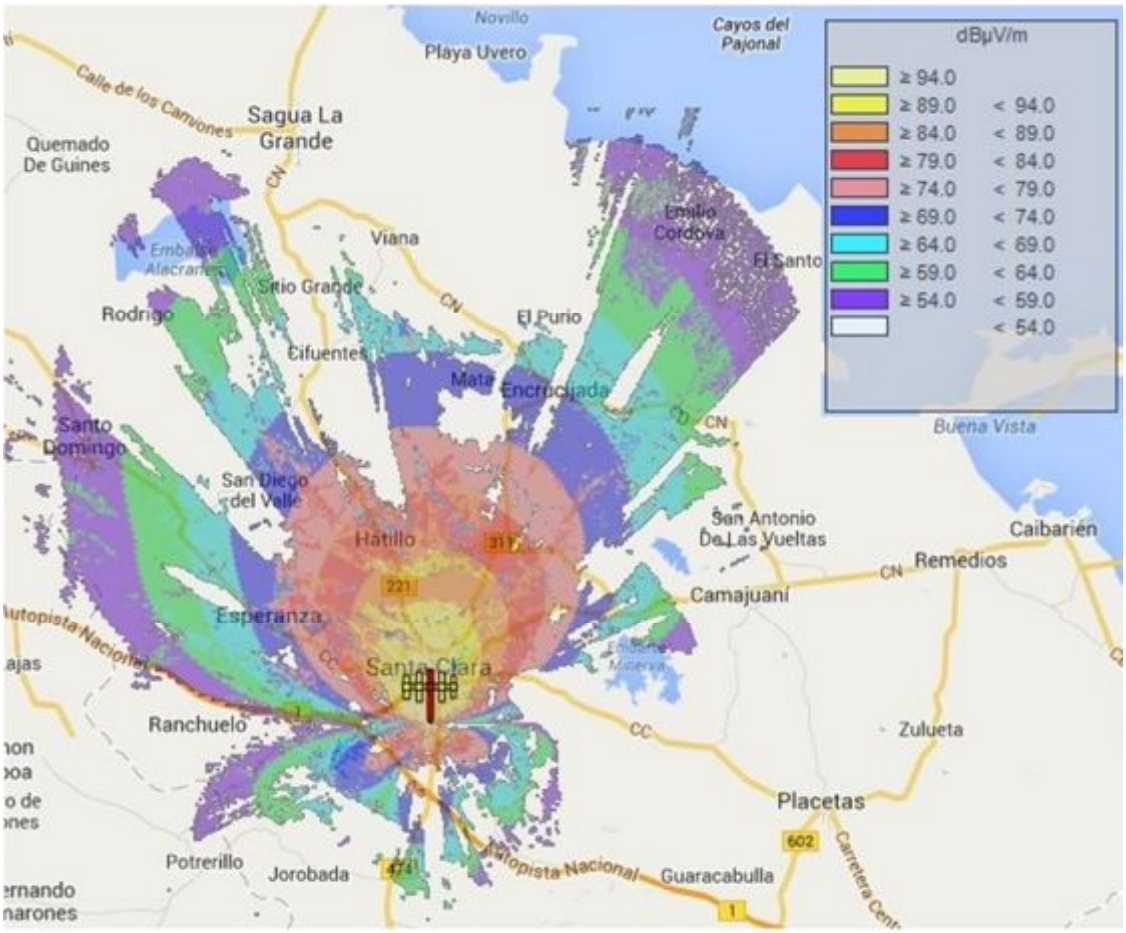


Fig. 3.9. Zonas de cobertura del transmisor DTMB de canal 32 de HD en Santa Clara. (Fuente: RADIOCUBA)

Se puede notar el recorrido realizado comprendido dentro de la zona en blanco comenzando en Santa Clara pasando por Cifuentes y Sagua La Grande hasta la costa norte terminando en Isabela de Sagua cerca de la Playa Uvero. A modo de comprobación en la Fig. 3.10 se muestra el mapa del recorrido ofrecido por el software *Measurement Studio* junto al sistema de medición *TIDYCAST TD2011* que se instaló en el vehículo que se utilizó para dicho recorrido. A medida que se alejaba el vehículo del transmisor la potencia recibida se iba atenuando gradualmente. Los puntos azules fuerte representan zonas de baja cobertura donde pudieran existir dificultades para la recepción del canal 32 de Santa Clara

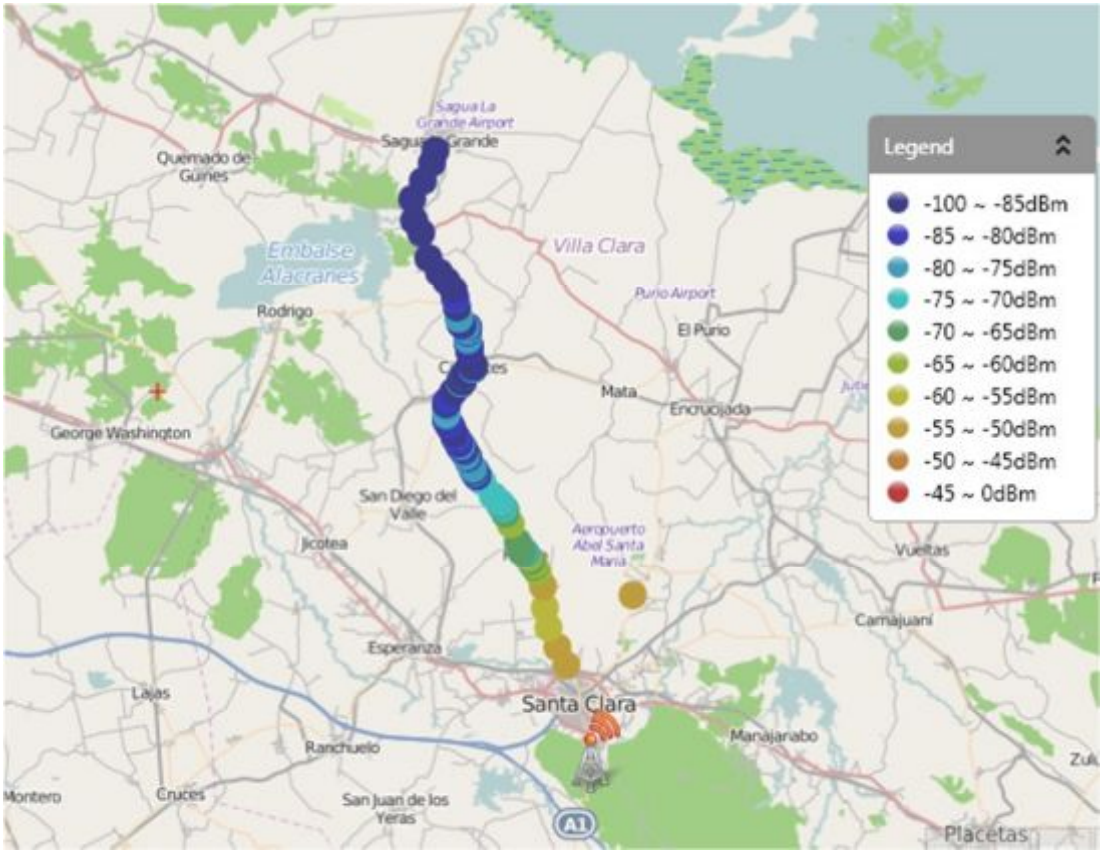


Fig. 3.10. Mapa de mediciones de potencia del canal 32 HD ofrecido por el software *Measurement Studio* junto al sistema de medición TD2011 durante el recorrido

A continuación se muestran los resultados de las mediciones de parámetros de calidad de la TDT en la Tabla VI. También en el Anexo VIII se muestran algunas imágenes de ofrecidas por el Analizador S7000. Se realizaron en Sagua La Grande e Isabela de Sagua, debido a la lejanía de la misma con respecto al transmisor con el fin de analizar el comportamiento de las antenas exteriores a una distancia del transmisor aproximada de 40 km. Los parámetros señalados en rojo indican que existen problemas de recepción donde no se logra mantener una correcta recepción y se producen errores en la decodificación. Por lo tanto, bajo estas condiciones, es inútil la instalación de la antena en esas localidades. El objetivo es mantener al menos los niveles a un margen permisible por encima de -70 dBm, considerado como el umbral de recepción señalado y también por el analizador de TV.

Tabla VI: Mediciones de parámetros de calidad realizadas con las antenas exteriores prototipos algunas localidades de Villa Clara

	LPDA en el Canal 13			**LPDA en el Canal 32**			**Reflector Esquinado**		
	Pot. (dBm)	**MER (dB)**	**BER***	**Pot. (dBm)**	**MER (dB)**	**BER***	**Pot. (dBm)**	**MER (dB)**	**BER***
Cifuentes	-52.7	>30	$< 10^{-5}$	-56.8	27.2	$< 10^{-5}$	-47.5	>30	$< 10^{-5}$
S. La Grande	-65.0	25.9	$< 10^{-5}$	-70.5	19.3	$< 10^{-5}$	-64.8	24.7	$< 10^{-5}$
I. de Sagua	-67.2	23.1	$< 10^{-5}$	-76.3	17.7	$2.6x10^{-3}$	-67.1	23.2	$< 10^{-5}$

*La Razón de Error de Bit (BER) indica fallo en la recepción y debe siempre estar por debajo de 10^{-5}. Es decir, solo puede haber como máximo un bit erróneo cada 100 000 bit decodificados por el receptor de lo contrario la imagen se "pixela".

Según los resultados anteriores la antena LPDA justifica su utilización en lugares cercanos al transmisor, fundamentalmente aquellos que transmiten en UHF. Los parámetros recibidos en el canal 32 se encuentran en el umbral en Sagua La Grande y a partir de ahí presentan deterioro lo que significa que en los poblados más cercanos al transmisor pudieran recibir satisfactoriamente la señal con esta misma antena. Sin embargo se puede utilizar para los canales de VHF como el canal 13, que se recibe por encima del umbral sin problemas. Según los parámetros medidos y ofrecidos por la antena de reflector esquinado, estos son aceptables en los dos poblados por lo que constituye una solución para la recepción del cana 32 de HD en estas localidades.

3.4 Mediciones con la antena interior

La antena interior está conformada básicamente por la parte pasiva y la parte activa. La parte pasiva lo conforma la antena de lazo con el balun incorporado, que realiza la adaptación de 300 Ω a 75 Ω. La parte activa lo conforma el Módulo Activo o amplificador de RF con la fuente de alimentación de 12 V de corriente directa. La salida del amplificador se coloca al analizador de la TDT para la medición de parámetros de calidad y posteriormente a un *Set Top Box*. En la Fig. 3.11 se muestra el prototipo final de la antena interior con los elementos que la conforman.

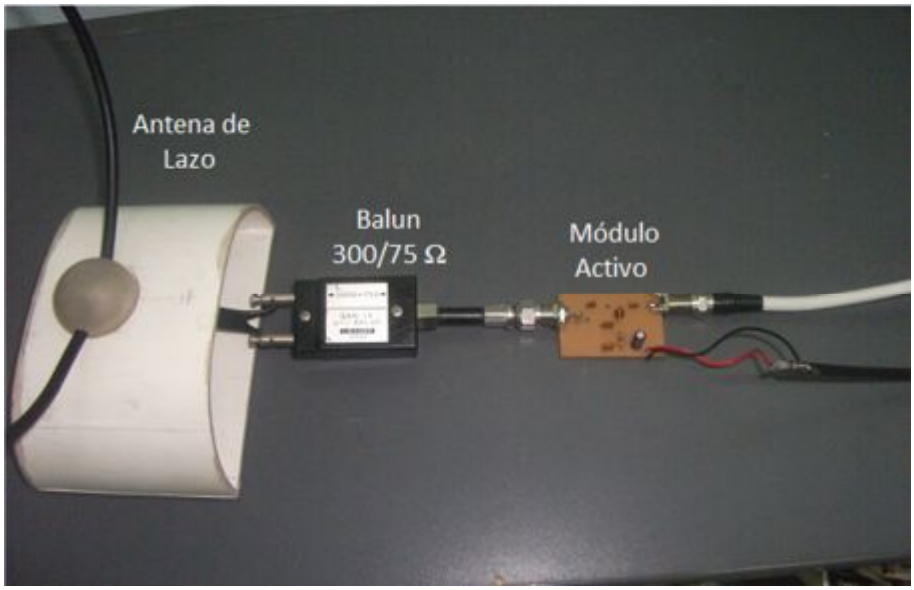


Fig. 3.11. Prototipo de la antena interior de lazo con el Módulo Activo incorporado

3.4.1 Conformación del módulo activo

El Módulo Activo constituye una parte importante y novedosa de este trabajo. A continuación se muestran imágenes del conformado del circuito con un solo amplificador MMIC del tipo MAR-6 en la Fig. 3.12. Posee entrada y salida de 75 Ω a través de conectores F hembra que permite la inserción de cables coaxial RG-6.

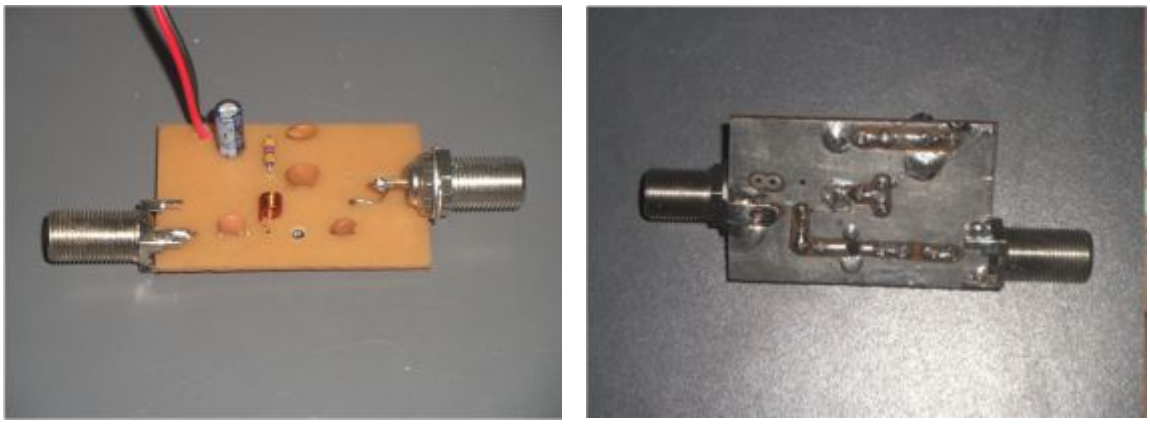


Fig. 3.12. Prototipo del Módulo Activo o amplificador de RF con MAR-6.

Mediante las mediciones con el analizador de espectro se pudo comprobar el comportamiento de la respuesta de frecuencia del amplificador en la banda de UHF. Los resultados con el MAR-6 mostraron una respuesta de frecuencia aproximadamente

lineal en toda la banda de UHF con ganancia para una sola etapa MMIC de aproximadamente 20 dB como promedio y una pendiente de -2 dB en toda la banda. Tal comportamiento se muestra en la Fig. 3.13.

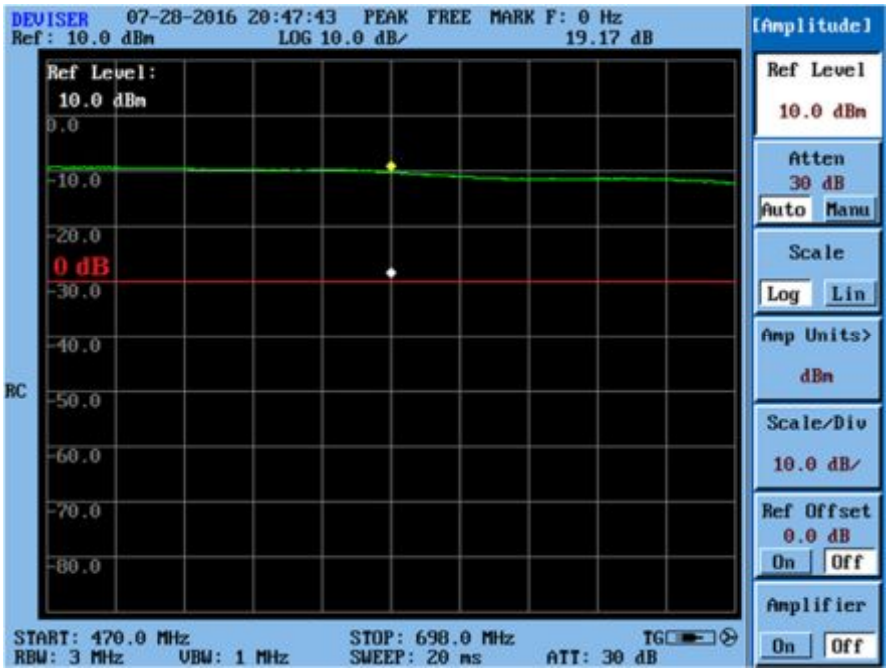


Fig. 3.13. Comportamiento en frecuencia de la ganancia de potencia del amplificador de RF con MAR-6 en la banda de UHF de la TDT

También las mediciones realizadas en la banda de VHF mostraron resultados similares en cuanto a la respuesta de frecuencia. Aunque no es el objetivo del trabajo, se demuestra que también brinda la posibilidad la incorporación de una antena para VHF como parte del conjunto.

El Módulo Activo es versátil especialmente diseñado para su incorporación tanto en antenas interiores como exteriores. Los resultados desfavorables de las mediciones con la antena LPDA en el canal 32 en los poblados seleccionados como zonas de baja cobertura mejoran considerablemente con la inserción del Módulo Activo propuesto. Constituye una propuesta innovadora para antenas exteriores en zona de baja cobertura.

3.4.2 Validación de la antena interior a través de los parámetros de calidad de la recepción de la TDT dentro y fuera de la ciudad de Santa Clara

A continuación se mostrarán los resultados de las mediciones de los parámetros de calidad realizadas con el analizador de TV S7000 en la Empresa Antenas Villa Clara y en la comunidad del Aeropuerto de Santa Clara. El primer sitio se eligió para analizar el comportamiento de la antena interior cerca de lugares de mucho ruido impulsivo o ruido industrial como el peor de los casos dentro de la ciudad y cerca del transmisor. El segundo sitio también está densamente poblado y se encuentra a 15 km del transmisor, que puede evaluarse por la distancia considerable de su ubicación. Las mediciones siguieron dos variantes: pasiva (sin el Módulo Activo) y activa (con el Módulo Activo) con el objetivo de valorar el desempeño. En la Tabla VII se muestran los resultados en las dos variantes.

Tabla VII: Mediciones con la antena de lazo en el canal 32 de la TDT con frecuencia central 581MHz

	Antena de Lazo sobre el canal 32					
	Pasiva			**Activa**		
Localidades	**P (dBm)**	**MER (dB)**	**BER***	**P (dBm)**	**MER (dB)**	**BER***
Antenas V.C.	-57.8	28.8	$< 10^{-5}$	-38.3	> 30	$< 10^{-5}$
Aeropuerto	-74.6	18.5	$2.6x10^{-3}$	-54.3	23.3	$< 10^{-5}$

*La Razón de Error de Bit (BER) indica fallo en la recepción y debe siempre estar por debajo de 10^{-5}. Es decir, solo puede haber como máximo un bit erróneo cada 100 000 bit decodificados por el receptor de lo contrario la imagen se "pixela".

Los resultados alcanzados demuestran que la antena de lazo posee buen desempeño en sus dos variantes dentro de la ciudad en el canal 32. Los valores obtenidos son bastante aceptables y muy por encima del umbral de recepción. Mientras que en lugares más alejados del transmisor de la TDT es insatisfactorio utilizar la antena en su variante pasiva por el deterioro de la señal recibida. Por esta razón surge la incorporación del Módulo Activo como parte de la antena interior. Gracias al mismo los parámetros de calidad obtenidos en el Aeropuerto se lograron establecer por encima del umbral y con buen margen de seguridad.

3.5 Conclusiones del capítulo

En el capítulo se presentaron los prototipos de las antenas propuestas. Se realizaron las mediciones reales de las mismas con el equipamiento requerido y se compararon los valores obtenidos en las simulaciones.

En las validaciones los resultados obtenidos en las mediciones de parámetros de calidad de la TDT con la antena de Reflector Esquinado se manifestaron en todo momento sobre el umbral de recepción en localidades seleccionadas para pruebas. Las mediciones con la antena LPDA en el canal 32, en Sagua la Grande e Isabela de Sagua, presentaron deterioro a partir de una distancia de 40 km del transmisor por lo que constituye una solución para localidades relativamente cercanas al transmisor. Los resultados en las mediciones con la antena interior de lazo fueron exitosos con la incorporación del modulo activo en las localidades seleccionadas para pruebas. Los amplificadores MMIC del tipo MAR-6 demostraron ser idóneos en el diseño de módulos activos de RF para la recepción de TDT. La ganancia en función de la frecuencia del módulo activo real con MAR-6 se manifestó semejante con relación a la ofrecida en la hoja técnica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Al realizar la caracterización de la TV se determinó que las antenas para TDT, a diferencia de las antenas para TV Analógica, deben entregar la señal en los terminales de usuario con los parámetros de calidad adecuados para que el Set Top Box pueda realizar la decodificación.
2. En el diseño de las antenas se demostró que el software *CST Microwave Studio 2015* facilita el análisis de los modelos diseñados, demostrando ser una poderosa herramienta de trabajo.
3. En las validaciones a partir del análisis de los resultados alcanzados en las mediciones experimentales se demostró el buen desempeño de las antenas prototipos, así como la confiabilidad del *CST Microwave Studio 2015* para la simulación de antenas al dar valores similares a los medidos.
4. Como resultado de las validaciones a través de parámetros de calidad en la recepción de la señal de la TDT se determinó que las antenas exteriores presentan características destacables en lugares más alejados del transmisor donde la potencia recibida es relativamente baja o cercana al umbral de recepción con relación a las antenas interiores.
5. Las antenas interiores solo se desempeñan en la misma localidad donde se encuentra situado el transmisor.
6. El empleo del módulo activo con tecnología MMIC mejora el desempeño de las antenas interiores.

Recomendaciones

1. Introducción al estudio en el campo de las antenas activas exteriores.
2. Utilizar amplificadores MMIC especialmente para aplicaciones de TDT y que permitan, además, la regulación de ganancia.

3. Realizar diseños de módulos activos con otras tecnologías y variantes para su comparación.
4. Seguir realizando trabajos con igual envergadura con el objetivo de lograr la correcta recepción de la señal digital.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. E. D. Valle, "Cuba, la televisión que viene," *Juventud Rebelde,* p. 5, 2009.

[2] M. T. G. L. Luis A. Albornoz, "La Televisión Digital Terrestre. Experiencias nacionales y diversidad en Europa, América y Asia", L. C. Ediciones, Ed., 1ra Edición ed. Buenos Aires, 2012, p. 304 p.

[3] A. N. C. Guerrero and C. R. V. Ramos, "Análisis y estudio de ingeniería para la selección del estándar de Televisión Digital más apropiado para Ecuador bajo la supervisión de la ¨SUPERTEL¨," ingeniería, INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA, Escuela de Ingeniería Electrónica, Riobamba-Ecuador, 2009.

[4] J. E. Briceño, *Principios de las Comunicaciones*: Publicaciones de la Facultad de Ingenieria de la escuela de ingenieria electrica, 2012.

[5] G. E. R. León, "Plan de Acción del Proceso de Digitalización de la Televisión Terrrestre en Cuba " Ministerio de Comunicaciones, La Habana2014.

[6] C. Moreno, A. Marín, J. Sierra, and F. Gil. (2011) Diseño y análisis de red de Televisión Digital Terrestre (TDT) para Medellín - Antioquia. *Revista en Telecomunicaciones e Informática*. 31-48. Available: https://revistas.upb.edu.co/index.php/telecomunicaciones/article/view/1249

[7] E. Prado. (2009) Virtudes, funciones y futuro de la TDT en la Sociedad de la Información. *Revista Telos*. 38-40.

[8] HANDBOOK, "Digital TV Antenna Systems," vol. 3, C. a. t. D. E. Department of Broadband, Ed., ed, 2013, pp. 8-11.

[9] A. M. Alonso, R. M. Alonso, and G. G. Nieto. (2014) Parámetros de calidad de recepción del estándar DTMB en 6MHz.

[10] S. d. R. UIT-R, "Informe UIT-R BT.2035-2: Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de Televisión Digital Terrestre incluida la determinación de sus zonas de cobertura," ed, 2008, pp. 3-5.

[11] R. Alvariño, "Manual de Buenas Prácticas Cadena de Recepción," G. d. C. d. Servicio and d. T. D. Terrestre, Eds., ed: Cadena de Recepción, 2009, pp. 23-26.

[12] J. M. Martínez, "Análisis de Señales de Televisión en Recepción," presented at the Televisión Digital 2010/11, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, 2011.

[13] G. E. R. León, "Plan de Acción del Proceso de Digitalización de la Televisión Terrrestre en Cuba," *Ministerio de Comunicaciones,* 2014.

[14] A. W. Heredia, M. C. Simón, and L. G. R. Rodríguez. (2013) Proyecto de Asignación de Canales para la Transmisión de Televisión Digital Terrestre en Cuba. Available: www.lacetel.cu/Foro/art/PROY_ASIG_CANALES_TVD.pdf

[15] R. S. Bovino and D. Durán, "Modulación digital: aplicación a la televisión digital en DVB," *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, pp. 42-63, 2008.

[16] J. Anguera and A. Pérez. (2008). *Teoría de Antenas*. Available: www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teoria_antenas.pdf

[17] V. J. V. Etxeondo, M. S. Ayza, and M. B. Díaz, "Diseño De Antena Microstrip De Ranura Y Antena De Parche Con Geometría Fractal," Ingeniero Técnico De Telecomunicación, Especialidad En Sonido E Imagen, Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales Y De Telecomunicación, Universidad Pública De Navarra, 2012.

[18] R. J. Hernández, *Fundamentos de la Ingeniería Electromagnética*. Santa Clara: Editorial "Samuel Feijoo", 2011.

[19] B. M. Miñana, "Diseño y caracterización de una antena plana conformada para recepción de TDT," I.T. Telecomunicación (Sist. de Telecomunicación), Universidad Politecnica De Valencia, 2011.

[20] C. A. Balanis, *Antenna Theory. Analysis and Design*, 3 ed.: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

[21] J. A. A. Fundora. (2013) Antena banda ancha para la recepción de televisión. 2 – 3. Available: http://semanatecnologica.fordes.co.cu/sites/all/files/public/p291_0.pdf

[22] B. M. Miñana, "Diseño y caracterizaciónde antena plana conformada para recepción de TDT," Telecomunicaciones, Universidad Politecnica de Valencia, Gandia, 2011.

[23] V. C. Ornetta, "Diseño y Fabricación de una Antena Log-Periódica 200-1000 MHz," *Electrónica-UNMSM*, pp. 3-11, 2005.

[24] R. J. Hernández, "Antenas de muy altas y ultra altas frecuencias," in *Fundamentos de la Ingeniería Electromagnética*, ed Universidad Central de las Villas: Edit Samuel Feijoo, 2011.

[25] J. D. Krauss, *Antennas*, 2da Edición ed. New Dehli: McGraw-Hill, 1988.

[26] R. C. Johnson, "Antenna Engineering Handbook," 3ra Edición ed Atlanta, Giorgia: McGraw-Hill, 1993, pp. 2-5.

[27] G. H. Brown and O. M. WOODWARD, "Experimentally Determined Radiation Characteristics of Conical and Triangular Antennas," RCA Review, Princeton, N. J1952.

[28] J. Mártony, "Antenas Receptoras Para La TV Digital," www.cue.com.uy, 2014.

[29] N. r. Jiménez, "Diseño de un amplificador de bajo ruido para aplicaciones inalámbricas," Ingeniería en Electrónica, Instituto de Electrónica y Computación, Universidad Tecnológica de La Mixteca, 2001.

[30] J. V. T. Collantes, "Diseño de un LNA en tecnología monolítica en la banda de 35-47 GHz," Master En Tecnología De La Información Y Comunicaciones En Redes Móviles Maestría, Escuela Técnica Y Superior De Ingeniero Industriales Y De Telecomunicación, Universidad de Cantabria, Cantabria, España, 2012.

[31] I. D. Robertson and S. Lucyszyn, *RFIC And MMIC Design and Technology*. United Kingdom, London: Institution of Electrical Engineers, 2001.

[32] VIERA, "Estudio y aplicación del CST Microwawe Studio como herramienta de simulación de antenas," 2007.

[33] M. R. Hacker, "DISEÑO DE UNA PEQUEÑA SONDA PARA MEDIR CAMPOS MAGNÉTICOS EN TRES DIMENSIONES."

[34] ARRL, *The ARRL Antenna Book. The Ultimate Reference For Amateur Radio Antennas, Transmission Lines And Propagation*, 20th ed. Newington: The National Association for Amateur Radio, 2003.

[35] C. y. Ong, J. Song, C. Pan, and Y. Li. (2010) Technology And Standards Of Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting *IEEE Communications Magazine*. 13. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/5458372/

[36] D. R. Ávila, H. M. Á. Acosta, and F. M. Rizo. (2013) Diseño De Una Antena De Banda Ancha Para Televisión Digital *Semanatecnológica*. Available: http://semanatecnologica.fordes.co.cu/sites/all/files/public/p289_0.pdf

[37] DEVISER, "DSA8853 Series Spectrum Analyzer Operation Manual V3.0," L. Tianjin Deviser Electronics Instrument Co., Ed., ed: TianJin Deviser Electronics Instrument Co., Ltd, 2013.

[38] DEVISER, "S7000 Series TV Analyzer Operation Manual," ed: TianJin Deviser Electronics Instrument Co., Ltd, 2013.

[39] PROMAX, "AM-030. Manual De Instrucciones," ed. Barcelona, España: PROMAX ELECTRONICA, S. L. , 2016.

[40] Y. O. Estopiñan and A. F. Bezanilla. (2013) APLICACIÓN DE MATLAB PARA GENERAR EL MAPA DE COBERTURA DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE. *Fordes*. Available: http://semanatecnologica.fordes.co.cu/sites/all/files/public/p284_0.pdf

[41] J. L. M. Monroy, E. D. Tapia, J. L. O. Cervantes, R. A. C. Pérez, and A. V. Ventura. (2008) Análisis y Comparación de Metodologías para Determinar Experimentalmente la Ganancia de Antenas de RF y Microondas. *Simposio de Metrología*. Available: https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/M1/SM2008-M127-1150.pdf

[42] ANSI/IEEE, "149-1979 - IEEE Standard Test Procedures for Antennas," ed: Antenna Standards Committee, 1979.

ANEXO

Anexo I: Plan de canalización de la Televisión Digital actual en Cuba

CENTROS TRANSMISORES DE ALTA DEFINICIÓN (HD)				
Provincia	**Municipio**	**Centro Transmisor**	**Canal**	**Frecuencia (MHz)**
La Habana	Todos los municipios	Televilla	36	602-608
La Habana	Todos los municipios	Habana Libre	50	686-692
Artemisa	San Cristóbal	Salón	47	668-674
Artemisa	Candelaria	Salón	47	668-674
Artemisa	Artemisa	Salón	47	668-674
Artemisa	Mariel	Salón	47	668-674
Artemisa	Guanajay	Salón	47	668-674
Artemisa	Caimito	Salón	47	668-674
Artemisa	Güira de Melena	Salón	47	668-674
Artemisa	Alquízar	Salón	47	668-674
Artemisa	Bauta	Televilla	36	602-608
Artemisa	San Antonio de los Baños	Televilla	36	602-608
Mayabeque	Quivicán	Televilla	36	602-608
Matanzas	Jovellanos	Jacán	51	692-698
Matanzas	Limonar	Jacán	51	692-698
Matanzas	Pedro Betancourt	Jacán	51	692-698
Matanzas	Cárdenas	Jacán	51	692-698
Matanzas	Perico	Jacán	51	692-698
Matanzas	Jaguey Grande	Jacán	51	692-698
Matanzas	Unión de Reyes	Jacán	51	692-698
Villa Clara	Santa Clara	Dos Hermanas	32	578-584
Villa Clara	Ranchuelo	Dos Hermanas	32	578-584
Villa Clara	Cifuente	Dos Hermanas	32	578-584
Villa Clara	Encrucijada	Dos Hermanas	32	578-584
Villa Clara	Santo Domingo	Dos Hermanas	32	578-584
Villa Clara	Camajuaní	Dos Hermanas	32	578-584
Cienfuegos	Lajas	Dos Hermanas	32	578-584
Cienfuegos	Cruces	Dos Hermanas	32	578-584
Cienfuegos	Palmira	Dos Hermanas	32	578-584
Sancti Spíritus	Sancti Spíritus	San Isidro	29	560-566

CENTROS TRANSMISORES PARA DEFINICIÓN ESTÁNDAR (SD)				
Provincia	**Municipio**	**Centro Transmisor**	**Canal**	**Frecuencia (MHz)**
P. del Río	Sandino	Guanahacabibes	14	470-476
P. del Río	Güane	La Capitana	39	620-626
P. del Río	Pinar del Río	Guanito	36	602-608
P. del Río	Consolación	Guanito	36	602-608
P. del Río	San Luis	Guanito	36	602-608
P. del Río	La Palma	Cajálbana	28	554-560
P. del Río	Viñales	Comunitaria Viñales	43	644-650
P. del Río	Los Palacios	Salón	13	210-216
Artemisa	Bahía Honda	1- Cajálbana 2- Salón	1- 28 2- 13	1- 554-560 2- 210-216
Artemisa	Bahía Honda	Cajálbana	28	554-560
Artemisa	San Cristóbal	Salón	13	210-216
Artemisa	San Cristóbal	Ciro Redondo	44	650-656
Artemisa	Candelaria	Salón	13	210-216
Artemisa	Artemisa	Salón	13	210-216
Artemisa	Mariel	Salón	13	210-216
Artemisa	Guanajay	Salón	13	210-216
Artemisa	Caimito	Salón	13	210-216
Artemisa	Güira de Melena	1- Salón 2- Televilla	1- 13 2- 38	1- 210-216 2- 614-620
Artemisa	Alquízar	Salón	13	210-216
Artemisa	Bauta	Televilla	38	614-620
Artemisa	San Antonio de Los Baños	Televilla	38	614-620
Habana	Todos los municipios	Televilla	38	614-620
Habana	Todos los municipios	San Pedro Alamar	51	692-698
Habana	Todos los municipios	Balcón de Lawton	31	572-578
Habana	Todos los municipios	Guanabo	23	524-530
Habana	Todos los municipios	Habana Libre	48	674-680
Habana	Todos los municipios	Habana Libre	12	204-210
Mayabeque	Quivicán	Televilla	38	614-620
Mayabeque	San José de las Lajas	Comunitaria San José	34	590-596
Mayabeque	Jaruco	Comunitaria Jaruco	26	542-548
Mayabeque	Santa Cruz del Norte	Santa Cruz del Norte	35	596-602
Mayabeque	Güines	Loma de la Candela	50	686-692
Matanzas	Matanzas	Cumbre	31	572-578
Matanzas	Jovellanos	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Limonar	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Pedro Betancourt	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Cárdenas	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Perico	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Jagüey Grande	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Unión de Reyes	Jacán	1- 20 2- 45	1- 506-512 2- 656-662
Matanzas	Varadero	Varadero	26	542-548

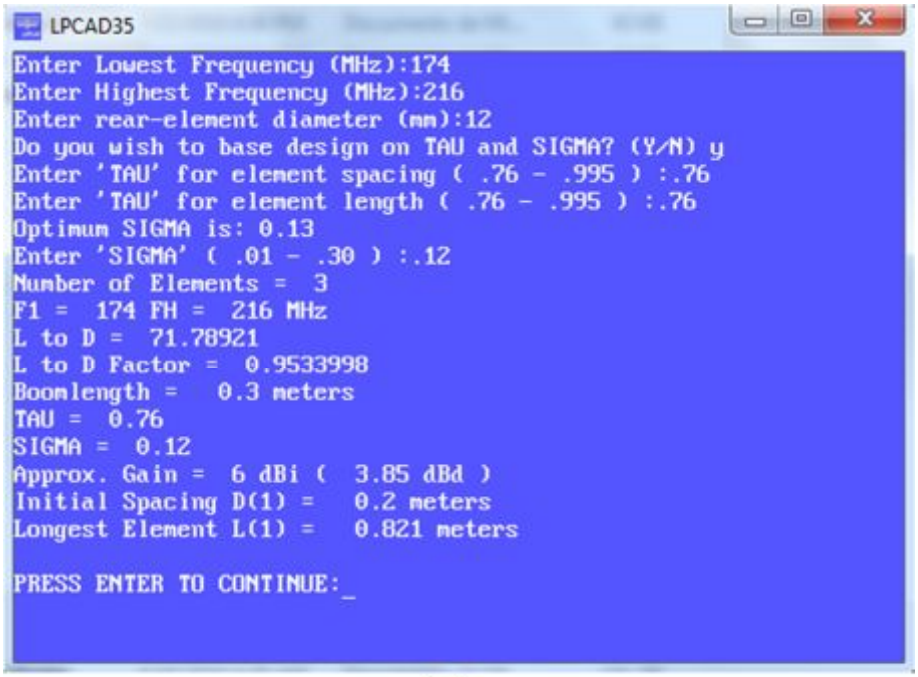
Matanzas	Ciénaga de Zapata	El Brinco	25	536-542
V. Clara	Coralillo	Coralillo	34	590-596
V. Clara	Sagua la Grande	La Roca	28	554-560
V. Clara	Caibarién	Caibarién	22	518-524
V. Clara	Quemado de Güines	La Roca	28	554-560
V. Clara	Santa Clara	Dos Hermanas	13	210-216
V. Clara	Ranchuelo	Dos Hermanas	13	210-216
V. Clara	Cifuentes	Dos Hermanas	13	210-216
V. Clara	Encrucijada	Dos Hermanas	13	210-216
V. Clara	Santo Domingo	Dos Hermanas	13	210-216
V. Clara	Camajuaní	Dos Hermanas	13	210-216
Cienfuegos	Lajas	Dos Hermanas	13	210-216
Cienfuegos	Cruces	Dos Hermanas	13	210-216
Cienfuegos	Palmira	Dos Hermanas	13	210-216
Cienfuegos	Cienfuegos	18 Plantas	27	548-554
S. Spíritus	Trinidad	La Vigía	46	662-668
S. Spíritus	Trinidad	Tope de Collantes	43	644-650
S. Spíritus	Sancti Spíritus	San Isidro	17	488-494
S. Spíritus	Yaguajay	Las Llanadas	50	686-692
S. Spíritus	Fomento	El Pedrero	45	656-662
C. de Ávila	Chambas	Chambas	29	560-566
C. de Ávila	Ciego de Ávila	Ciego de Ávila TV	33	584-590
C. de Ávila	Baraguá	Ciego de Ávila TV	33	584-590
C. de Ávila	Venezuela	Ciego de Ávila TV	33	584-590
C. de Ávila	Florencia	TV Cafetal	41	632-638
C. de Ávila	Cayo Coco	Cayo Coco	16	482-488
Camagüey	Camagüey	Camagüey TV	36	602-608
Camagüey	Nuevitas	Nuevitas	28	554-560
Camagüey	Guáimaro	Nuevitas	28	554-560
Camagüey	Santa Cruz del Sur	Santa Cruz del Sur	22	518-524
Camagüey	Cayo Romano	Cayo Romano	14	470-476
Las Tunas	Las Tunas	Las Tunas TV	33	584-590
Las Tunas	Amancio Rodríguez	Amancio Rodríguez	28	554-560
Las Tunas	Puerto Padre	Puerto Padre	47	668-674
Holguín	Holguín	Loma de La Cruz	39	620-626
Holguín	Gibara	Loma de La Cruz	39	620-626
Holguín	Moa	Miraflores	43	644-650
Holguín	Frank País	Miraflores	43	644-650
Holguín	Ramón de Antilla	Ramón de Antilla	41	632-638
Holguín	Banes	Cerro Yaguajay	44	650-656
Granma	Bayamo	Bayamo TV	38	614-620
Granma	Manzanillo	Manzanillo TV	50	686-692
Granma	Guisa	Victorino de Guisa	31	572-578
Granma	Pilón	El Mamey	27	548-554
Granma	Pilón	Caridad de Mota	25	536-542
Granma	Media Luna	El Mamey	27	548-554
Granma	Niquero	Cabo Cruz	24	530-536
Granma	Bartalomé Masó	Providencia	40	626-632
S. de Cuba	Santiago de Cuba	Puerto Boniato	33	584-590
S. de Cuba	San Luis	Puerto Boniato	33	584-590
S. de Cuba	Songo La Maya	Yerba de Güinea	39	620-626
S. de Cuba	Guamá	Tabacal	29	560-566
S. de Cuba	Guamá	Juan González	40	626-632
S. de Cuba	Segundo Frente	Segundo Frente	23	524-530

S. de Cuba	Segundo Frente	Loma Blanca	48	674-680
S. de Cuba	Tercer Frente	TV Com Cruce	25	536-542
Guantánamo	Guantánamo	Guantánamo TV	40	626-632
Guantánamo	Imías	Playitas de Cajobabo	34	590-596
Guantánamo	Baracoa	Los Guineos	38	614-620
Guantánamo	Baracoa	Majayara	51	692-698

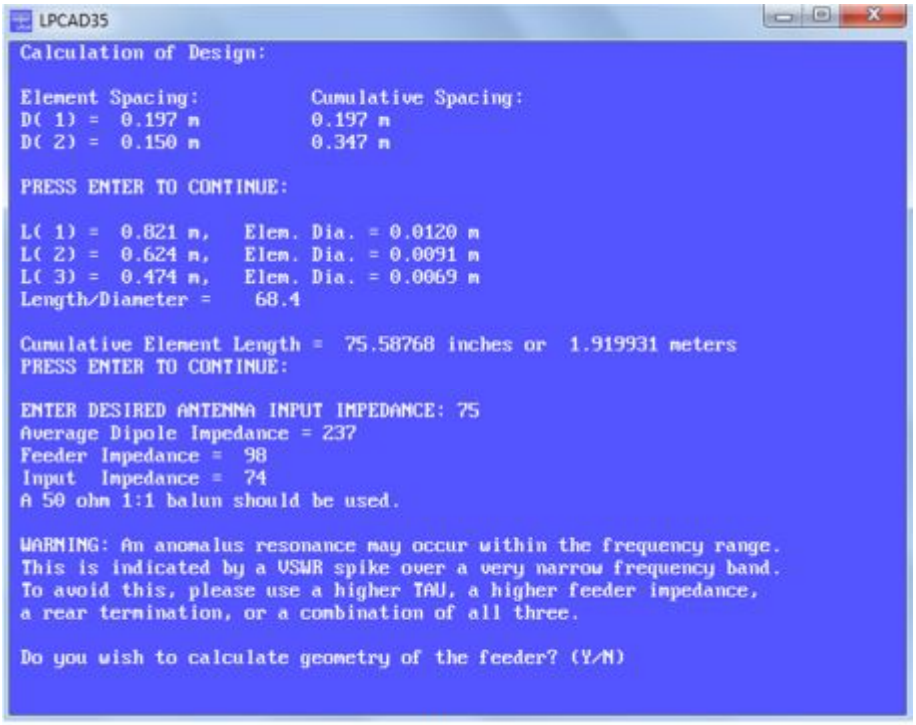
Centros transmisores de Definición Estándar (SD) del municipio especial de Isla de la Juventud

Localidades	**Centro Transmisor**	**Canal**	**Frecuencia (MHz)**
Nueva Gerona	Sierra de Caballo	41	632-638
Chacón	Sierra de Caballo	41	632-638
La Fé	Sierra de Caballo	41	632-638
La Demajagua	Sierra de Caballo	41	632-638
Cocodrilo	Cocodrilo	46	662-668

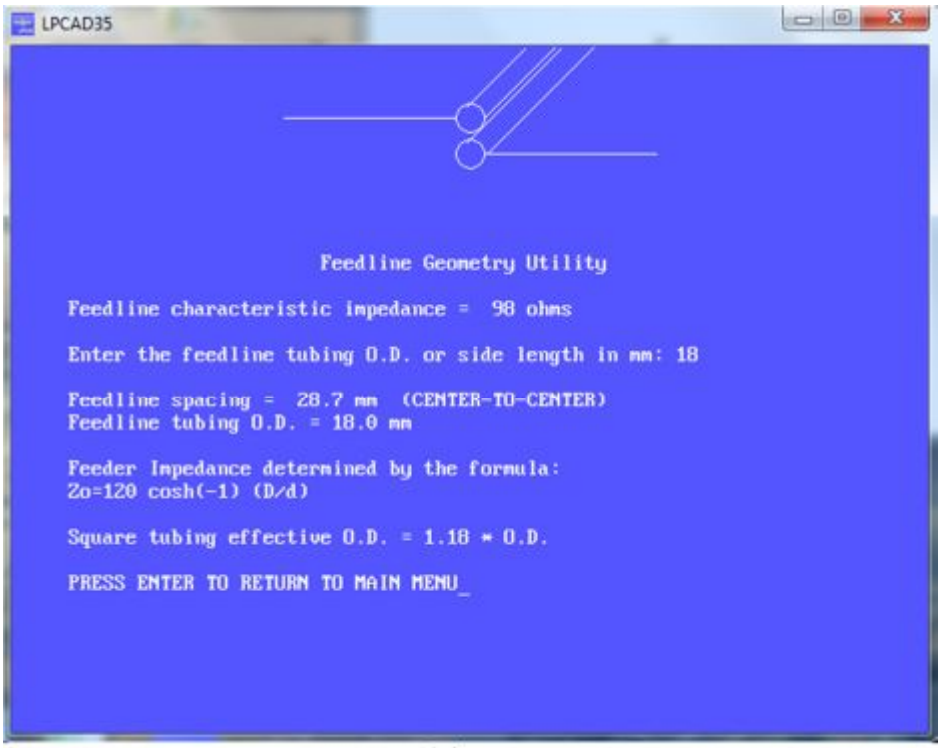
Anexo II: Cálculos de la sección de VHF de la Antena LPDA en LPCAD 35



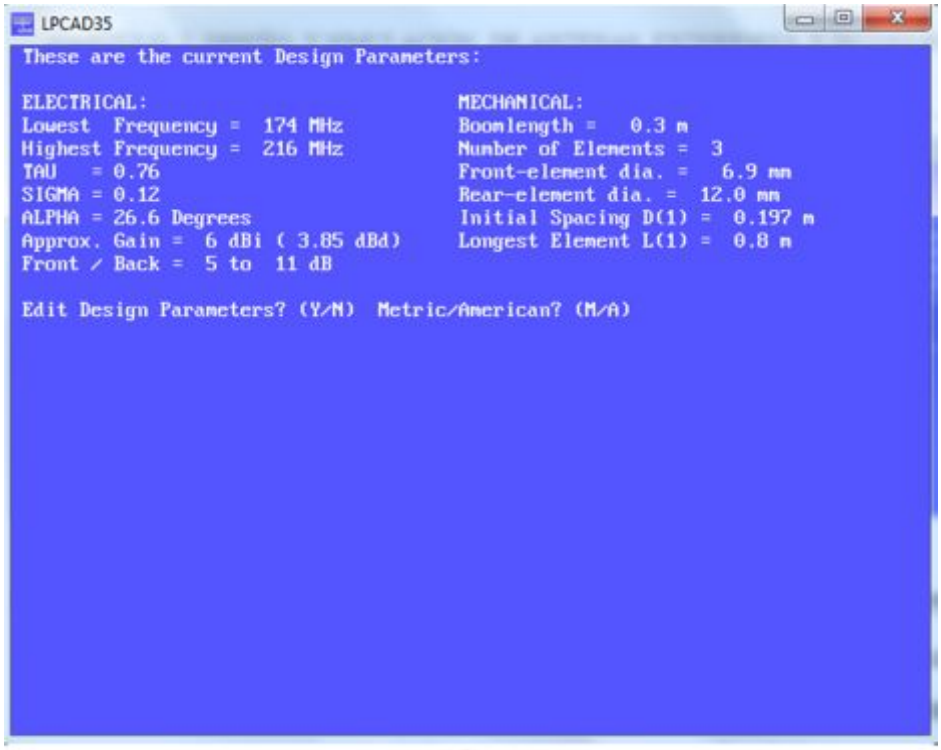
(a)



(b)


LPCAD35
Feedline Geometry Utility
Feedline characteristic impedance = 98 ohms
Enter the feedline tubing O.D. or side length in mm: 18
Feedline spacing = 28.7 mm (CENTER-TO-CENTER)
Feedline tubing O.D. = 18.0 mm
Feeder Impedance determined by the formula:
Zo=120 cosh(-1) (D/d)
Square tubing effective O.D. = 1.18 * O.D.
PRESS ENTER TO RETURN TO MAIN MENU_

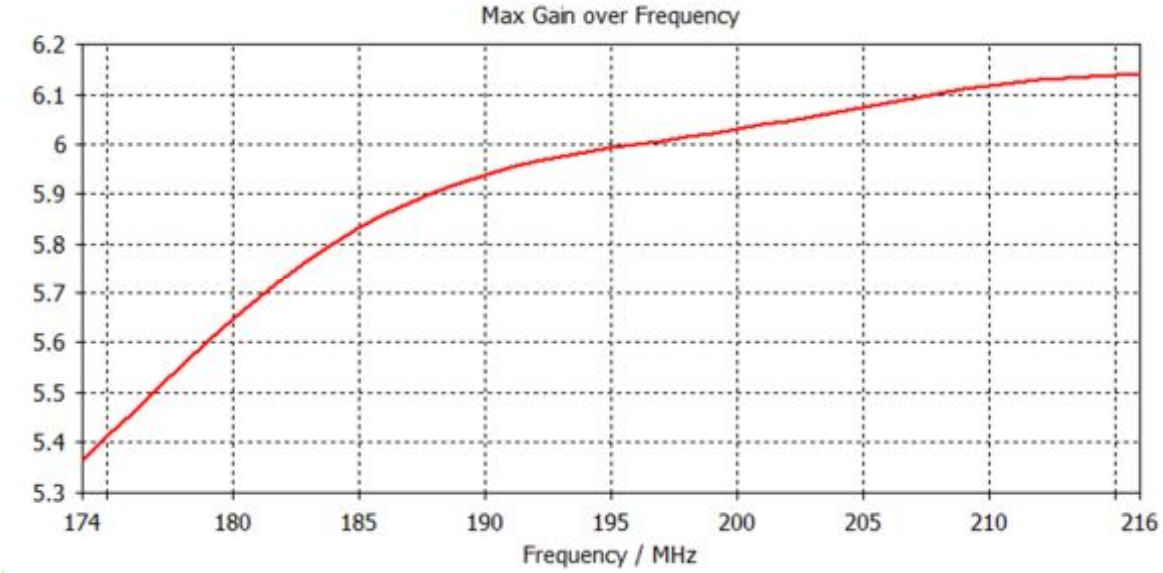
(c)


LPCAD35
These are the current Design Parameters:
ELECTRICAL:
Lowest Frequency = 174 MHz
Highest Frequency = 216 MHz
TAU = 0.76
SIGMA = 0.12
ALPHA = 26.6 Degrees
Approx. Gain = 6 dBi (3.85 dBd)
Front / Back = 5 to 11 dB
MECHANICAL:
Boomlength = 0.3 m
Number of Elements = 3
Front-element dia. = 6.9 mm
Rear-element dia. = 12.0 mm
Initial Spacing D(1) = 0.197 m
Longest Element L(1) = 0.8 m
Edit Design Parameters? (Y/N) Metric/American? (M/A)

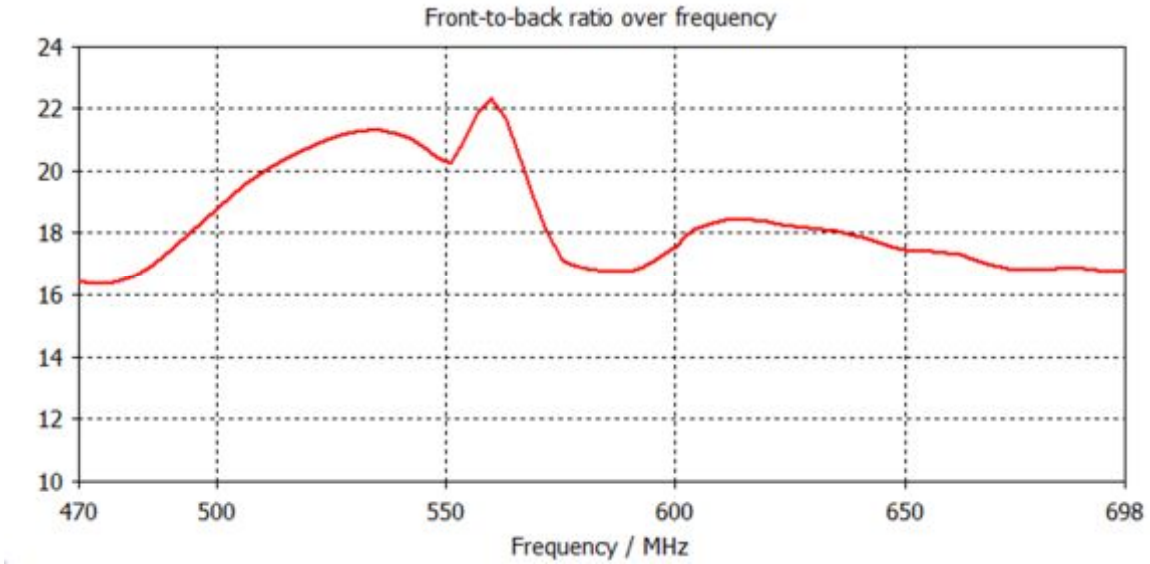
(d)

Anexo III: Características del coeficiente de radiación trasera (F/B) de la antena LPDA en función de la frecuencia

Coeficiente de radiación trasera en la banda de VHF Banda III para TDT



Coeficiente de radiación trasera en la banda de UHF para TDT



Anexo IV: Características técnicas del MMIC MAR-6

Drop-In

Monolithic Amplifier

DC-2 GHz

Product Features

- Wideband, DC to 2 GHz
- High gain, 22 dB typ. at 0.1 GHz
- Internally Matched to 50 Ohms
- Low noise figure, 3.0 dB typ.
- Cascadable
- Aqueous washable

Typical Applications

- Cellular
- PCN instrumentation

MAR-6+

CASE STYLE: VV105
PRICE: $1.16 ea. QTY. (30)

+RoHS Compliant
The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

Electrical Specifications at 25°C and 16mA, unless noted

Parameter		Min.	Typ.[3]	Max.	Units
Frequency Range*		DC		2	GHz
Gain	f=0.1 GHz f=1 GHz f=2 GHz	— — 15[2]	22 20 17	— — —	dB
Input Return Loss	f=DC to 2 GHz		21		dB
Output Return Loss	f=DC to 2 GHz		17.5		dB
Output Power @ 1 dB compression	f=0.5 GHz		+3.0		dBm
Output IP3	f=0.5 GHz		+14.5		dBm
Noise Figure	f=0.5 GHz		3.0		dB
Recommended Device Operating Current			16		mA
Device Operating Voltage			3.5		V
Device Voltage Variation vs. Temperature at 16 mA			-5.6		mV/°C
Device Voltage Variation vs. Current at 25°C			8.4		mV/mA
Thermal Resistance, junction-to-case[1]			241		°C/W

*Guaranteed specification DC-2 GHz. Low frequency cut off determined by external coupling capacitors.

Anexo V: Instrumentos y accesorios empleados en las mediciones y validaciones

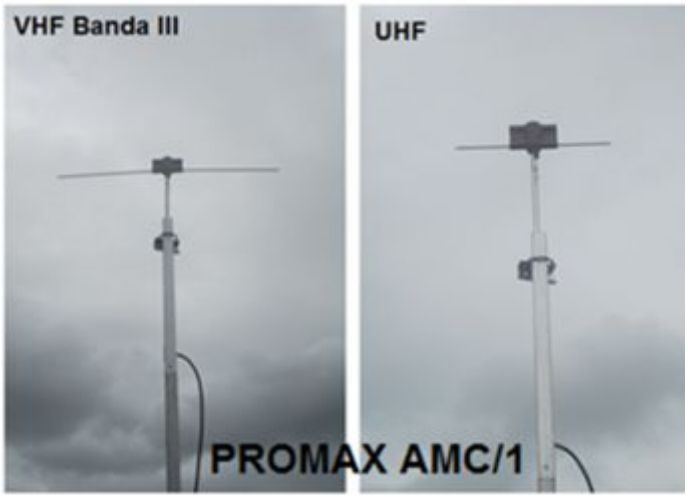
Instrumentos y accesorios utilizados en las mediciones

Características típicas del analizador de espectro DEVISER DSA8853T

- Margen de frecuencia de 500 KHz – 3000MHz.
- Margen de Amplitud de -130dBm hasta +30 dBm.
- Resolución desde 1 KHz hasta 3 MHz
- Precisión de ancho de banda < ± 10%
- Ganancia del preamplificador de amplitud interno 15 dB
- Entrada RF 50/75 Ohm
- Selección de canales por frecuencia o por canal
- Modo multicanal hasta 8 canales
- Salida de video VGA
- Rango de sintonía CATV de 5 MHz a 3000 MHz
- Resolución de pantalla de 640 x 480 píxeles.

- Teclado para ajustes de frecuencia precisos y reproductibles.
- Oscilador de referencia compensado en temperatura y de alta estabilidad.
- Puerto USB 1.1 y RS-232

Antena de dipolo de referencia utilizada en las mediciones



Antenas transmisoras utilizadas en las mediciones

Sistema de mediciones móviles TIDYCAST TD2011

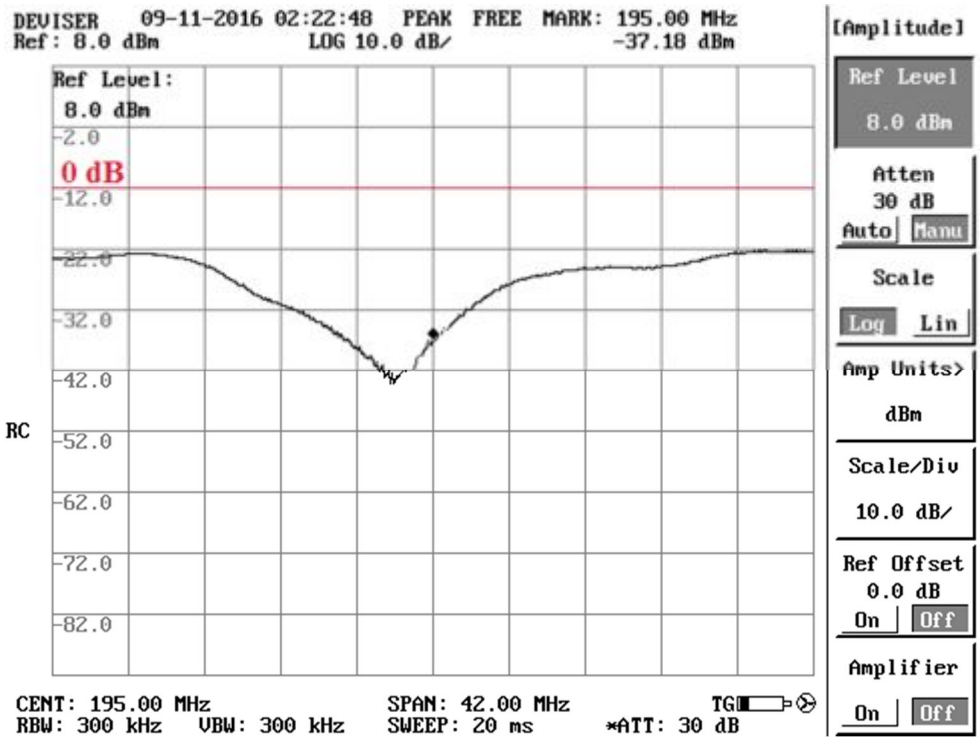
Mástil giratorio con una escala graduada en su base

Anexo VI: Mediciones de pérdidas por retorno y ROE

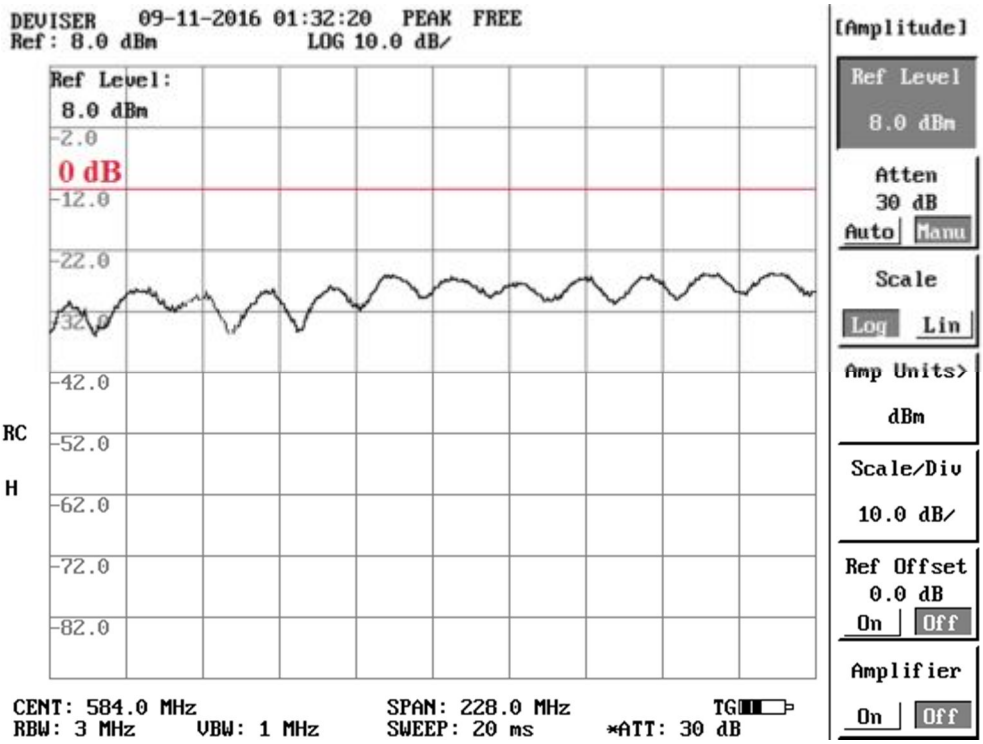
Código para la comparación de la ROE simulada y medida de las antenas en MATLAB

```
frec=input('rango de frecuencias ');
roesim=input('roe simulada ');
a=input('perdidas por retorno medidas ');
roemed=vswr(10.^(-a./20));
plot(frec,roesim,'r',frec,roemed, ':')
legend('ROE Simulada','ROE Medida')
xlabel('Frecuencia (MHz)');
ylabel('ROE');
grid;
axis([470,698,1,3]);
hold on
```

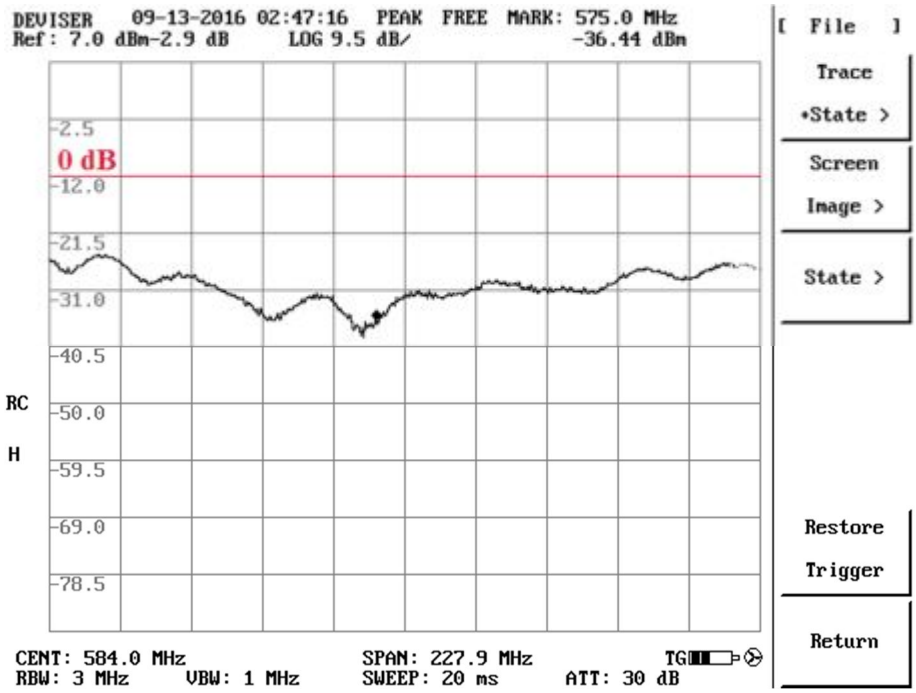
Pérdidas por retorno medidas ofrecidas por el analizador de espectro con la antena LPDA en la banda de VHF Banda III



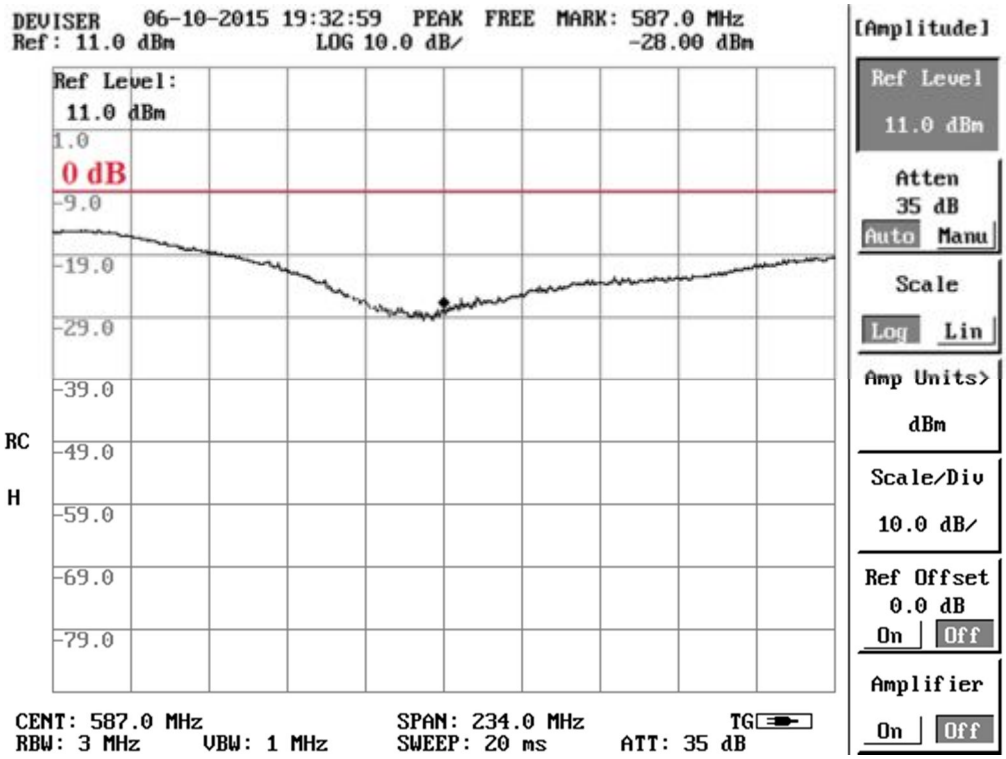
Pérdidas por retorno medidas ofrecidas por el analizador de espectro con la antena LPDA en la banda de UHF



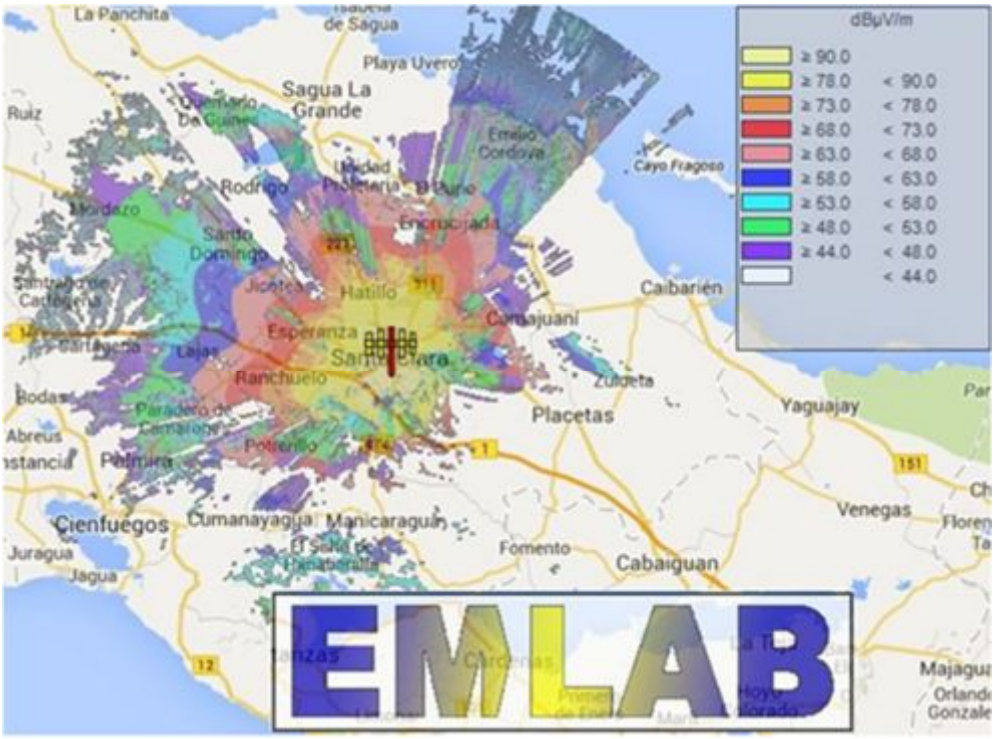
Pérdidas por retorno medidas ofrecidas por el analizador de espectro con la antena de Reflector Esquinado en la banda de UHF



Pérdidas por retorno medidas ofrecidas por el analizador de espectro con la antena de Lazo en la banda de UHF



Anexo VII: Zonas de coberturas del transmisor DTMB de canal 13 de SD de Santa Clara



Anexo VIII: Mediciones de parámetros de calidad de la recepción de la sea de TDT en algunas localidades de la Provincia de Villa Clara

Lectura ofrecida por el Analizador de TV S7000 en Isabela de Sagua con la Antena LPDA en el canal 32 de HD

Lectura ofrecida por el Analizador de TV S7000 en Isabela de Sagua con la Antena Reflector Esquinado en el canal 32 de HD

Lectura ofrecida por el Analizador de TV S7000 en la comunidad del aeropuerto de Santa Clara con la Antena de Lazo Interior sin el Módulo Activo en el canal 32 de HD

Lectura ofrecida por el Analizador de TV S7000 en la comunidad del aeropuerto de Santa Clara con la Antena de Lazo Interior con el Módulo Activo en el canal 32 de HD

MEAS
CHs SC
[12.9V 14mA]
17:53:05
POWER: −56.3 dBm
−108
−88
−68
−48
−28
−8
11
VIEW
CONS
ECHOES
SPECT
CNR
DTMB GPS
CH: Ch32
FREQ: 581.00 MHz
BW: 6.00 MHz
MODE: 64QAM
PN MOD: PN420
CR/TD: 0.6/720
CARRI: MC
POWER: −56.3 dBm
MER: 23.2 dB
BER: <1.0E−5
Channel Type: DTMB