

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE
TELECOMUNICACIONES

Diseño e Implementación de Antenas para Recepción de Servicios de Televisión Digital en el Distrito Federal

TRABAJO RECEPCIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN INGENIERÍA EN
SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

Presenta

ANA VICTORIA BARBA

Director del trabajo recepcional

M. en C. Rubén Flores Leal

México, D.F. Septiembre, 2015.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que han sido el pilar de mi vida

*A ti abuela por enseñarme que los sueños son realidad, siempre y cuando
luche por alcanzarlos. Donde quiera que estés ¡te amo!*

*A mi madre por darme el más preciado regalo en la vida para cumplir
mis sueños con fuerza e independencia.*

*A mis hermanos Emmanuel y Carlos por creer en mí,
brindarme su confianza y ver mi camino como un ejemplo.*

*A Luis por apoyarme con su gran amor y paciencia
en estos años de estudio y aprendizaje.*

*A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por ser mi alma mater
y darme la oportunidad de contar con una carrera profesional, así como el apoyo
económico brindado para la impresión de este trabajo recepcional.*

A las personas que fueron parte de este proyecto

*Al M. en C. Rubén Flores Leal por la gran enseñanza, paciencia y
confianza para llevar a cabo éste Trabajo Recepcional
y ser el gran maestro y amigo. ¡Gracias!*

*A mis compañeros y amigos Ángel y Víctor por su apoyo
en la construcción y elaboración de este trabajo.*

Al Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

*Por el apoyo con el material y las herramientas para realizar este proyecto.
En especial al Dr. Hildeberto Jardón Aguilar
y al CONACYT por su apoyo financiero para desarrollar
prototipos de antenas a través del proyecto 127856.*

*Al laboratorio de radiocomunicaciones del CINVESTAV
por las facilidades brindadas en el desarrollo de las antenas.*

*Por ser parte de mi vida, ¡GRACIAS!
Ana Victoria Barba*

JUSTIFICACIÓN

La televisión es uno de los sistemas de comunicaciones más importantes en el mundo, juega un papel esencial en cada uno de los hogares de la Ciudad de México y en poco tiempo pasará por un proceso de transición de Tecnologías.

Hoy en día, la radiodifusión de televisión emplea tecnologías analógica y digital, donde aquellas personas que poseen televisores con receptores analógicos pueden disfrutar de canales de televisión abierta y de igual forma aquellas que poseen televisiones con tecnología digital. La transición prevista en Diciembre del presente año, contempla la eliminación de transmisión analógica para transmitir sólo la digital.

Son muchos factores que se deben tomar en cuenta en esta transición, de los cuales este trabajo está enfocado en la antena receptora en equipos terminales de televisión, en las frecuencias asignadas para para la transmisión digital en el Distrito Federal. Con la visión en dicho cambio es necesario proponer, diseñar e implementar una solución para la recepción de canales de Televisión Digital Terrestre (TDT).

Este trabajo presenta una investigación de las posibles soluciones para antenas receptoras de televisión abierta, tomando como base el intervalo de frecuencias en la que transmite la TDT en el D.F. Se presentan tres propuestas de antenas optimizadas para recibir las señales de radiofrecuencia en dicho intervalo.

Empleando el software de simulación electromagnética CST Microwave Studio, se propondrán diseños prácticos que permita fabricar antenas para interiores, cubriendo las necesidades básicas de trabajo en términos de frecuencia, patrón de radiación, impedancia, ancho de banda y ganancia.

OBJETIVO

Diseñar, simular, construir y caracterizar antenas receptoras compatibles con los servicios de televisión digital en la Ciudad de México.

OBJETIVO PARTICULARES

- ✓ Identificar las diferencias generales entre la televisión analógica y la televisión digital.
- ✓ Estudiar de los fundamentos básicos de las antenas.
- ✓ Analizar y diseñar de forma básica las antenas típicas para la Televisión analógica y digital.
- ✓ Establecer una propuesta de antena para equipos terminales de televisión conforme a la complejidad de la estructura, viabilidad de construcción, bajo costo, bajo perfil y la implementación física.
- ✓ Mostrar el comportamiento de la antena para el servicio de televisión con el diseño y optimización de la estructura en un software de simulación electromagnética.
- ✓ Seleccionar el material y procedimiento para la implementación física de la antena.
- ✓ Proponer cambios en el diseño para mejorar su desempeño.

ÍNDICE

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	i
<i>JUSTIFICACIÓN</i>	ii
<i>OBJETIVO</i>	iii
<i>OBJETIVO PARTICULARES</i>	iii
<i>ÍNDICE</i>	iv
<i>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</i>	vi
<i>INTRODUCCIÓN</i>	ix
<i>Capítulo 1. MARCO TEÓRICO</i>	1
1.1. Fundamentos de Televisión	1
1.1.1. Estructura general del sistema multidifusión de televisión	2
1.1.2. Receptor de televisión.....	4
1.1.3. Televisión analógica	9
1.1.4. Televisión digital	12
1.2. Fundamentos de antenas	15
1.2.1. Antecedentes.....	16
1.2.2. Parámetros básicos	16
1.2.3. Antenas activas	24
<i>Capítulo 2. ANTENAS PARA EQUIPOS TERMINALES DE TELEVISIÓN</i>	26
2.1. Dipolo de alambre	26
2.1.1. Estructura.....	27
2.1.2. Diseño.....	28
2.2. Antena Yagi-Uda.....	31
2.2.1. Estructura.....	31
2.2.2. Diseño.....	33
2.3. Antena logarítmica	36
2.3.1. Estructura.....	37
2.3.2. Diseño.....	37
2.4. Dipolo impreso con balun integrado.....	41
2.4.1. Estructura.....	41
2.4.2. Diseño.....	43
2.5. Reflector Parabólico	47

2.5.1. Estructura.....	47
2.6. Selección de antena	48
<i>Capítulo 3. DISEÑO DE ANTENA PARA EQUIPOS DE TELEVISIÓN</i>	<i>52</i>
3.1. Estructura de las líneas de microcinta.....	52
3.1.1. Análisis matemático de la microcinta	53
3.1.3. Pérdidas de la microcinta.....	55
3.2. Antena impresa y de microcinta	57
3.2.1. Estructura de antena impresa	57
3.2.2. Principio de funcionamiento.....	58
3.3. Elección del sustrato.....	59
3.4. Dipolo impreso con balun integrado.....	60
3.4.1. Análisis del dipolo impreso.....	61
3.4.2. Alimentación del dipolo.....	64
3.5. Cálculo de las dimensiones de la antena.....	67
3.6. Análisis paramétrico de la antena	70
<i>Capítulo 4. CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA.....</i>	<i>79</i>
4.1. Construcción de antena pasiva.....	79
4.2. Caracterización de antenas	82
4.2.1. Acoplamiento	82
4.2.2. Ganancia.....	83
4.3. Mejoras al diseño.....	87
4.3.1. Antena direccional	88
4.3.2. Etapa de amplificación.....	93
<i>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</i>	<i>100</i>
Conclusiones	100
Trabajo Futuro.....	104
<i>REFERENCIAS.....</i>	<i>105</i>
<i>Anexos.....</i>	<i>107</i>

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

<i>Figura 1.1.</i> Difusión local.....	3
<i>Figura 1.2.</i> Difusión regional	3
<i>Figura 1.3.</i> Diagrama básico del receptor de televisión.	4
<i>Figura 1.4.</i> Sección de RF del receptor de TV	6
<i>Figura 1.5.</i> Diagrama a Bloques de etapa de frecuencia intermedia (FI).....	7
<i>Figura 1.6.</i> Diagrama a bloques de etapa de video y sonido del receptor de TV	7
<i>Figura 1.7.</i> Diagrama a bloques de etapa de deflexión en televisión analógica	8
<i>Figura 1.8.</i> Respuesta en frecuencia del canal de televisión	9
<i>Figura 1.9.</i> Espectro de un canal de televisión digital [8]	13
<i>Figura 1.10.</i> Diagrama de Radiación.....	17
<i>Figura 1.11.</i> Patrones principales de una antena omnidireccional.....	18
<i>Figura 1.12.</i> Cortes de plano-E y plano-H de una antena dipolo	18
<i>Figura 1.13.</i> Circuito equivalente de una antena.	20
<i>Figura 1.14.</i> Plano de radiación de (a) antena direccional y (b) antena omnidireccional	22
<i>Figura 1.15.</i> Configuración de antena activa con amplificación (a) para una antena transmisora y (b) para una antena receptora	24
<i>Figura 2.1.</i> Estructura básica del dipolo	27
<i>Figura 2.2.</i> Estructura simulada de dipolo.....	29
<i>Figura 2.3.</i> Parámetro S_{11} de la antena dipolo	30
<i>Figura 2.4.</i> Patrón de radiación de antena dipolo	30
<i>Figura 2.5.</i> Planos de Radiación de antena dipolo	31
<i>Figura 2.6.</i> Estructura básica de antena Yagi-Uda.....	32
<i>Figura 2.7.</i> Estructura final de la antena Yagi-Uda diseñada	34
<i>Figura 2.8.</i> Acoplamiento de antena Yagi-Uda	35
<i>Figura 2.9.</i> Patrón de radiación en tres dimensiones	35
<i>Figura 2.10.</i> Planos de Radiación de antena Yagi-Uda	36
<i>Figura 2.11.</i> Estructura básica de antena Logarítmica [11].	37
<i>Figura 2.12.</i> Estructura simulada de antena logarítmica.....	40
<i>Figura 2.13.</i> Acoplamiento de antena logarítmica	40
<i>Figura 2.14.</i> Patrón de radiación en tres dimensiones	40
<i>Figura 2.15.</i> Planos de Radiación de Antena Logarítmica.....	41
<i>Figura 2.16.</i> Esquema básico del Dipolo Impreso con Balun Integrado	42
<i>Figura 2.17.</i> Estructura simulada de dipolo impreso con balun integrado.....	44
<i>Figura 2.18.</i> Acoplamiento de dipolo impreso con balun integrado	44
<i>Figura 2.19.</i> Patrón de radiación en tres dimensiones	45
<i>Figura 2.20.</i> Patrones principales de radiación de dipolo impreso con balun integrado.....	45
<i>Figura 2.21.</i> Extensión de plano de tierra	46
<i>Figura 2.22.</i> Patrón de radiación con ampliación de plano de tierra.....	46
<i>Figura 2.23.</i> Patrones principales de extensión de plano de tierra	47

<i>Figura 2.24.</i> Estructura básica de la antena parabólica.....	48
<i>Figura 2.25.</i> Ubicación de antenas transmisoras de TV abierta que abastecen al D.F.	50
<i>Figura 3.1.</i> Línea de microcinta	53
<i>Figura 3.2.</i> Estructura básica de antena impresa o de microcinta.....	58
<i>Figura 3.3.</i> Formas para parche de la antena de microcinta	58
<i>Figura 3.4.</i> Líneas de campo generadas en una antena impresa	59
<i>Figura 3.5.</i> Variación del patrón de radiación debido al plano de tierra	59
<i>Figura 3.6.</i> Configuración del dipolo impreso con balun integrado [18]	61
<i>Figura 3.7.</i> Análisis de brazos de dipolo	62
<i>Figura 3.8.</i> Comparativa de parámetro S_{11} respecto a L_{dip}	63
<i>Figura 3.9.</i> Comparativa de parámetros S_{11} en función de la separación i	63
<i>Figura 3.10.</i> Variación de ancho en la parte externa de los brazos.	64
<i>Figura 3.11.</i> Variación de ancho de brazos en la parte final.....	64
<i>Figura 3.12.</i> Diferencia de corrientes en la conexión de un dipolo a coaxial [11]	65
<i>Figura 3.13.</i> Simetría de distribución de corriente mediante Balun.	65
<i>Figura 3.14.</i> Balun propuesto por Roberts	65
<i>Figura 3.15.</i> Estructura básica del balun [18]	66
<i>Figura 3.16.</i> Esquema del transformador de un cuarto de longitud de onda.....	66
<i>Figura 3.17.</i> Configuración de balun de Roberts.	67
<i>Figura 3.18.</i> Esquema final de microcinta de alimentación.....	69
<i>Figura 3.19.</i> Esquema de dipolo impreso	70
<i>Figura 3.20.</i> Acoplamiento de antena impresa propuesta	70
<i>Figura 3.21.</i> Barrido con variación de a_{ext}	71
<i>Figura 3.22.</i> Variación de parámetro a_{int}	71
<i>Figura 3.23.</i> Modificación de longitud de microcinta en extremo final.....	72
<i>Figura 3.24.</i> Variación de altura de ranura entre brazos del dipolo	73
<i>Figura 3.25.</i> Diagrama de antena con medidas propuestas	73
<i>Figura 3.26.</i> Acoplamiento de diseño final.....	74
<i>Figura 3.27.</i> Diagrama de radiación en tres dimensiones a 513.60 MHz	75
<i>Figura 3.28.</i> Cortes principales del diagrama de radiación a 613.60 MHz.....	75
<i>Figura 3.29.</i> Patrón de radiación en tres dimensiones a la frecuencia central	76
<i>Figura 3.30.</i> Planos principales de radiación a la frecuencia de 602.67 MHz	76
<i>Figura 3.31.</i> Diagrama de radiación en tres dimensiones en la frecuencia de 691.75 MHz	77
<i>Figura 3.32.</i> Planos principales de radiación a la frecuencia superior de TDT.....	77
<i>Figura 4.1.</i> Esquema de estructura con excedente de cobre	80
<i>Figura 4.2.</i> Devastado de cobre con plotter	81
<i>Figura 4.3.</i> Construcción de dipolo impreso con balun integrado.....	81
<i>Figura 4.4.</i> Comparativa de acoplamiento de simulación y construcción física.	82
<i>Figura 4.5.</i> Espectro de dipolo impreso con balun integrado.....	83
<i>Figura 4.6.</i> Configuración de antenas para medición.....	84
<i>Figura 4.7.</i> Comparación de patrón de radiación de la simulación y la caracterización	87
<i>Figura 4.8.</i> Parámetro S_{11} con expansión de plano de tierra	88

<i>Figura 4.9.</i> Planos de elevación.....	89
<i>Figura 4.10.</i> Comparativa de plano-E en 691.75 MHz	90
<i>Figura 4.11.</i> Acoplamiento de antena direccional.....	90
<i>Figura 4.12.</i> Esquema final de antena direccional.....	91
<i>Figura 4.13.</i> Planos de elevación. (a) Frecuencia mínima de TV digital. (b) Frecuencia de máxima ganancia. (c) Frecuencia máxima de TV digital.....	92
<i>Figura 4.14.</i> Esquema en tres dimensiones de antena direccional	93
<i>Figura 4.15.</i> Nivel de ganancia del amplificador	95
<i>Figura 4.16.</i> Figura de ruido del amplificador	95
<i>Figura 4.17.</i> Esquema de antena activa	96
<i>Figura 4.18.</i> Construcción de antena activa	97
<i>Figura 4.19.</i> Comparativa de espectro de antena pasiva con antena activa	97
<i>Figura 4.20.</i> Espectro de antena activa con alimentación de (a) 4V y (b) 5V	98
<i>Tabla 1.1.</i> Tabla general de canales en México	10
<i>Tabla 1.2.</i> Asignación de frecuencias para TV analógica en el D.F.	11
<i>Tabla 1.3.</i> Asignación de frecuencias para TV digital en el D.F.....	14
<i>Tabla 2.1.</i> Recopilación de algunas características del dipolo [11].....	28
<i>Tabla 2.2.</i> Elementos óptimos para antena Yagi-Uda	33
<i>Tabla 2.3.</i> Longitud de los elementos de antena Yagi-Uda de 3 elementos.....	34
<i>Tabla 2.4.</i> Datos para diseño óptimo de antenas logarítmicas	38
<i>Tabla 2.5.</i> Distancia y longitud de antena logarítmica caracterizada	39
<i>Tabla 2.6.</i> Parámetros de antena impresa con balun integrado	43
<i>Tabla 2.7.</i> Lugares de transmisión de canales digitales	49
<i>Tabla 3.1.</i> Materiales comúnmente ocupados para diseño de tecnología de microcinta	60
<i>Tabla 3.2.</i> Propiedades físicas del material	60
<i>Tabla 3.3.</i> Longitud total del dipolo impreso	62
<i>Tabla 4.1.</i> Ganancia de antena.....	86
<i>Tabla 4.2.</i> Comparación de potencia recibida por antena pasiva y activa.....	98
<i>Tabla 4.3.</i> Comparativa de antenas conectadas al aparato receptor televisivo.....	99

INTRODUCCIÓN

Los inicios de la televisión se remontan hace más de 90 años, su industria abrió un panorama de comunicación en diferentes partes del mundo. El primer sistema de televisión fue realizado por John Logie Baird en 1920 y el color se introdujo a estos sistemas por el mexicano Guillermo González Camarena en 1954. Durante todos estos años la televisión ha llegado a ser una fuente dominante de información y entretenimiento en todas partes del mundo. El sistema ha evolucionado del monocromático al color, del mono estéreo al audio estéreo y actualmente de la tecnología analógica a la digital [1].

Por esto, México consideró inicialmente la transmisión de televisión con ambas tecnologías de manera simultánea para lograr una transición paulatina. No obstante, las autoridades del país en materia de Telecomunicaciones optaron por eliminar la transmisión analógica y ocupar únicamente la digital en Diciembre del 2015, a esto se le conoce como el “Apagón analógico”. Esta decisión apunta a tres cambios importantes en el sistema: la forma de adecuar la señal para transmitirla, el procesamiento de imagen y sonido en aparatos receptores y el espectro de frecuencias de transmisión [2].

La tecnología digital en televisión, es el conjunto de procesos llevados a cabo en la transmisión de señales, para que la información digital sea contenida en una portadora analógica, enviada, detectada y procesada de tal forma que se entregue al usuario imagen y sonido de mayor calidad. Con ello, se obtienen ventajas sobre la televisión analógica, como servicios de altadefinición; diferente programación enviada en el mismo ancho de banda de un canal de televisión analógica simple, entre otros.

Las emisoras de televisión son las encargadas de procesar la información para montarla en una portadora, que será enviada al espacio. Dicha señal, será recibida y procesada para su reproducción, lo que no es posible realizar en un aparato receptor analógico. Las frecuencias asignadas a los canales de televisión digital están comprendidas de los 513.60 MHz a los 691.75 MHz del espectro radioeléctrico en la Ciudad de México, lo que se ha sido tomado en cuenta para la propuesta de una antena capaz de recibir señales electromagnéticas, entregándoselas con mayor eficiencia al aparato receptor los servicios de televisión digital, para que el usuario obtenga los beneficios de la tecnología.

Basado en el objetivo planteado y con el alcance del mismo, en el presente trabajo recepcional se entregan tres propuestas de antenas de radiofrecuencia optimizadas en el espectro asignado a la televisión digital.

En el primer capítulo se presenta el marco teórico, en el cual se abordan temas como: el mecanismo de difusión de señales de televisión, la recepción de dicha señal en el aparato televisivo, el espectro de frecuencias asignado para televisión analógica y digital en el D.F y la diferencia entre ellas. Para enfocarse en el espectro de frecuencias de las dos tecnologías, se abordan temas como los conceptos fundamentales de las antenas de radiofrecuencia desde su historia, su conceptualización, patrón de radiación, ancho de banda, impedancia, entre otros.

Al buscar un diseño útil para la Ciudad de México y considerando que con el paso del tiempo las edificaciones se incrementan para cubrir las necesidades de los habitantes, es necesario diseñar una antena de fácil manipulación física y que evite la instalación exterior o en azoteas. Por esto, en el segundo capítulo, son analizadas las antenas dipolo, Yagi-Uda, logarítmica y dipolo impreso con balun integrado desarrollándolas matemáticamente para operar en el espectro asignado a TV digital. A través de un diseño tradicional y luego comprobado por simulación, se muestra el esquema con las medidas necesarias, acoplamiento, planos principales de radiación y patrón de radiación en tres dimensiones; se continua con las ventajas y desventajas de aplicar la antena en los servicios mencionados y dar paso a la elección justificada de un diseño para su estudio y profundidad.

En el tercer capítulo se analizan las partes que conforman una antena impresa con balun integrado, tomando en cuenta la teoría de las antenas impresas y las líneas de microcinta, las pérdidas en ellas, la función del balun como acoplador de impedancias y el transformador de un cuarto de longitud de onda.

Se presenta el análisis matemático para el acoplamiento del dipolo impreso en la frecuencia central, la elección del sustrato adecuado para la antena. Se describe a detalle el proceso de optimización del ancho de banda de la antena para operar en el espectro asignado a la Televisión Digital Terrestre (TDT) en el D.F. Finalmente, se proporcionan las dimensiones propuestas de la antena.

La implementación física de la estructura es de suma importancia, ya que a nivel simulación hay factores, como pérdidas u obstáculos que se encuentran en el entorno y que no son considerados. En el cuarto capítulo se presenta la construcción del dispositivo, la caracterización de la antena: medición de la ganancia, acoplamiento, el patrón de radiación, así como su comparación con los resultados obtenidos por simulación. A su vez, se desarrollan dos diseños con características mejoradas: direccional y con etapa de amplificación.

El diseño direccional es resultado de la modificación de las dimensiones de la antena, buscando brindar mayor ganancia en una dirección específica, se muestra un análisis de la distancia entre el radiador y el plano de tierra, observando el comportamiento para la elección de la mejor propuesta. Esta mejora, es útil para usuarios televisivos ubicados en un punto de la ciudad en el que las antenas transmisoras se encuentran en la misma dirección.

Por su parte el diseño con amplificación, brinda a la señal ganancia en amplitud, considerándose de utilidad para usuarios que por algún factor no reciban la señal con nivel de amplitud necesario para hacerla llegar de forma eficiente al receptor, conservando la omnidireccionalidad. Por lo que, se muestra en el capítulo 4 la comparativa de los niveles de amplitud de la antena propuesta con amplificación y sin amplificación.

Capítulo 1.

MARCO TEÓRICO



La televisión es uno de los sistemas de comunicaciones con mayor demanda en todo el mundo y en consecuencia en México, por lo que en este capítulo se consideran temas como: la transmisión de las señales de televisión, el trabajo de un receptor del servicio y la transición de señales analógicas a digitales. Así mismo, se examinan temas como: la recepción de señales de televisión abierta, el espectro que la compone (diferenciando entre el servicio analógico y digital), para concluir con la descripción de los conceptos primordiales de antenas de radiofrecuencia.

1.1. Fundamentos de Televisión

La palabra “televisión” es un híbrido de la voz griega “Tele” (distancia) y la latina “visio” (visión) por lo que dicho término se engloba en los eventos que se pueden mostrar a distancia. El término es referido a todos los aspectos de transmisión y programación de televisión, el concepto se abrevia como TV. La palabra fue utilizada por primera vez por Constantin Persky(1854-1906) en el congreso de electricidad en París [3].

La televisión es el resultado de la combinación de tres importantes acontecimientos: El descubrimiento de la fotoelectricidad (capacidad de ciertos cuerpos para transformar la energía eléctrica en energía luminosa), el desarrollo de procedimientos de análisis, descomposición y reinterpretación de las imágenes, y el uso de las ondas de radio [4].

La imagen en movimiento es lo que caracteriza a la televisión y los primeros desarrollos fueron realizados los franceses Rionoux y Fournier en 1906, quienes implementaron una matriz de células fotosensibles que se conectaban una a una con otra matriz de lamparillas. A cada célula del emisor le correspondía una lamparilla en el receptor.

Los años 50 han sido calificados por muchos analistas como el periodo del gran salto de la televisión, al ser la década de su extensión por el mundo. En México se iniciaron las emisiones monocromáticas de forma regulada a partir de 1950.

La incorporación del color se atribuye al ingeniero mexicano Guillermo González Camarena en Estados Unidos en el año de 1953, siendo el primer país en contar con televisión a color con su propio sistema de emisión: el Comité Nacional del Sistema de Televisión (NTSC), ocupado en los Estados Unidos, Canadá, Japón, México, entre otros países.

Posteriormente, en Europa se puso en marcha una serie de investigaciones para perfeccionar el sistema estadounidense, los resultados de estas investigaciones dieron lugar a dos sistemas de televisión en color. En 1959, el gobierno galo puso en marcha el sistema SECAM (Color secuencial con memoria) y cuatro años más tarde apareció el sistema alemán PAL(Línea de fase alternada) que se clasifican como estándares para televisión a color.

1.1.1. Estructura general del sistema multidifusión de televisión

Existen diferentes tipos de transmisión de señales televisivas en México: radiodifusión, por cable o satelital. En general, el servicio de “Televisión abierta” es el que se puede tener acceso con solo tener un aparato receptor de televisión, sin necesidad de pago alguno y en México es transmitida por radiodifusión [2].

Una vez que en las estaciones televisivas producen la señal que se entregará al público en general, la señal cubrirá áreas distintas dependiendo de la cobertura que se pretenda abarcar, ya sea local, regional o nacional [5].

1.1.1.1. Difusión local

En la difusión local, se busca brindar el servicio a una población en específico, el transmisor puede estar ubicado en el mismo lugar que el centro donde se produce la señal, en el caso opuesto es necesario que se ubique en un punto en el que las condiciones orográficas permitan una cobertura total en la localidad. La figura 1.1, muestra un esquema de la difusión local.

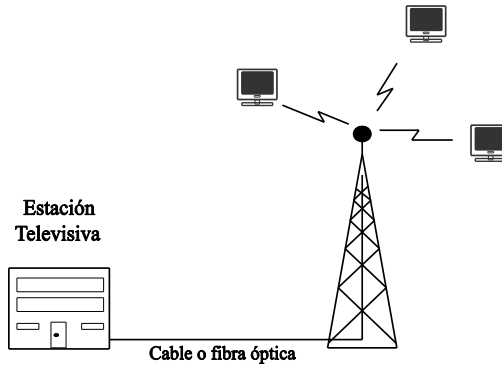


Figura 1.1. Difusión local

1.1.1.2. Difusión regional

Este tipo de difusión se representa en la figura 1.2, la señal originada es generalmente destinada a más de un transmisor. A esta red se le conoce como *red primaria*.

Posteriormente se hace llegar el servicio a la población de diferentes puntos regionales; sin embargo, la mayoría de ellos no alcanzan a cubrir toda el área y son necesarios retransmisores colocados en puntos estratégicos con el fin de distribuir la señal hacia todos los usuarios.

Los retransmisores reciben la señal de la estación primaria a una frecuencia y la trasladan a otro canal de frecuencia para amplificarla y retransmitirla hacia la zona de no cobertura, a este conjunto de retransmisores alimentados por la red primaria, se le conoce como *red secundaria* [5].

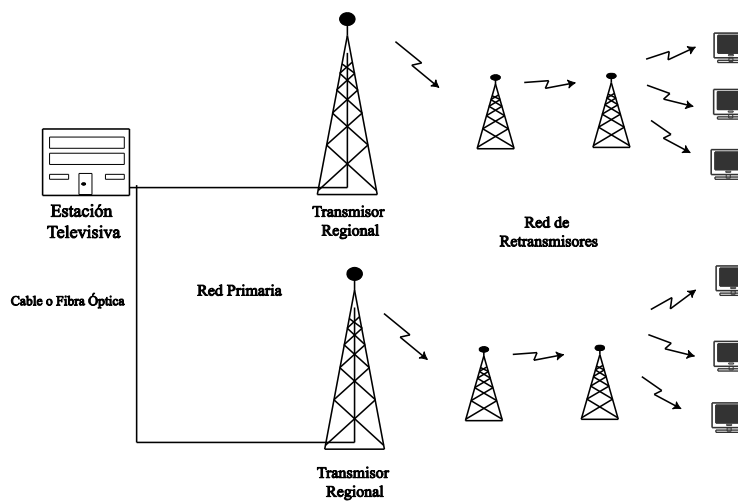


Figura 1.2. Difusión regional

1.1.1.3. Difusión nacional

De la misma forma que en la difusión regional y de acuerdo a la figura 1.2, la señal es transmitida a toda la población del país, pero debe pasar a través de centros regionales para igualar con los horarios de transmisión de programación o sustituir la programación regional o local, por lo que pasarán por redes primarias y secundarias.

Hasta ahora, se observó el proceso de emisión de la señal de televisión en las estaciones transmisoras. Dichas señales se producen y se envían para abastecer a toda la ciudad; sin embargo, la detección y manipulación de la señal en el receptor es elemental para entregar al usuario programación con calidad de imagen y sonido, lo que se enfatiza en este trabajo recepcional.

1.1.2. Receptor de televisión

Un receptor de televisión es integrado principalmente por cinco secciones: antena receptora, sección de radiofrecuencia (RF), sección de frecuencia intermedia (FI), video y sonido, concluyendo con la etapa de formato y visualización mostrados en el diagrama de la figura 1.3. Dentro de dichas etapas se realizan procesos consecutivos para concluir con la entrega de imagen y sonido al usuario [6].

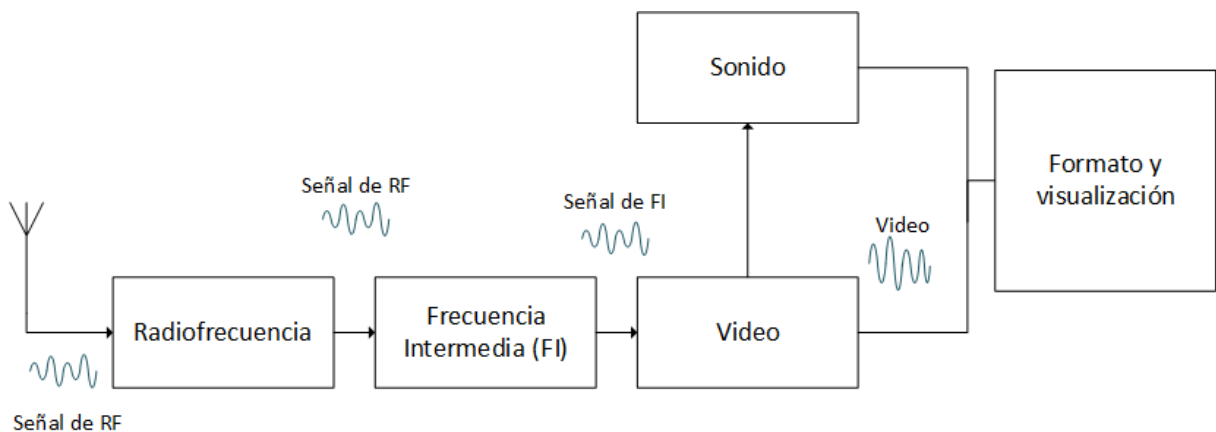


Figura 1.3. Diagrama básico del receptor de televisión.

1.1.2.1. Antena receptora

Una alta relación señal a ruido (SNR) es necesaria para llevar a cabo el proceso de detección y reproducción de imágenes televisivas, la detección de la señal se realiza por la antena y algunas condiciones que tienen influencia en la SNR son [6]:

- a) *Señal con alto nivel de potencia arribando a la antena.* Es elemental tener una buena señal de televisión llegando a la antena receptora, sin embargo, garantizar este punto desde el lugar de recepción no es posible, ya que no se puede controlar edificios, clima u otros aspectos que la perjudican.
- b) *Baja magnitud de señales interferentes en el espacio libre.* Señales que puedan alterar el sistema.
- c) *Eficiencia de la antena para detectar las señales.* Parámetro de la antena que relaciona la energía radiada respecto a la suministrada a la misma.
- d) *Mínima presencia de ruido.* El acoplamiento de señales fuera del intervalo de frecuencias de televisión se toman como ruido que puede afectar el sistema.
- e) *Mínima magnitud de ondas reflejadas en la línea de transmisión.* El acoplo de impedancias de los sistemas que operan de forma conjunta permite que las ondas reflejadas sean mínimas, para que se transfiera eficientemente la potencia.

La garantía de estas condiciones es resultado de la ganancia de la antena receptora y la capacidad de radiación en la misma dirección que el transmisor emite su señal.

Una antena popular para este servicio de radiocomunicaciones es el dipolo de media longitud de onda, que se estudiará a fondo en el capítulo 2. A grandes rasgos, el dipolo es compuesto de dos brazos de material conductor, conectado por el centro de sus elementos; siendo necesario el acoplamiento de impedancia entre el televisor y la antena para minimizar la reflexión de ondas.

Con base en el dipolo se han desarrollado otras antenas como la Yagi-Uda y la logarítmica, los diseños intentan garantizar las condiciones de la SNR.

1.1.2.2. Sección de RF

Esta sección está compuesta de un preselector, amplificador de RF y el convertidor de frecuencia, como se observa en la figura 1.4. Su objetivo es brindar la amplificación de señales y la selección de canales, proporcionando el rechazo de otras frecuencias a través de la conversión de señales de RF a FI [7].

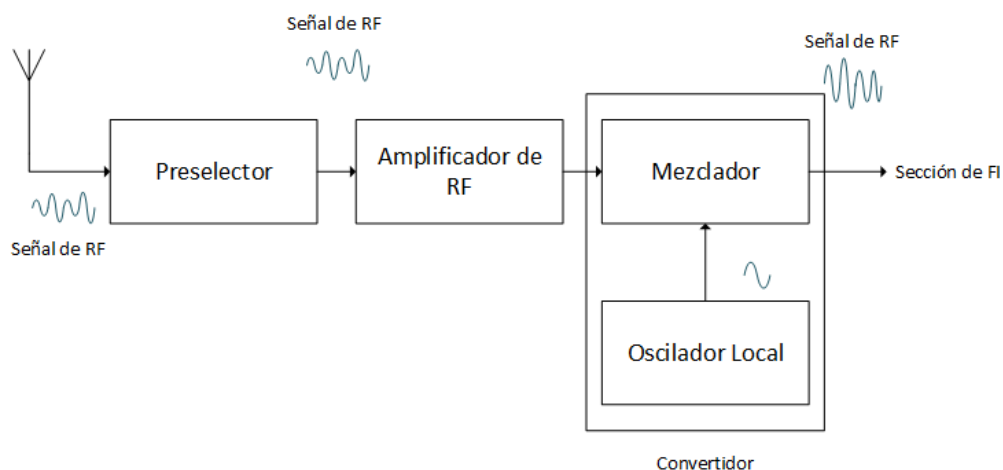


Figura 1.4. Sección de RF del receptor de TV

Las señales son captadas por la antena conectada al receptor de televisión, dichas señales son limitadas en banda por el preselector y amplificadas para ser entregadas al convertidor, en este bloque, el convertidor es el responsable de variar la frecuencia del oscilador local para el traslado de la señal a frecuencia intermedia (FI) que se entrega a la siguiente sección.

1.1.2.3. Sección de frecuencia intermedia (FI)

Encargada de brindar la mayor selectividad y ganancia, generalmente consiste de varios amplificadores conectados en cascada con alta ganancia en donde se procesa la imagen y sonido (véase la figura 1.5), siendo el estándar para televisión comercial de 45.75 MHz para imagen y 42.25 MHz para sonido [7]. Los amplificadores poseen filtros pasa-banda que limitan el ancho de banda de la señal para evitar interferencia entre canales adyacentes.

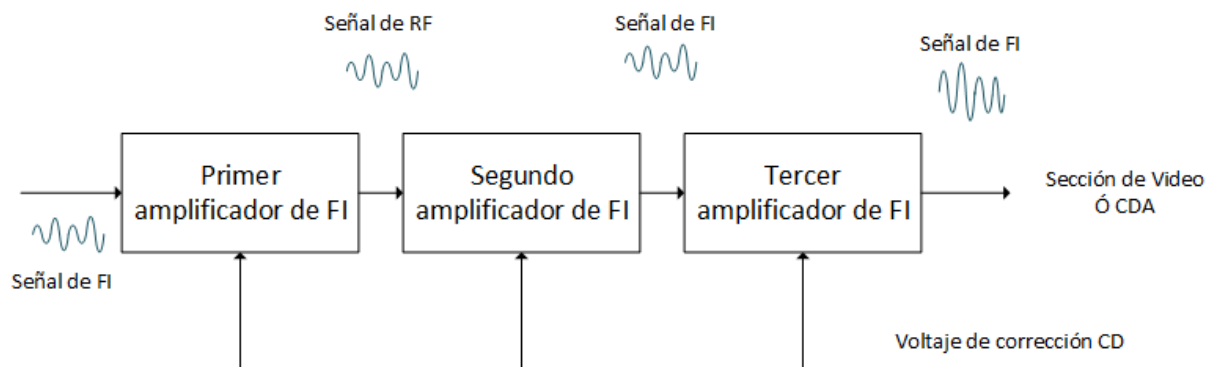


Figura 1.5. Diagrama a Bloques de etapa de frecuencia intermedia (FI)

Los filtros que se ocupan también se denominan trampas de onda y son responsables de atrapar o bloquear la imagen de canal adyacente y la frecuencia de portadoras de sonido. En el caso del televisor digital, al final de esta sección se agrega un convertidor digital a analógico (CDA) para continuar con el procesamiento de video y sonido ya sea analógico o digital.

Todo procesamiento digital dentro del receptor de televisión se lleva a cabo después de la etapa de FI [8].

1.1.2.4. Sección de video y sonido

Como se ilustra en el diagrama a bloques en la figura 1.6, esta sección incluye un detector de video y una serie de amplificadores de video. El primer bloque convierte la señal de IF a video, agregando controles de contraste y brillantez.

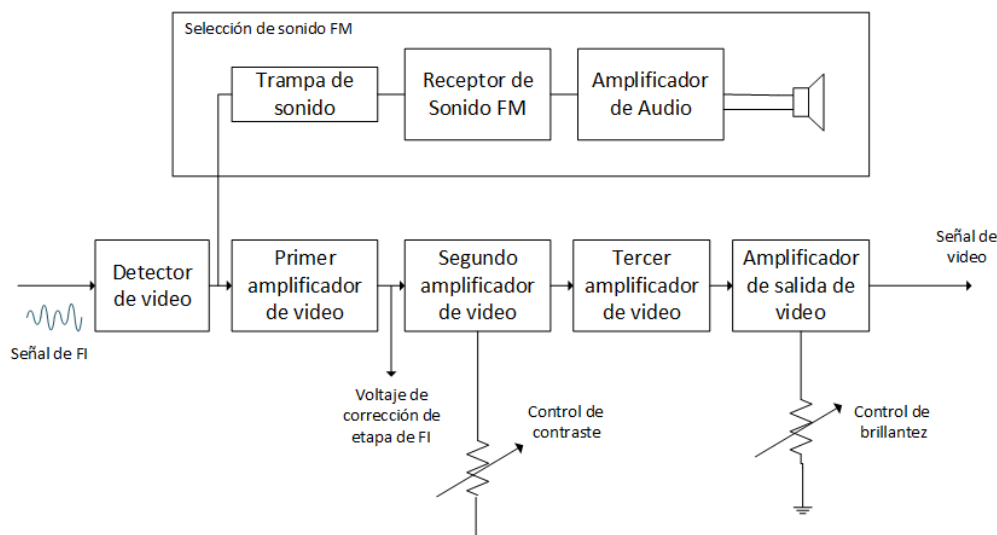


Figura 1.6. Diagrama a bloques de etapa de video y sonido del receptor de TV

El detector es por lo regular un diodo, al que la señal de FI proporciona el voltaje en corriente alterna (CA) necesario para excitar al diodo a la conducción, dando como resultado la señal de video compuesta que pasa a los amplificadores para entregarle ganancia y reestructuración de las imágenes. Una vez que se obtiene la señal de video compuesta, se agrega una trampa de sonido para su procesamiento, debido a que esta modulado en frecuencia [7].

1.1.2.5. Formato y Visualización

En esta sección las señales de audio y video se adecuan para pasar a una pantalla de televisión analógica, llegar a una pantalla de plasma, un panel LCD o algún otro dispositivo de visualización. El esquema de la figura 1.7 muestra la forma de operación de la televisión analógica, que crea pulsos de sincronía horizontales y verticales para realizar la composición de imagen [6].

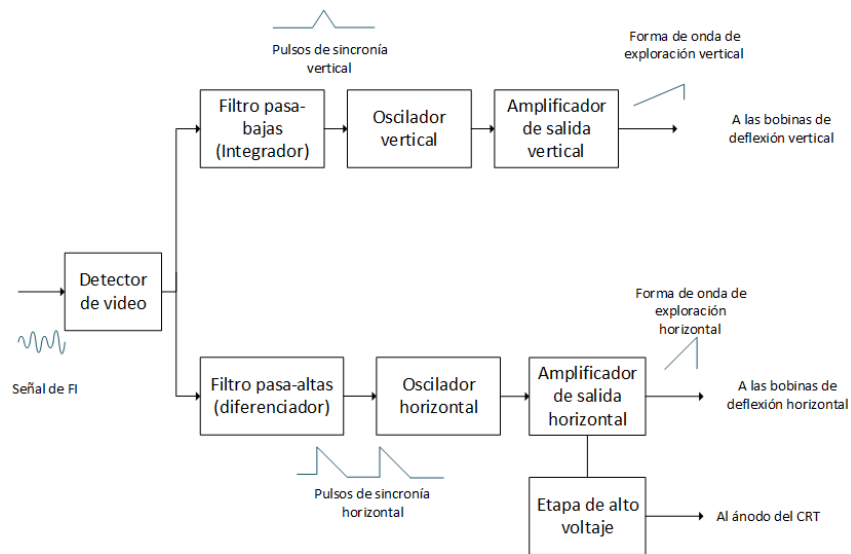


Figura 1.7. Diagrama a bloques de etapa de deflexión en televisión analógica

La televisión, como toda tecnología se encuentra en constante innovación con cambios en los procesos de detección y reproducción de la señal. Apegado a estos cambios y con la transmisión de televisión digital abierta, se produce la necesidad de detección de señales a frecuencias asignadas a la TDT, por lo que se ha considerado la importancia de analizar algunos procesos de TV analógica y digital.

1.1.3. Televisión analógica

Llamada de este modo por emplear procesos de modulación analógicos, es la base de todo sistema televisivo conocido hasta estos días, estableciendo características técnicas específicas que no cambian del todo al darse el cambio a digital.

1.1.3.1. Sección de RF

Cada canal transmitido en la televisión, posee un ancho de banda de 6 MHz para los sistemas M (525 líneas) y N (625 líneas) en el caso del sistema analógico, enviando en él la información de audio y video, así como una subportadora de color para cada canal. El espectro de la señal de video se muestra en la figura 1.8 [1].

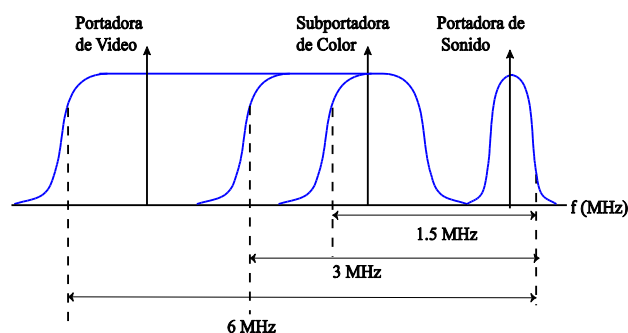


Figura 1.8. Respuesta en frecuencia del canal de televisión

El ancho de banda asignado a la transmisión de cada canal comercial es de 6 MHz, por lo que la información de audio, imagen y color en conjunto deben tener el mismo ancho para su reproducción adecuada en el receptor.

1.1.3.2. Tipos de Modulación

Para modular la señal de video en los sistemas analógicos de televisión, emplea un modulador de amplitud (AM), en conjunto con un filtro a la salida para cortar parcialmente una de las bandas laterales (conocido como banda lateral vestigial) para la televisión analógica se usa la banda lateral inferior.

El vestigio o residuo, que se mantiene de la banda inferior, se recorta a partir de 0.75 MHz, presentando un nivel del 50% de la amplitud en una frecuencia de 1 MHz. El espacio total reservado a esta porción de banda lateral es de 1.25 MHz y se puede eliminar la señal portadora

durante el proceso de modulación [3]. La señal audio se modula en frecuencia (FM), con una separación de 4.5 MHz con respecto a la portadora de video, esto para el caso del estándar ocupado en México que es el NTSC.

1.1.3.3. Bandas de frecuencia

La frecuencia para cada canal de TV es regulada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). En México las portadoras asignadas para cada canal se muestran en la tabla 1.1. Para la transmisión analógica se usan las bandas VHF (*Very High Frequency*) y UHF (*Ultra High Frequency*). Los canales de televisión abierta con dicha tecnología en el Distrito Federal se encuentran asignados en el intervalo de 55.25 MHz a 631.75 MHz, como se muestra en la tabla 1.2.

Tabla 1.1. Tabla general de canales en México

Canal	Video (MHz)	Audio (MHz)	Canal	Video (MHz)	Audio (MHz)
2	55.25	59.75	43	645.25	649.75
3	61.25	65.75	44	651.25	655.75
4	67.25	71.75	45	657.25	661.75
5	77.25	81.75	46	663.25	667.75
6	83.25	87.75	47	669.25	673.75
7	175.25	179.75	48	675.25	679.75
8	181.25	185.75	49	681.25	685.75
9	187.25	191.75	50	687.25	691.75
10	193.25	197.75	51	693.25	697.75
11	199.25	203.75	52	699.25	703.75
12	205.25	209.75	53	705.25	709.75
13	211.25	215.75	54	711.25	715.75
14	471.25	475.75	55	717.25	721.75
15	477.25	481.75	56	723.25	727.75
16	483.25	487.75	57	729.25	733.75
17	489.25	493.75	58	735.25	739.75
18	495.25	499.75	59	741.25	745.75
19	501.25	505.75	60	747.25	751.75
20	507.25	511.75	61	753.25	757.75
21	513.6	517.75	62	759.25	763.75
22	519.25	523.75	63	765.25	769.75
23	525.25	529.75	64	771.25	775.75
24	531.25	535.75	65	777.25	781.75

Canal	Video (MHz)	Audio (MHz)	Canal	Video (MHz)	Audio (MHz)
25	537.25	541.75	66	783.25	787.75
26	543.25	547.75	67	789.25	793.75
27	549.25	553.75	68	795.25	799.75
28	555.25	559.75	69	801.25	805.75
29	561.25	565.75	70	807.25	811.75
30	567.25	571.75	71	813.25	817.75
31	573.25	577.75	72	819.25	823.75
32	579.25	583.75	73	825.25	829.75
33	585.25	589.75	74	831.25	835.75
34	591.25	595.75	75	837.25	841.75
35	597.25	601.75	76	843.25	847.75
36	603.25	607.75	77	849.25	853.75
37	609.25	613.75	78	855.25	859.75
38	615.25	619.75	79	861.25	865.75
39	621.25	625.75	80	867.25	871.75
40	627.25	631.75	81	873.25	877.75
41	633.25	637.75	82	879.25	883.75
42	639.25	643.75	83	885.25	889.75

Tabla 1.2. Asignación de frecuencias para TV analógica en el D.F.

Concesión	Distintivo	Canal	Frecuencia asignada		Potencia de Tx (KW)
			Video (MHz)	Audio (MHz)	
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XEW	2	55.25	59.75	64.0
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XHTV	4	67.25	71.75	64.0
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XHGC	5	77.25	81.75	64.0
TELEVISION AZTECA, S.A. DE C.V.	XHIMT	7	175.25	179.75	268.8
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XEQ	9	187.25	191.75	325.0
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL	XEIPN	11	199.25	203.75	324.0
TELEVISION AZTECA, S.A. DE C.V.	XHDF	13	211.25	215.75	320.0
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	XHUNAM	20	507.25	511.75	0.2
TELEVISION METROPOLITANA, S.A. DE C.V.	XEIMT	22	519.25	523.75	2271.3
COMPAÑÍA INTERNACIONAL DE RADIO Y TELEVISIÓN, S. A.	XHTRES	28	555.25	559.75	2500.0
TELEVISORA DEL VALLE DE MEXICO, S.A. DE C.V.	XHTVM	40	627.25	631.75	1535.9

1.1.4. Televisión digital

Se denomina televisión digital por los procesos de modulación y codificación empleados, los cuales difieren a los empleados en el sistema analógico. Busca dos objetivos importantes [8]:

- Limitar el ruido a su a su mínimo valor, con una SNR más favorable que en las modulaciones ocupadas con la tecnología analógica.
- Calidad de la imagen o mejor conocida como alta definición.
- El posicionamiento de nuevos servicios en el espacio radioeléctrico destinado a la televisión.

En México la televisión digital comienza a tener mayor demanda y necesidad de nuevos aparatos receptores para el venidero “apagón analógico”. De acuerdo con las cifras dadas por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) muestran que hasta el año 2014, solamente el 25.8% respecto al total de hogares con Televisión cuenta con televisor digital, y el 36.7% respecto al mismo total cuentan con un servicio de TV de paga [2].

Para la recepción de los canales comerciales digitales, es necesario contar con un televisor que cumpla con la norma ATSC A/53 [9] (MPEG-2 y/o MPEG-4) o un decodificador apropiado que cumpla con dicho estándar. Para realizar la transmisión digital, la adecuación de la información al medio debe cumplir tres puntos, los cuales se enlistan a continuación [8]:

- La señal debe de contener suficiente señalización para que el receptor pueda identificar el principio y el fin de los símbolos de datos.
- La información de transmisión debe protegerse mediante la incorporación de palabras o símbolos de código, codificación del canal y codificación de fuente.
- El sistema transmisor debe adoptar la máxima eficiencia espectral para ocupar el mismo ancho de banda, la cual es una condición necesaria para albergar los nuevos servicios en los canales asignados.

1.1.4.1. Sección de RF

Al igual que en los sistemas televisivos analógicos, la televisión digital maneja un ancho de banda de 6 MHz por canal, en él se incluye información de audio y video, el espectro se muestra en la figura 1.9. La diferencia importante radica en los procesos digitales, como compresión y codificación, esto permite enviar mayor información dentro de un mismo ancho de banda.

Tabla 1.3. Asignación de frecuencias para TV digital en el D.F.

Concesión	Distintivo	Canal de RF	Equivalente analógico	Ancho de banda del canal (MHz)		Potencia (kW)
GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL	XHCDM	21	Sin asignación	513.60	519.25	133.570
TELEVISIÓN METROPOLITANA, S.A. DE C.V.	XEIMT	23	22	525.25	531.25	116.490
TELEVISIÓN AZTECA, S.A. DE C.V.	XHIMT	24	7	531.25	537.25	64.000
TELEVISIÓN AZTECA, S.A. DE C.V.	XHDF	25	13	537.25	543.25	63.920
TELEVISORA DEL VALLE DE MEXICO, S.A. DE C.V.	XHTVM	26	40	543.25	549.25	71.400
COMPAÑÍA INTERNACIONAL DE RADIO Y TELEVISIÓN S.A.	XHTRES	27	28	549.25	555.25	71.400
ORGANISMO PROMOTOR DE MEDIOS AUDIOVISUALES	XHOPMA	30	Sin asignación	567.25	573.25	116.260
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL	XEIPN	33	11	585.25	591.25	104.050
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XEQ	44	9	651.25	657.25	270.000
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XEW	48	2	675.25	681.60	270.000
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XHTV	49	4	681.25	687.25	270.000
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	XHGC	50	5	687.25	693.25	270.000

1.1.4.3. Tipos de modulación

Como se mencionó, 8-VSB es el formato de modulación RF utilizado por la televisión digital (ATSC), para transmitir bits a través de las ondas de radio para el usuario doméstico. Dado que cualquier sistema de TV terrestre debe superar numerosas degradaciones del canal como ráfagas de ruido, desvanecimiento de la señal e interferencia; y con el fin de llegar a todos los usuarios, la selección del formato de modulación de RF es crítica [10].

1.1.4.4. Ventajas de televisión digital sobre analógica

La inminente transición a la transmisión digital en televisión, es derivada entre otras cosas por las ventajas que ésta presenta y que a continuación se enlistan [1]:

- 1) Mayor calidad de imagen y sonido. La calidad de imagen y sonido transmitidos es directamente proporcional a la velocidad de codificación binaria del flujo de información. Lo anterior da como resultado la transmisión de programas televisivos de alta definición (*High Definition* o *HD*).
- 2) Mayor número de emisiones televisivas. La codificación de datos digitales permite una compresión del espectro de cada transmisión y debido a que el ancho de banda se encuentra establecido, se puede enviar más de un canal comercial. Con ello, es posible que el emisor envíe diferente programación en el mismo ancho de banda.
- 3) Servicios adicionales. Resultado de los procesos anteriormente mencionados, se agregan servicios adicionales a la programación como imágenes panorámicas, sonido digital, subtítulos y selección de idiomas.

Todos los sistemas de comunicación tienen como propósito brindar al usuario final un servicio de calidad, en su caso la TV proporciona la reproducción de imagen y sonido. La televisión digital ha llegado para sustituir a la analógica, por la entrega de sus características con mayor calidad.

1.2. Fundamentos de antenas

La señal de televisión distribuida por los canales comerciales debe ser captada por los receptores de TV utilizando una antena. Una *antena* es aquel transductor encargado de convertir de forma eficiente ondas electromagnéticas guiadas a no guiadas y viceversa. El tamaño, forma y material determinan las características eléctricas como: la frecuencia de operación, ancho de banda, directividad, etcétera [11]. Estas características fijan las posibles aplicaciones en la que se pueden utilizar, o bien, desde el punto de vista del diseño, se pueden modificar con el objetivo de hacerla compatible con algún servicio determinado.

Existen diversos tipos de antenas, cada una con diferentes características respecto a la frecuencia en que operan, construcción y aplicación; estas particularidades son factores que se deben tomar en cuenta para su diseño. La antena es parte fundamental en un sistema de radiocomunicaciones como lo es la televisión, la telefonía celular, redes inalámbricas, enlaces

satelitales, entre otros. La antena como receptor, deberá ser diseñada para captar eficientemente las frecuencias con las que trabaja el sistema dentro de algún servicio en particular.

En una antena los parámetros más importantes son: diagrama de radiación, ganancia, directividad, eficiencia, impedancia y ancho de banda.

1.2.1. Antecedentes

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), es quien en 1859 sintetiza las teorías que describen el comportamiento la electricidad y el magnetismo, las cuales se conocen hoy en día como las ecuaciones de Maxwell. Éstas son basadas en la ley sobre la inducción descrita por Faraday, la ley del comportamiento del campo magnético introducida por Ampere y las leyes descritas por Gauss sobre el campo eléctrico y magnético.

Por su parte en el año de 1887, el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), realizó un experimento que tenía como objetivo demostrar la existencia de radiación electromagnética, construyendo el primer sistema de comunicación inalámbrico. Este sistema estaba compuesto por una antena transmisora y una antena receptora; la antena transmisora fue un dipolo al que le inducía un voltaje variable, mientras que el receptor fue hecho en forma de bucle (*loop*), con dos conductores idénticos. En 1901 el inventor Italiano Guillermo Marconi (1874-1937), usa el descubrimiento de Rudolf Hertz para la comunicación telegráfica, ocupando una antena monopolo de casi un cuarto de longitud de onda [11, 12] .

Posteriormente, en el periodo de la segunda guerra mundial se logra un desarrollo importante en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, científicos británicos y americanos, desarrollan antenas para radares de alta frecuencia, los cuales serían ocupados para la detección nocturna de los submarinos de guerra, generando avances que serían pioneros en el estudio del comportamiento y caracterización de las antenas.

1.2.2. Parámetros básicos

Para describir el comportamiento de una antena es necesario conocer sus parámetros básicos. Las definiciones de éstos son establecidas por el estándar IEEE Std 145-1983 [13].

1.2.2.1. Diagrama de radiación

También conocido como patrón de radiación, se define como la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de coordenadas espaciales, como se muestra en la figura 1.10. El patrón puede estar basado en una función que describa el campo eléctrico o el campo magnético, en este caso se le conoce como patrón de campo. Así mismo, puede estar basado en función de la densidad de potencia y se le llama patrón de potencia [14].

A menudo, el patrón de campo o de potencia es normalizado con respecto al máximo valor de radiación. Usualmente este patrón es trazado en una escala logarítmica o en dB, lo que es más deseable porque en dicha escala pueden acentuarse con más detalle en partes del patrón con valores muy altos y/o muy bajos [11].

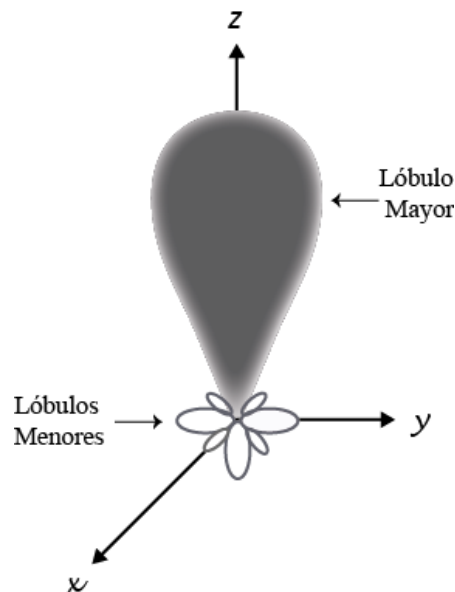


Figura 1.10. Diagrama de Radiación

1.2.2.2. Patrones principales

Otra forma de observar el comportamiento de la antena, es mediante los patrones principales establecidos como plano-E y plano-H. El plano-E se define como “el plano que contiene al vector campo eléctrico en la dirección de máxima radiación”; por su parte el plano-H, es el

descrito como “el plano que contiene al vector campo magnético en la dirección de máxima radiación” [14].

Otra nomenclatura ocupada los establece como plano de elevación (plano-E) y de azimut (plano-H) en función de la orientación de la tierra y ocupando coordenadas esféricas como se observa en la figura 1.11. De igual modo, el plano de *azimut* que es marcado como θ regularmente es constante en 90° y el plano de *elevación* marcado como ϕ se encuentra en la dirección del lóbulo principal.

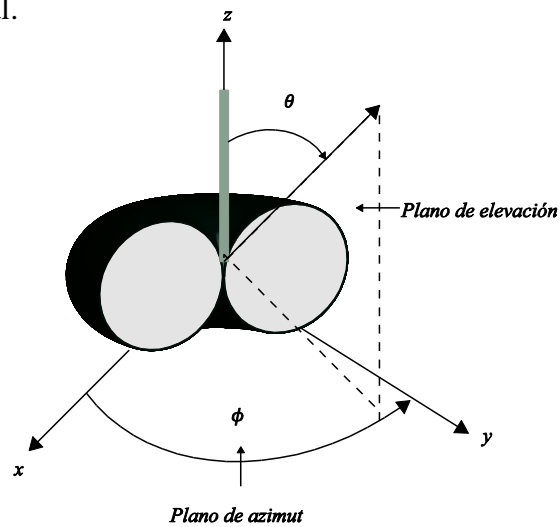


Figura 1.11. Patrones principales de una antena omnidireccional

Otra forma de observar los cortes en dos dimensiones en los que se obtienen los planos de radiación son los mostrados en la figura 1.12.

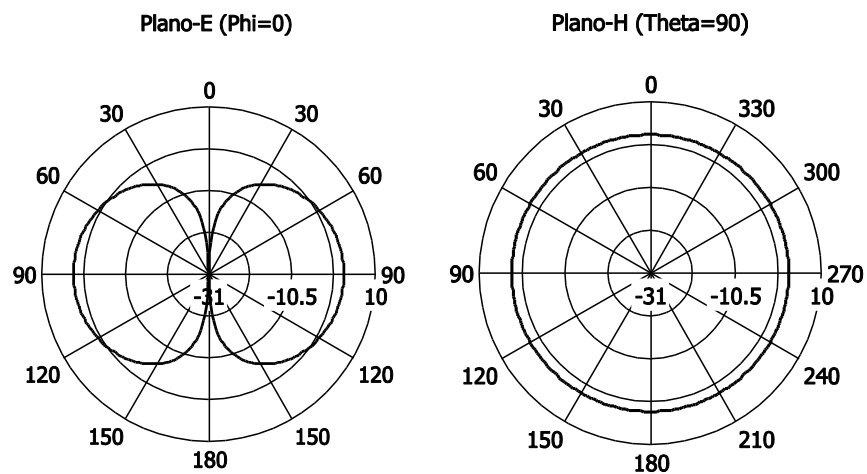


Figura 1.12. Cortes de plano-E y plano-H de una antena dipolo

1.2.2.3. Impedancia

Comúnmente las antenas son alimentadas por cable coaxial o algún tipo de línea de transmisión, lo cual implica que estos dos dispositivos necesitan trabajar de forma acoplada, permitiendo que la potencia que se transfiera de la línea de transmisión a la antena tenga poca reflexión.

La impedancia de la antena es la relación de voltaje a corriente que depende de las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos en las terminales de la misma [14], la impedancia puede ser descrita como:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_a \quad (1.1)$$

donde:

Z_{in} = Impedancia en las terminales de la antena.

R_{in} = Resistencia de la antena.

jX_a = Reactancia de la antena.

La reactancia de la antena X_a representa la potencia almacenada en el campo cercano de la antena, es decir, una onda se genera, se mantiene y que no es radiada. Por su lado, la parte real R_{in} está compuesta por dos elementos: resistencia de radiación (R_r) y resistencia de pérdidas (R_L). La potencia asociada con la R_r es la que se radia, mientras que la potencia que se disipa en R_L es la que se pierde en la propia antena en forma de calor, el circuito equivalente se muestra en la figura 1.13.

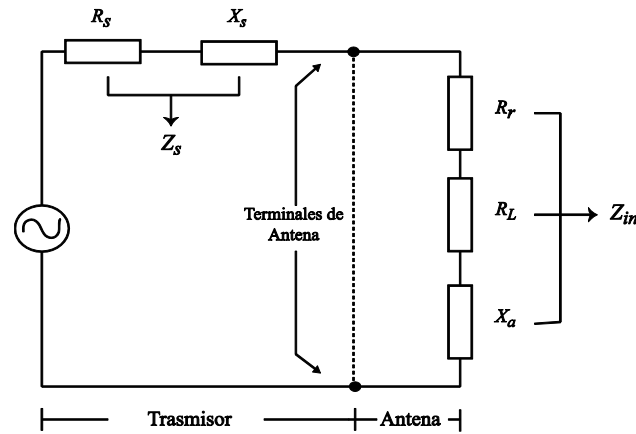


Figura 1.13. Circuito equivalente de una antena.

Para minimizar las pérdidas debe existir una máxima transferencia de potencia entre el transmisor y la antena. Para lograrlo, es necesario acoplar la impedancia del transmisor Z_s con la impedancia de entrada Z_{in} , con lo que existen mínimas ondas reflejadas.

La máxima transferencia de potencia se dará siempre y cuando la impedancia del transmisor sea igual al complejo conjugado de la impedancia de la antena, generando la siguiente condición de acoplamiento:

$$Z_{in} = Z_s^* \quad (1.2)$$

De no cumplir con esta condición, habrá potencia reflejada entre la antena y el transmisor, generando ondas estacionarias y pueden ser caracterizadas por la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR), definido como:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.3)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (1.4)$$

donde:

Γ = Coeficiente de Reflexión

V_r = Amplitud de la onda reflejada

V_i = Amplitud de la onda incidente

El $VSWR$ es una medida de desacoplamiento entre la impedancia del transmisor y de la antena. Por lo tanto, cuando no hay onda reflejada entonces $|\Gamma| = 0$, en caso contrario hay un acoplamiento perfecto y $VSWR = 1$.

1.2.2.4. Ancho de Banda

Un parámetro fundamental es el ancho de banda (BW), que es definido como la gama de frecuencias en el que se tiene un desempeño aceptable de la antena. En otras palabras, el BW es la banda de frecuencias en la que la antena acepta y trasfiere más del 90% de energía captada [14].

Para la denominación de antenas de banda ancha, el cálculo se da por la relación de la frecuencia superior entre la frecuencia inferior, en este concepto se ocupa la notación 10:1, que significa que la frecuencia superior es diez veces mayor que la frecuencia inferior [14].

$$BW = \frac{f_s}{f_i} \quad (1.5)$$

donde:

f_s = Frecuencia máxima.

f_i = Frecuencia mínima.

En cambio, en las antenas de banda estrecha el ancho de banda es descrito en porcentajes, por lo que al tener 10%, significa que la diferencia de frecuencia aceptable para la operación es de 10% de la frecuencia central al ancho de banda.

$$BW(\%) = \left[\frac{f_s - f_i}{f_c} \right] * 100 \quad (1.6)$$

donde f_c se describe como la frecuencia central.

1.2.2.5. Directividad

Es la relación de intensidad en una dirección dada respecto a la intensidad promedio en todas trayectorias. Si no está definida, esa orientación se tomará la dirección de máxima intensidad, por lo que una forma más sencilla de establecer a la directividad es: “Una medida de concentración de potencia radiada en una dirección en particular” [11].

Existen antenas direccionales y omnidireccionales. Las antenas omnidireccionales (figura 1.14(b)) se caracterizan por radiar hacia todos lados debido a que cubre 360° , por lo que radian o reciben señales de todas las direcciones posibles, este tipo de antenas regularmente son ocupadas para la transmisión de señales que serán detectadas por más de un receptor. Un ejemplo de este tipo de antena es el dipolo, las colineales, disco y monopolo.

Por su parte, las antenas direccionales son comúnmente ocupadas para enlaces punto a punto debido a que concentran su radiación hacia una dirección en concreto como se observa en la figura 1.14(a), éstas suelen colocarse de tal forma que no existan obstáculos entre el transmisor y el receptor para establecer la comunicación, por lo que son mayormente ocupadas en comunicaciones fijas.

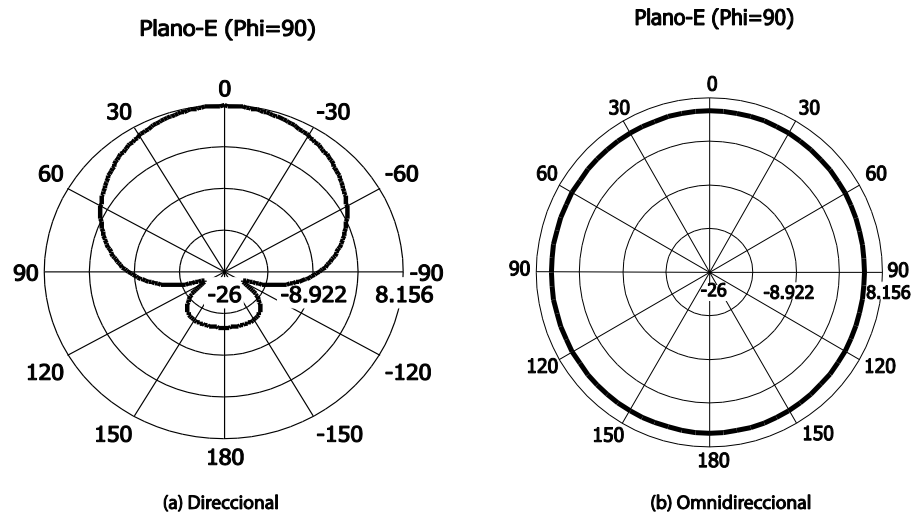


Figura 1.14. Plano de radiación de (a) antena direccional y (b) antena omnidireccional

1.2.2.6. Ganancia

La ganancia es un parámetro de la antena similar a la directividad, sin embargo esta última sólo toma en cuenta las propiedades direccionales de la antena por lo que depende del patrón de radiación. Por su parte la ganancia considera a la eficiencia y se describe como: la relación de la intensidad en una dirección dada respecto a la intensidad de radiación que se puede obtener si la potencia aceptada por la antena se radia de forma isotrópica [14].

Este parámetro suele definirse en dBi (referenciado a una antena isotrópica) o dBd (respecto a una antena dipolo) y su valor se muestra en la ecuación 1.7. La ganancia se relaciona con la directividad como se observa en la ecuación 1.8 [12].

$$G_{dB} = 10 \log_{10} G \quad (1.7)$$

$$G = eD \quad (1.8)$$

donde:

e = Eficiencia

D = Directividad.

G = Ganancia.

La eficiencia e es definida como la relación de potencia radiada por la antena entre la potencia que acepta, su valor se encuentra entre cero en el que la antena no es eficiente y uno en el que toda la potencia recibida es radiada. Regularmente es mostrada en dB, para obtener su magnitud escalar se sigue la ecuación 1.9.

$$|e| = 10^{\frac{e_{dB}}{10}} \quad (1.9)$$

1.2.3. Antenas activas

El concepto de “antena activa” se obtiene de la consideración de que existe un dispositivo activo que acompaña a la antena pasiva. La implementación de estos dispositivos permite amplificar, rectificar, o cambiar la energía de una forma a otra [15].

Los dispositivos activos comunes son: osciladores, amplificadores, mezcladores o multiplicadores y estos dispositivos a su vez entregan una señal amplificada o convertida a otras frecuencias. Por ello, un método de clasificación de estas antenas se realiza en función de los circuitos que lo acompañan, clasificándose en tres tipos: de oscilador, de amplificación y de conversión de frecuencia.

1.2.3.1. Antenas activas con amplificación

Un elemento activo conectado a la antena se observa en la figura 1.15 y se encarga de amplificar la señal, ya sea de un transmisor (a) o un receptor (b). Particularmente en las antenas activas con amplificación, el ruido juega un papel de suma importancia, si llega a introducirse una señal de ruido antes de la etapa activa, ésta señal será amplificada y se tendrán señales interferentes aún más difíciles de evitar.

En la figura 1.15(a) se puede observar un esquema de la configuración de un transmisor con amplificación, mientras que la configuración de la figura 1.15 (b) se ocupa para evitar el ruido en un receptor con un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) [15, 16]. Finalmente, todo amplificador debe tener una alimentación para poder funcionar [15].

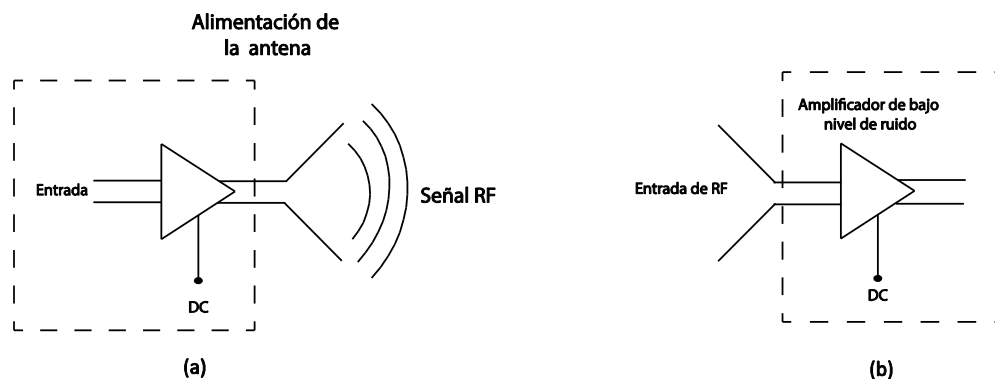


Figura 1.15. Configuración de antena activa con amplificación (a) para una antena transmisora y (b) para una antena receptora

Una antena activa receptora como la de la figura 1.15(b) puede utilizarse para televisión, siempre y cuando el intervalo de frecuencias operación de la antena sea compatible con el sistema.

En este capítulo se ha descrito la distribución de las señales televisivas, la asignación de frecuencias para televisión analógica y digital, así como los principios básicos de las antenas de radiofrecuencia. Con lo que se establece que la banda de frecuencias de TDT en el D.F. se encuentra en el intervalo de los 513.6 MHz a los 691.75 MHz que no es exactamente el mismo que el de televisión analógica. Como consecuencia, para realizar el diseño de una antena para dichos servicios, su banda de operación debe ser compatible con la asignada a TDT, considerarse factores como acoplamiento, ganancia y demás a los que se introdujo en este capítulo.

Capítulo 2.

ANTENAS PARA EQUIPOS TERMINALES DE TELEVISIÓN

~

Diversos diseños de antenas han sido utilizados para la televisión a lo largo de su historia, buscando siempre brindar al usuario la recepción adecuada de ondas electromagnéticas para la reproducción de imagen y sonido de alta calidad. Con la transición analógico-digital, las antenas receptoras pueden ser rediseñadas para operar de manera óptima en las frecuencias correspondientes a la TDT. Las antenas típicas para este servicio son estructuras estorbosas, costosas y su ancho de banda es compatible con el sistema analógico y digital. Por otra parte, son poco eficientes al instalarse en algunos puntos de la ciudad.

En este capítulo, se considera el desarrollo de antenas típicas para televisión analógica, por ejemplo, el dipolo de alambre, Yagi-Uda, entre otras. Tomando en cuenta el diseño clásico de cada estructura, las dimensiones de cada antena son calculadas de manera teórica. Estos diseños son comprobados y estudiados por simulación utilizando la herramienta CST Microwave Studio. Finalmente del análisis presentado se elige una de estas antenas para posteriormente optimizarla.

Los diseños presentados en este capítulo son iniciales y sin optimizar, se busca cubrir el espectro de frecuencias de los 513.60 MHz a los 691.75 MHz por lo que la frecuencia central es 602.67 MHz y la longitud de onda $\lambda = 497.79 \text{ mm}$

2.1. Dipolo de alambre

Ubicada dentro de la clasificación de antenas de alambre (*Wire-Type*), este dispositivo es de fácil construcción y tiene un costo relativamente bajo. El dipolo es de las estructuras ampliamente utilizadas, atribuyendo su primer uso al famoso experimento realizado por Hertz en 1887.

2.1.1. Estructura

La estructura básica del dipolo mostrada en la figura 2.1, está compuesta por 2 líneas conductoras de alambre, en circuito abierto. Los brazos del dipolo regularmente son de la misma longitud y con alimentación en el centro de ellos [11].

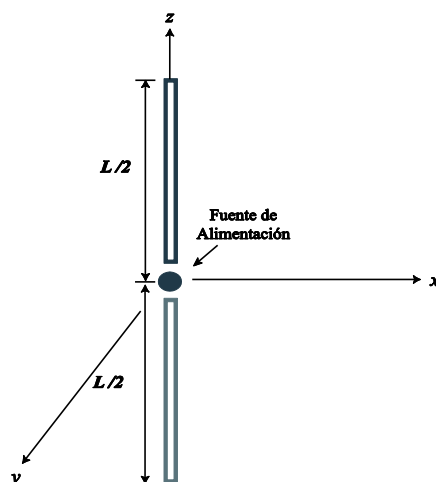


Figura 2.1. Estructura básica del dipolo






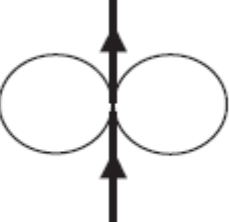
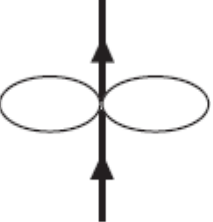
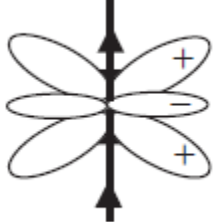
Al ser un radiador metálico, puede ser construido por diferentes materiales como alambre, tubos, placas, o líneas de microcinta conductoras [7]. Este tipo de radiadores tienen como característica elemental un patrón de radiación omnidireccional alrededor del largo de sus brazos.

Los parámetros importantes de la antena dependerán de la longitud del dipolo con respecto a la longitud de onda λ . Esta relación determina la distribución de corriente en la estructura (véase la tabla 2.1). El diseño del dipolo más utilizado es el que tiene una longitud igual a $\lambda/2$ por las siguientes razones:

- El patrón de radiación es omnidireccional, lo que puede ser indispensable o deseable en algunas aplicaciones. Por ejemplo, en sistemas receptores de televisión.
- La impedancia de entrada está establecida aproximadamente en los 73Ω , compatible y sin pérdidas considerables con una línea de impedancia característica de 75Ω o 50Ω ($VSWR < 2$), siendo ésta una importante ventaja de la antena dipolo.

Éste dispositivo requiere de una alimentación balanceada, que no puede obtenerse directamente de la conexión con cable coaxial, por lo que es necesario el uso de un *Balun* (*balanced to unbalanced*).

Tabla 2.1. Recopilación de algunas características del dipolo [11].

Dipolo de longitud $2l$	$\lambda/10$	$\lambda/2$	λ	1.5λ
Distribución de Corriente				
Diagrama de Radiación				
Directividad	1.5 o 1.76 dBi	1.64 o 2.15 dBi	2.4 o 3.8 dBi	Arriba de 2.3 dBi
Impedancia de entrada	pequeña (2Ω) jX : capacitiva	R : $\sim 73\Omega$ jX : $\sim 0\Omega$	R : alto jX : $\sim 0\Omega$	R : $\sim 100\Omega$ jX : $\sim 0\Omega$

2.1.2. Diseño

El dipolo, según las especificaciones antes mencionadas tendrá una longitud total definida por la ecuación 2.1, para la frecuencia central de TV digital.

$$L = \frac{\lambda}{2} \tag{2.1}$$

La longitud de onda λ se obtiene de la ecuación 2.2

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.2}$$

donde $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ y es la velocidad de la luz en el vacío; por lo tanto, la longitud total del dipolo es **248.89 mm**.

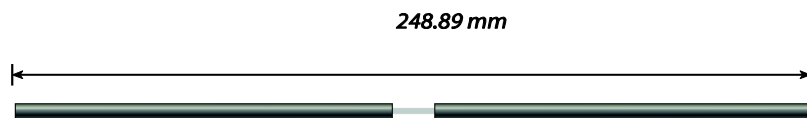


Figura 2.2. Estructura simulada de dipolo

Las antenas pueden caracterizarse como una red de dos puertos para analizar la respuesta general del sistema. Una forma de analizarla es con los parámetros de dispersión o parámetros “S” que pueden emplearse en cualquier frecuencia ya que no hacen consideraciones de circuito abierto o corto circuito y se basan en los niveles de potencia que se perciben en las terminales de la red.

S_{11} es el parámetro que mide la cantidad de potencia que se refleja en comparación con la potencia que se aplica en el puerto 1 y también se le conoce como coeficiente de reflexión (Γ), con la siguiente consideración:

$$\Gamma_{dB} \rightarrow 0 \quad \text{Máxima reflexión}$$

$$\Gamma_{dB} \rightarrow -\infty \quad \text{Máximo acoplamiento.}$$

Considerando lo anterior, se muestra en la figura 2.3 el parámetro S_{11} de la antena dipolo, en la que se observa que en las frecuencias de 530.2 MHz a 614.3 MHz, el valor del parámetro S_{11} se encuentra por debajo de los -10 dB, lo que garantiza que en dicho intervalo de frecuencias, las reflexiones serán mínimas.

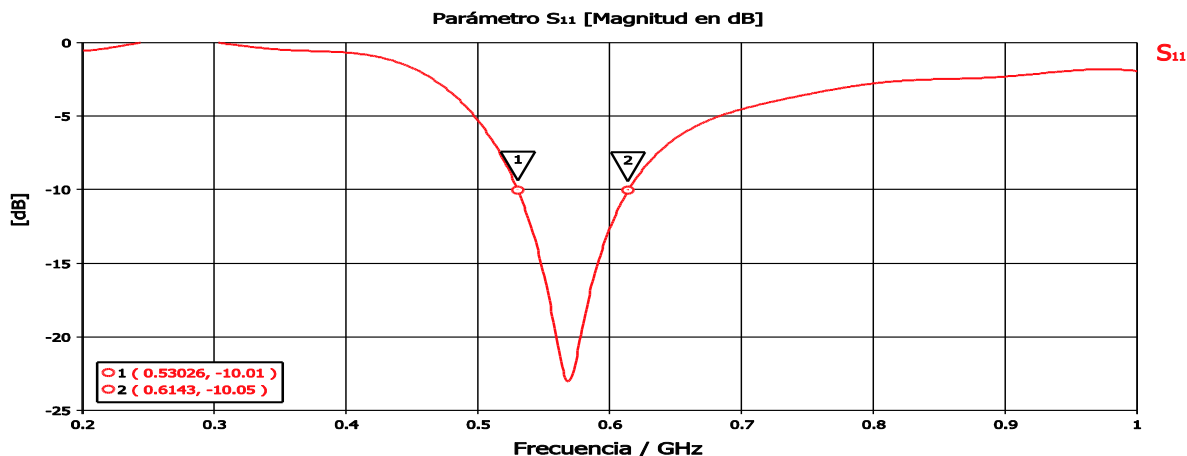


Figura 2.3. Parámetro S_{11} de la antena dipolo

El patrón de radiación en tres dimensiones se ilustra en la figura 2.4, en la que se observa que la máxima ganancia alcanzada por el dipolo es de 2.29 dBi y una eficiencia total de -0.2903 dB o en magnitud escalar (véase la ecuación 1.8) es de 0.94, muy cercano a 1 que es el máximo valor de eficiencia de una antena. Su plano de elevación y de azimut, son mostrados en la figura 2.4, expresan que la radiación del dispositivo es omnidireccional en el plano.

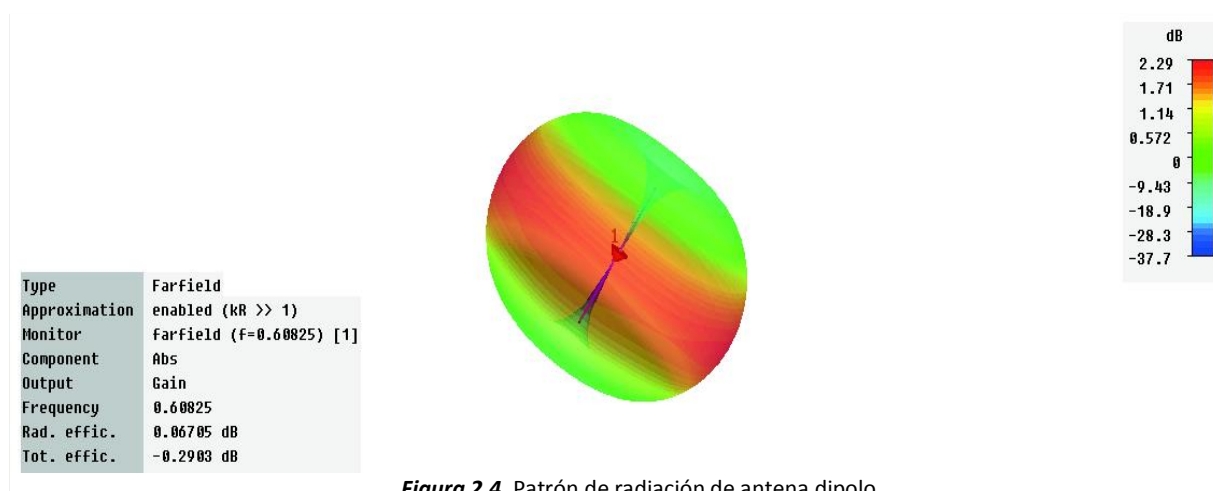


Figura 2.4. Patrón de radiación de antena dipolo

El dipolo de alambre cuenta con un diagrama de radiación omnidireccional y eficiencia de 0.94 en el caso de la simulación, no obstante, el ancho de banda es angosto y no podrá cubrir todo el espectro designado a TDT por lo que no se considera como propuesta para optimizarlo.

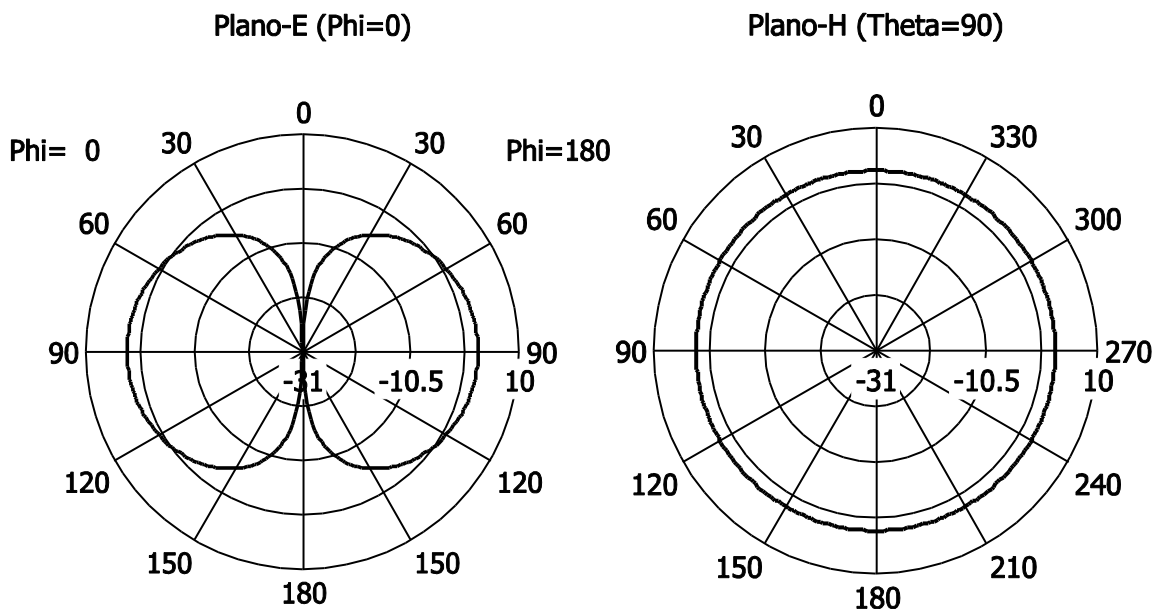


Figura 2.5. Planos de Radiación de antena dipolo

2.2. Antena Yagi-Uda

Inventada en el año de 1920, esta antena adopta su nombre gracias a los dos profesores japoneses S. Uda y H. Yagi, quienes trabajaron con la estructura. Los primeros resultados fueron presentados en el año de 1926.

Siendo una antena muy popular, es ampliamente usada en los sistemas televisivos debido a que opera en las bandas UHF y VHF, caracterizándose por su bajo costo, simplicidad y alta ganancia [11].

2.2.1. Estructura

La estructura básica de la antena Yagi-Uda se compone de tres partes principales: elemento radiador, reflector y directores. La representación de esta antena se ilustra en la figura 2.6.

a) *Elemento Radiador*: También se le llama “elemento activo” debido a que es el elemento en el cual se inyecta o se extrae la señal en la antena y es un dipolo con una longitud de alrededor de 0.47λ y una impedancia en la línea de alimentación de 50Ω [11].

b) *Reflector*: Está ubicado en la parte trasera del radiador, posee una longitud ligeramente mayor al dipolo. El reflector es ocupado para impulsar o forzar la energía radiada a la parte

frontal de la antena; la mejor distancia entre el reflector y el radiador se encuentra entre 0.15λ y 0.25λ .

c) *Directores*: Tienen la función de guiar la energía radiada al frente de la antena debido a que se genera una reactancia capacitiva. La distancia ideal entre cada director es de 0.25λ a 0.35λ . El número de directores determina la ganancia y la directividad de la antena.

En resumen, el dipolo se encargará de radiar en todas direcciones, es decir omnidireccionalmente, dicha radiación se verá bloqueada por el elemento reflector y en contra parte, los directores realizarán el encaminamiento de la energía para producir un patrón de radiación direccional. El NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos) ha producido resultados para facilitar el diseño de esta antena, estos valores se muestran en la tabla 2.2.

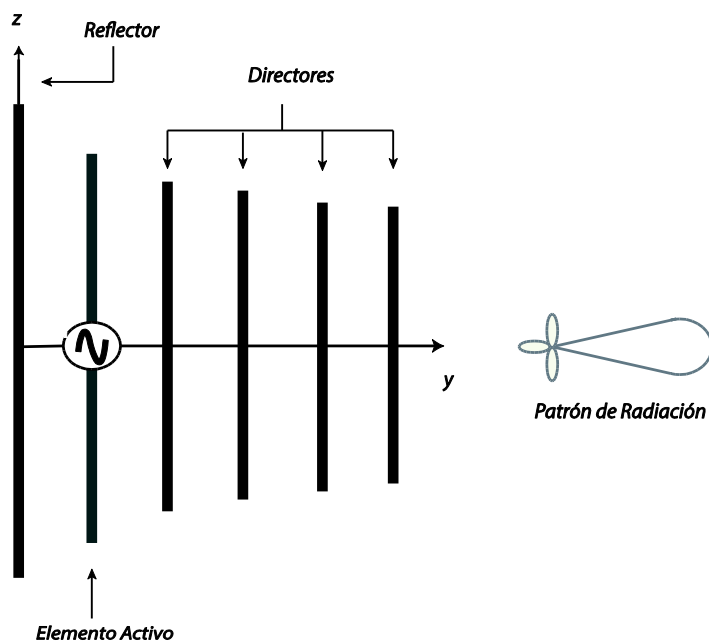


Figura 2.6. Estructura básica de antena Yagi-Uda

Tabla 2.2. Elementos óptimos para antena Yagi-Uda

Longitud de resonancia	0.4	0.8	1.2	2.2	4.2	Nota
L_1/λ	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	Reflector
L_2/λ	$\lambda/2$ dipolo doblado ~ 0.47					Elemento Radiador
L_3/λ	0.442	0.428	0.428	0.432	0.424	Director
L_4/λ		0.423	0.420	0.415	0.424	
L_5/λ		0.428	0.420	0.407	0.420	
L_6/λ			0.428	0.398	0.407	
L_7/λ				0.390	0.403	
Espacio/ λ	0.20	0.20	0.25	0.20	0.308	Espacio entre Directores
D en dBd	7.1	9.2	10.2	12.25	14.2	Medido
D en dBi	9.2	11.3	12.3	14.35	16.3	Medido
Separación recomendada entre brazos del dipolo $g(t) = 0.025\lambda$						

El diseño de la antena con base en la tabla 2.2 considera un diámetro de 0.0085λ . Por otro lado, el incremento del número de elementos directores dará como resultado una mayor directividad, esta relación se puede aproximar por la siguiente ecuación [11].

$$D = 3.28N \tag{2.3}$$

donde $N =$ Número de elementos totales de la antena.

2.2.2. Diseño

Para observar el comportamiento de esta antena con un valor de $N = 5$ y directividad máxima estimada de 9.92 dBi, se calcula la longitud de cada elemento involucrado a una frecuencia central de 602.67 MHz (Frecuencia central de los servicios de televisión digital en el Distrito Federal). Basado en la tabla 2.2, se encuentra la tabla 2.3, en la que se enlistan las longitudes de los elementos de la antena.

$$\lambda = 497.79 \text{ mm}$$

Tabla 2.3. Longitud de los elementos de antena Yagi-Uda de 3 elementos.

Reflector	$L_1 = 0.4882(497.79) = 243 \text{ mm}$
Elemento Radiador	$L_2 = 0.47(497.79) = 234 \text{ mm}$
Director 1	$L_3 = 0.428(497.79) = 213 \text{ mm}$
Director 2	$L_4 = 0.423(497.79) = 210.5 \text{ mm}$
Director 3	$L_5 = 0.428(497.79) = 213 \text{ mm}$
Separación entre bazos del dipolo	$g = 0.025(497.79) = 123 \text{ mm}$
Separación entre elementos	$S = 0.025(497.79) = 99.5 \text{ mm}$
Diámetro de los elementos	2 mm

La estructura final de la antena Yagi-Uda, es mostrada en la figura 2.7. El punto de alimentación debe posicionarse en el centro de los brazos del dipolo y todos los elementos de la antena están separados por la misma distancia, en consecuencia se tendrá el acoplamiento de la figura 2.8. Como se observa, el ancho de banda que se encuentra por debajo de -10 dB va de los 625 MHz a los 628 MHz aproximadamente, siendo un intervalo de frecuencias muy angosto.

Por el acomodo de los componentes y el número de directores agregados a la antena, el patrón de radiación es direccional como se observa en la figura 2.9, se tiene ganancia máxima de 19.9 dBi y eficiencia de -3.347 dB o 0.462 en magnitud escalar. Sin embargo, para el espectro de

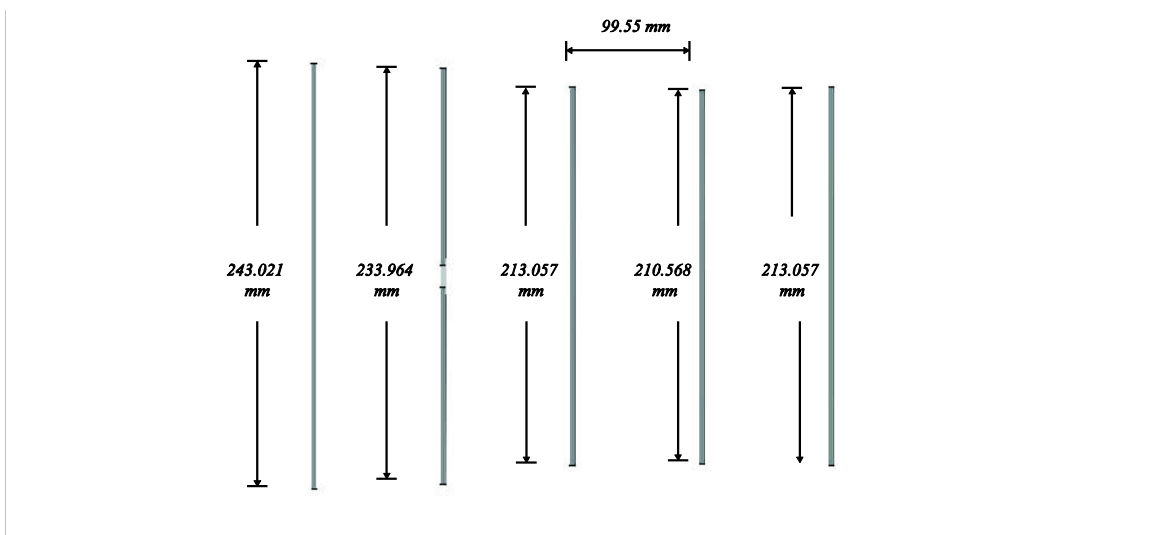


Figura 2.7. Estructura final de la antena Yagi-Uda diseñada

frecuencias asignado a TDT, la estructura poco eficiente, los planos de radiación de la figura 2.10, muestran un patrón direccional y con ganancia de 10.9 dB.

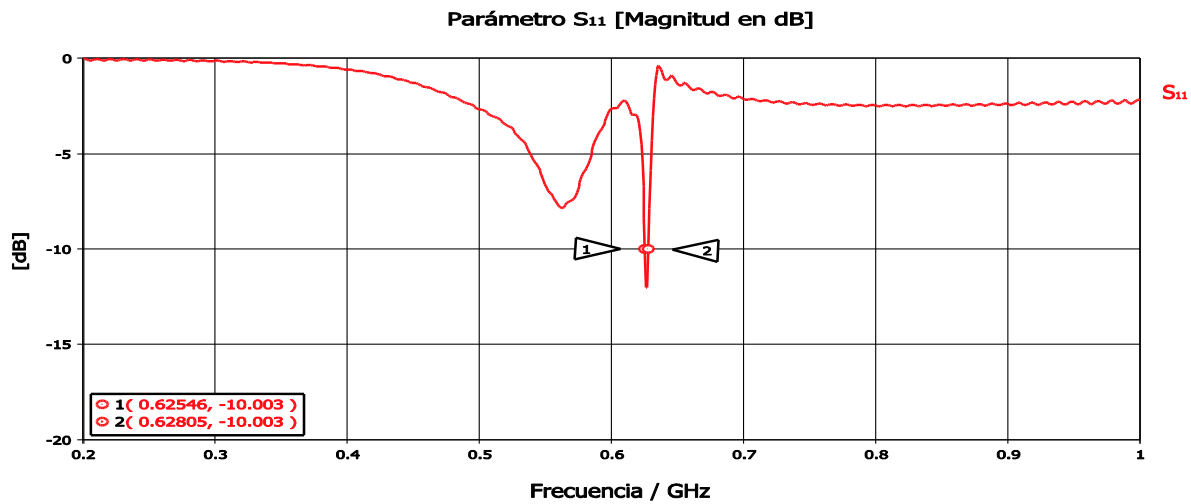


Figura 2.8. Acoplamiento de antena Yagi-Uda



Figura 2.9. Patrón de radiación en tres dimensiones

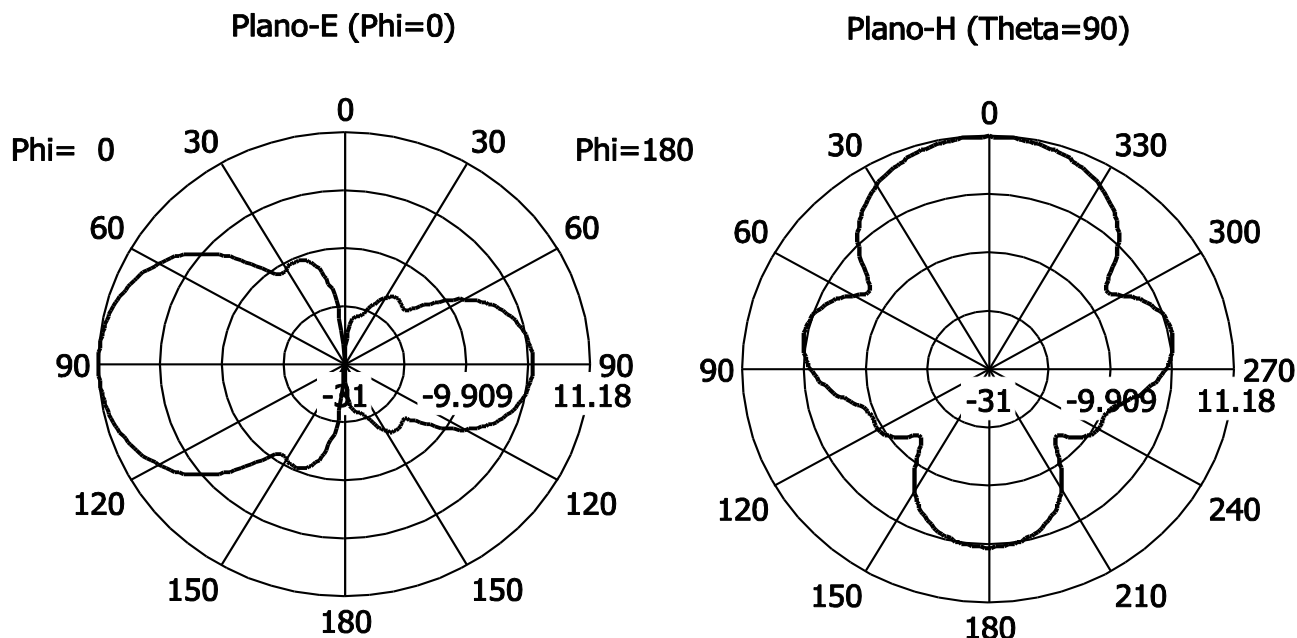


Figura 2.10. Planos de Radiación de antena Yagi-Uda

No obstante, de acuerdo al parámetro S_{11} el acoplamiento se encuentra en una banda muy angosta con una ganancia 10.9 dBi. El espectro de frecuencias cubierto es angosto, optimizarlo genera un cambio en los elementos físicos de la misma.

La construcción física del dispositivo requiere brindar garantía de no alterar la distribución de los elementos de la antena, dicho soporte no debe contener material conductor para no alterar el desempeño del dispositivo y debe ser colocado en la parte externa y en el mejor de los casos en la más alta de la casa o edificio, derivado de la direccionalidad con la que cuenta. Finalmente, factores climáticos como viento, lluvia, entre otros, alteran el acomodo de los componentes y con ello el comportamiento del radiador.

2.3. Antena logarítmica

La antena logarítmica tiene una estructura similar a la antena Yagi-Uda. Es denominada así porque la impedancia de entrada es una función periódica del logaritmo de la frecuencia de operación [11]. Esta antena es ampliamente utilizada para las bandas VHF y UHF, el esquema básico de su estructura se muestra en la figura 2.11.

Existen dos diferencias marcadas entre la antena logarítmica y la Yagi-Uda: su alimentación y su ancho de banda. La antena logarítmica cuenta con un intervalo de frecuencias mucho mayor y cada elemento de la antena debe alimentado de la misma forma que el “elemento activo” de la Yagi-Uda como se observa en la figura 2.11 [11, 14].

2.3.1. Estructura

Compuesta de varios dipolos de distintas longitudes, la antena logarítmica es dividida en dos regiones, la denominada región activa y la contraria región inactiva, en estas áreas el comportamiento de los dipolos estarán completamente relacionadas con la frecuencia de operación.

En el caso de que el dipolo tenga una longitud L aproximada de $\lambda/2$, se posiciona en la región activa. Por otro lado, si la longitud L de los dipolos se encuentra por debajo de $\lambda/2$, está en la región inactiva y los dipolos actúan como directores. Finalmente, aquellos dipolos que poseen una distancia mayor a $\lambda/2$, se comportan como reflectores en la región inactiva.

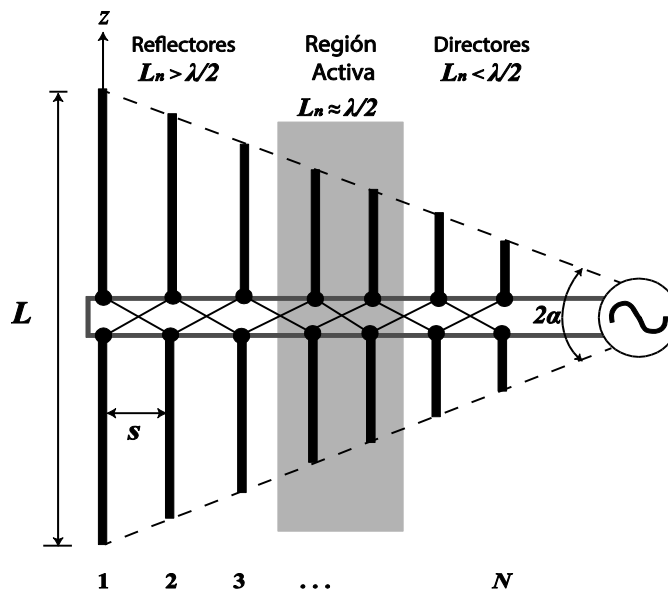


Figura 2.11. Estructura básica de antena Logarítmica [11].

2.3.2. Diseño

La estructura logarítmica tiene la cualidad de acoplarse a diferentes frecuencias por debajo de los -10 dB, por lo que los acoplamientos producen un mayor ancho de banda. Por otra parte,

el diseño depende también de la directividad que se desee alcanzar, con lo que se pueden optimizar algunos factores como los mostrados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Datos para diseño óptimo de antenas logarítmicas

<i>Directividad (dBi)</i>	<i>Factor de Escala τ</i>	<i>Factor de Espacio σ</i>	<i>Ángulo de Separación α</i>
7	0.782	0.138	21.55°
7.5	0.824	0.146	16.77°
8	0.865	0.157	12.13°
8.5	0.892	0.165	9.29°
9	0.918	0.169	6.91°
9.5	0.935	0.174	5.33°
10	0.943	0.179	4.55°
10.5	0.957	0.182	3.38°
11	0.964	0.185	2.79°

El total de dipolos a ocupar depende de la ecuación 2.4 y está directamente relacionada con la frecuencia máxima y mínima con la que se desea trabajar.

$$N = \frac{\log\left(\frac{f_{min}}{f_{max}}\right)}{\log(\tau) + 1} \quad (2.4)$$

Donde f_{min} = frecuencia mínima del ancho de banda.

f_{max} = Frecuencia máxima del ancho de banda.

La longitud de cada dipolo se determina de la siguiente forma [11]:

$$L_1 = \frac{c}{f_{min}} \quad (2.5)$$

Las siguientes longitudes serán calculadas como:

$$L_n = \tau L_{n-1} \quad (2.6)$$

El espacio entre cada dipolo es:

$$S_n = 2L_n\sigma \tag{2.7}$$

Finalmente la ranura entre los dos polos de los radiadores, dependerá del diámetro de cada uno y de la impedancia característica, como se muestra a continuación:

$$g = d \cosh\left(\frac{Z_o}{120}\right) \tag{2.8}$$

Si se elaboran los cálculos para una frecuencia mínima de 513.60 MHz y frecuencia máxima de 691.75 MHz, de la ecuación 2.4 se obtiene que el número de elementos que componen la estructura es $N \approx 4$. Con lo que se obtiene la longitud de cada dipolo y la distancia entre los elementos descritos en la tabla dichos valores se muestran a continuación:

Tabla 2.5. Distancia y longitud de antena logarítmica caracterizada

Longitud de los elementos	Distancia entre los elementos
$L_1 = 292.05 \text{ mm}$	$S_1 = 91.70 \text{ mm}$
$L_2 = 252.62 \text{ mm}$	$S_2 = 79.32 \text{ mm}$
$L_3 = 218.52 \text{ mm}$	$S_3 = 68.61 \text{ mm}$
$L_4 = 189.02 \text{ mm}$	

De acuerdo con los resultados de simulación, se obtiene la estructura mostrada en la figura 2.12, el parámetro S_{11} expone el acoplamiento como el mostrado en la figura 2.13, contando con un patrón de radiación direccional ilustrado en la figura 2.14, con ganancia en la dirección de máxima propagación de 7.45 dBi y eficiencia total de -3.347 dB o 0.463 en magnitud escalar y los planos de radiación en la figura 2.15. Al igual que la antena Yagi-Uda, este modelo requiere de un soporte mecánico que ofrezca soporte en la recepción de señales de TDT.

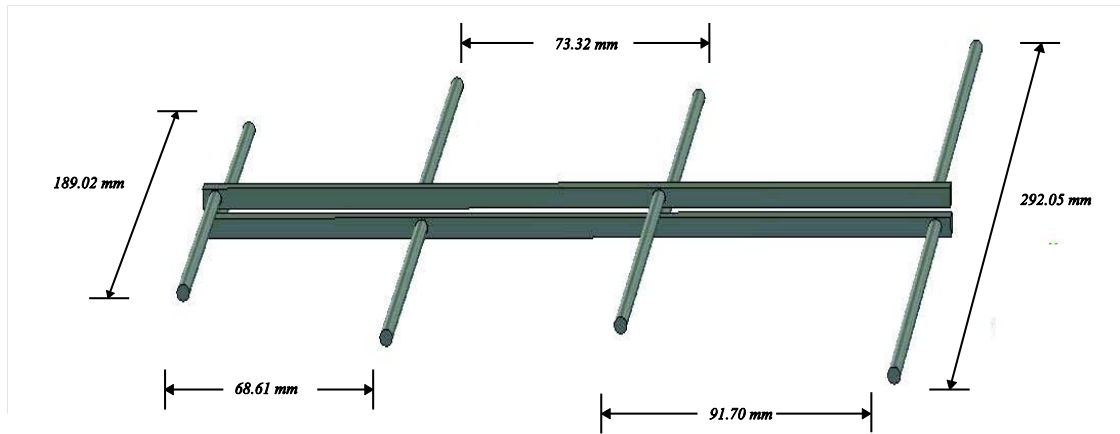


Figura 2.12. Estructura simulada de antena logarítmica

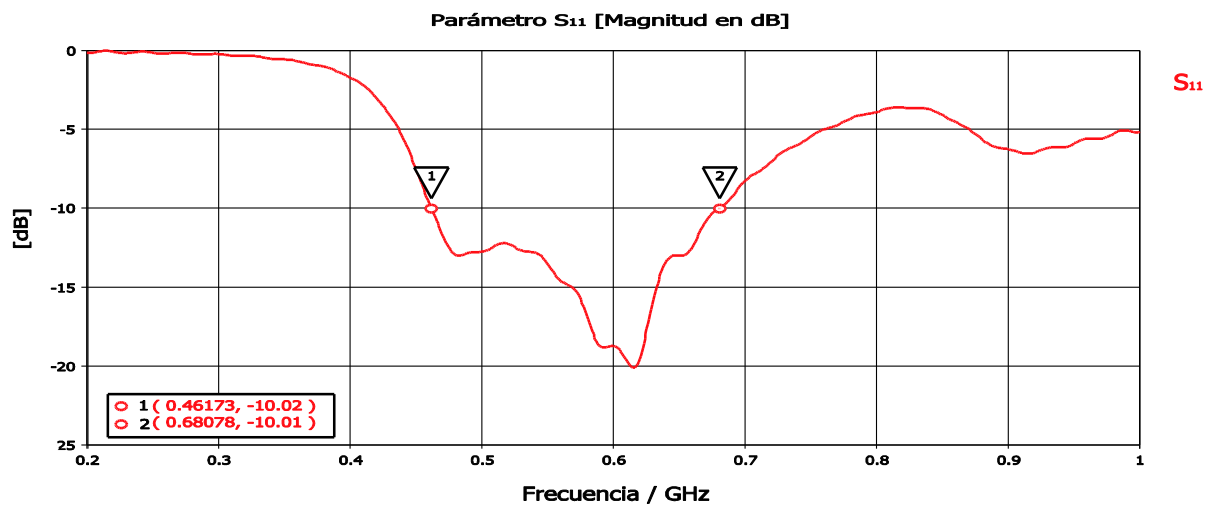


Figura 2.13. Acoplamiento de antena logarítmica

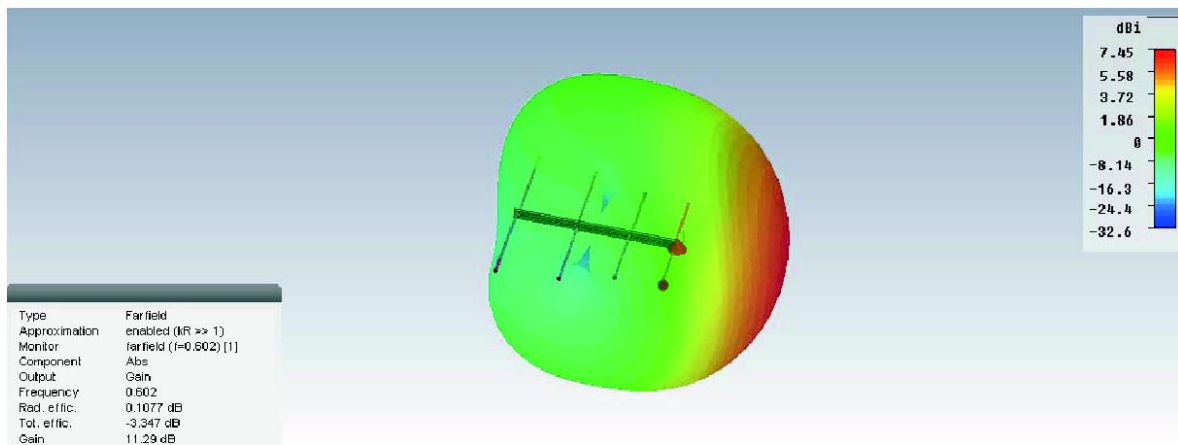


Figura 2.14. Patrón de radiación en tres dimensiones

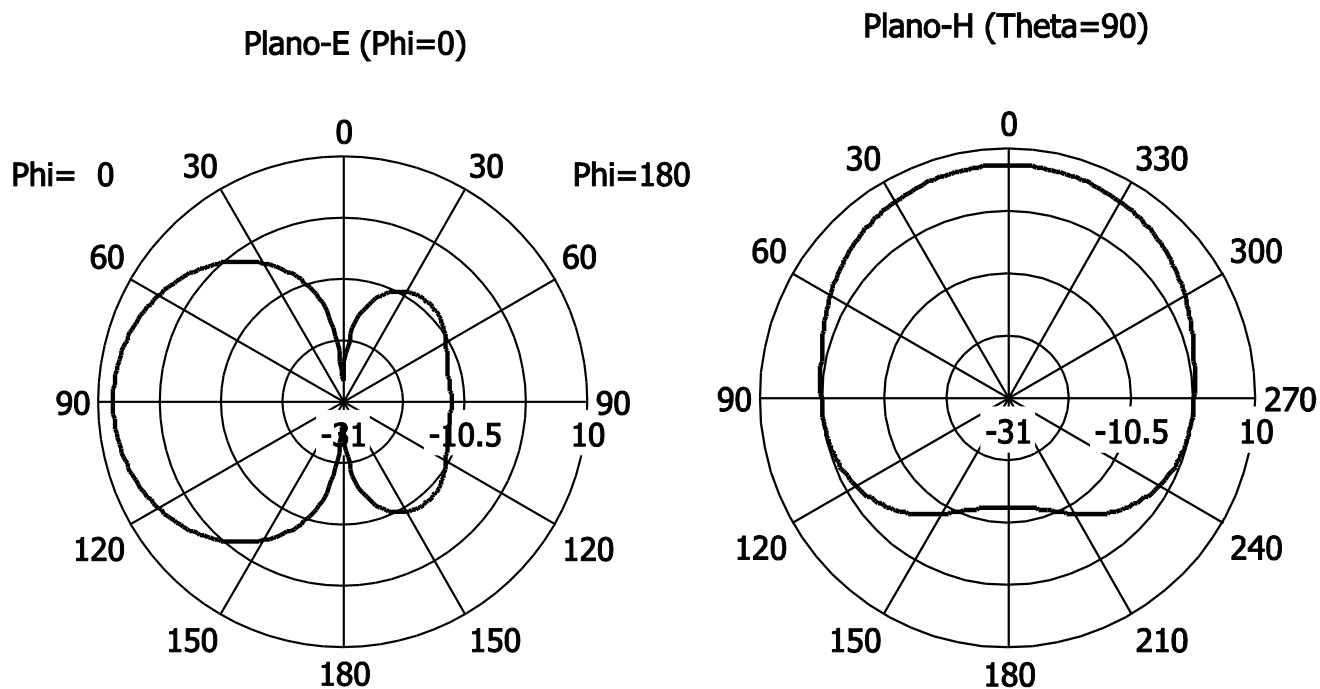


Figura 2.15. Planos de Radiación de Antena Logarítmica

2.4. Dipolo impreso con balun integrado

La antena fue patentada en 1989 por Brian J. Edward y Daniel F. Rees [17], las primeras pruebas del dispositivo fueron con frecuencias superiores a 1 GHz, es impresa sobre un sustrato y por su pequeña estructura su uso es común en las comunicaciones móviles [18, 19].

2.4.1. Estructura

La antena es fabricada sobre un sustrato dieléctrico con permitividad relativa ϵ_r , formándose por dos metalizaciones, en cada lado del mismo. El diseño se divide en tres partes importantes: alimentación, el balun y radiador como puede verse en la figura 2.16.

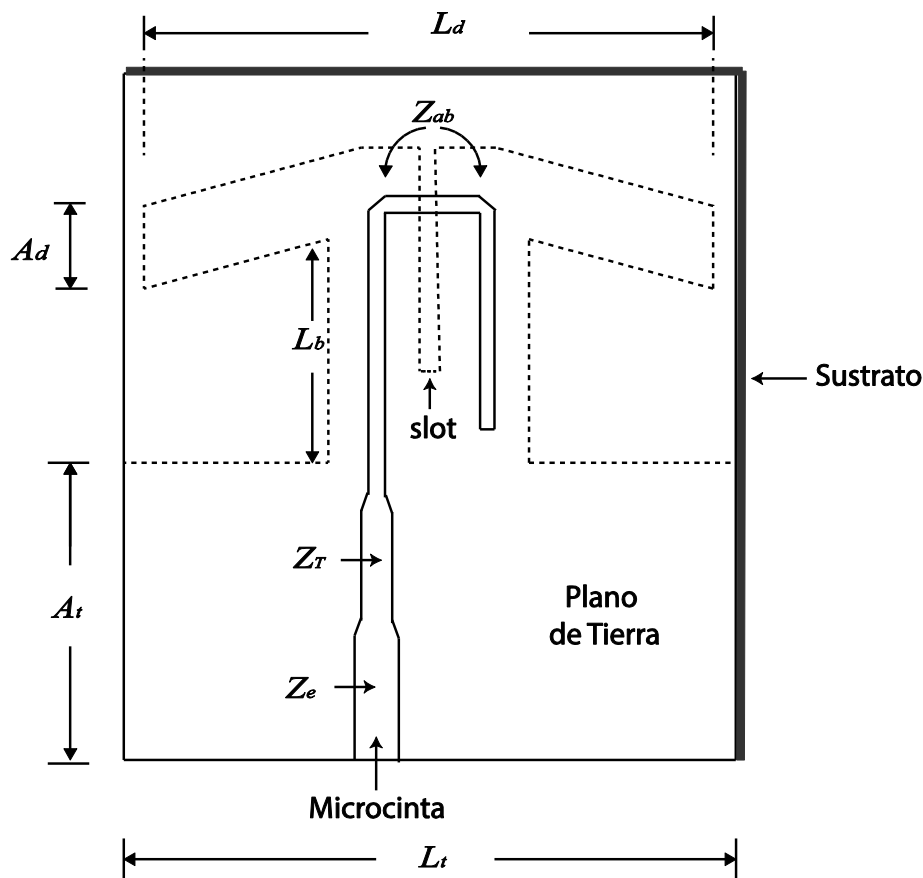


Figura 2.16. Esquema básico del Dipolo Impreso con Balun Integrado

La alimentación se realiza mediante una microcinta con impedancia Z_b , que es una línea de transmisión no-balanceada y es fabricada en la parte superior del sustrato. Este elemento, debe poseer un plano de tierra en el extremo inferior del material, con ancho mínimo de tres veces el grosor de la microcinta [18].

A continuación, se encuentra un transformador de un cuarto de longitud de onda y finalmente la alimentación balanceada del radiador; la parte inferior posee impedancia característica de $Z_e = 50 \Omega$, el transformador con valor aproximado de $Z_T = 63 \Omega$ y la microcinta balanceada con impedancia de $Z_b = 80 \Omega$, valor en el cual el dipolo resuena. Las tres microcintas forman una configuración en forma de "J" invertida posicionada sobre el plano de tierra y el radiador, su longitud eléctrica dará como resultado una doble banda acoplada.

El plano de tierra, ubicado en la parte inferior del sustrato, como se muestra en la figura 2.16 tiene un ancho de 10 veces el de la microcinta y continúa con una bifurcación marcada por un espaciamiento (*slot*) para formar el plano de tierra bifurcado para coexistir con la alimentación y es de mínimo de la tierra es de 3 veces el ancho de la microcinta.

El radiador es formado por patrones de la metalización en la parte inferior del sustrato, con forma de brazos de un dipolo impreso con un dobléz en los brazos, como continuación de la tierra bifurcada con un ancho de 0.05λ y una longitud aproximada de 0.4λ [17, 18]. Los brazos se ubican bajo la J invertida, por lo que, los puntos en que dobla la microcinta alimentan por el centro al dipolo.

2.4.2. Diseño

En base en los parámetros descritos anteriormente se tienen las longitudes de la tabla 2.6, se simula la estructura mostrada en la figura 2.17 en el software CST Microwave Studio. El parámetro S_{11} expone el acoplamiento en la figura 2.18, en el que se observan dos intervalos de frecuencia con valor de -10 dB.

Tabla 2.6. Parámetros de antena impresa con balun integrado

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
L_t	138.5 mm
L_d	199 mm
A_d	25 mm
A_t	79 mm
L_b	59.5 mm
<i>slot</i>	2 mm

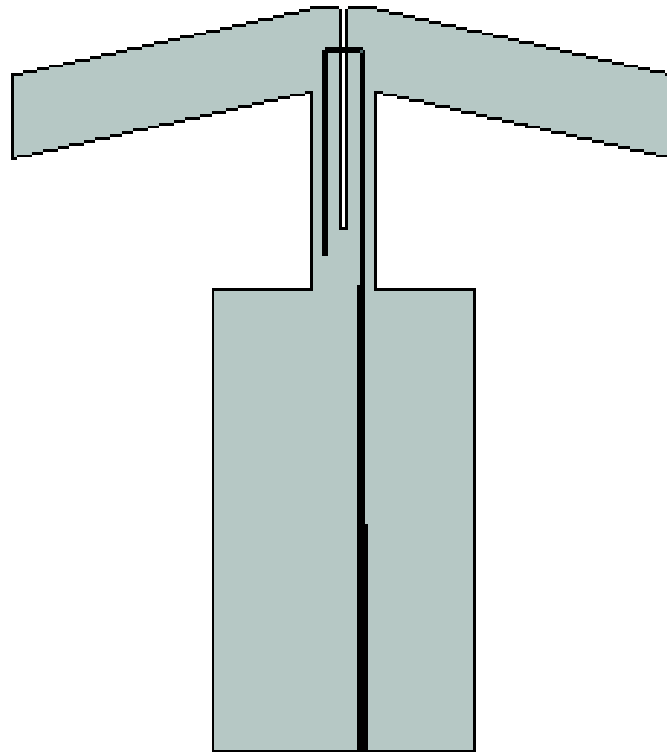


Figura 2.17. Estructura simulada de dipolo impreso con balun integrado

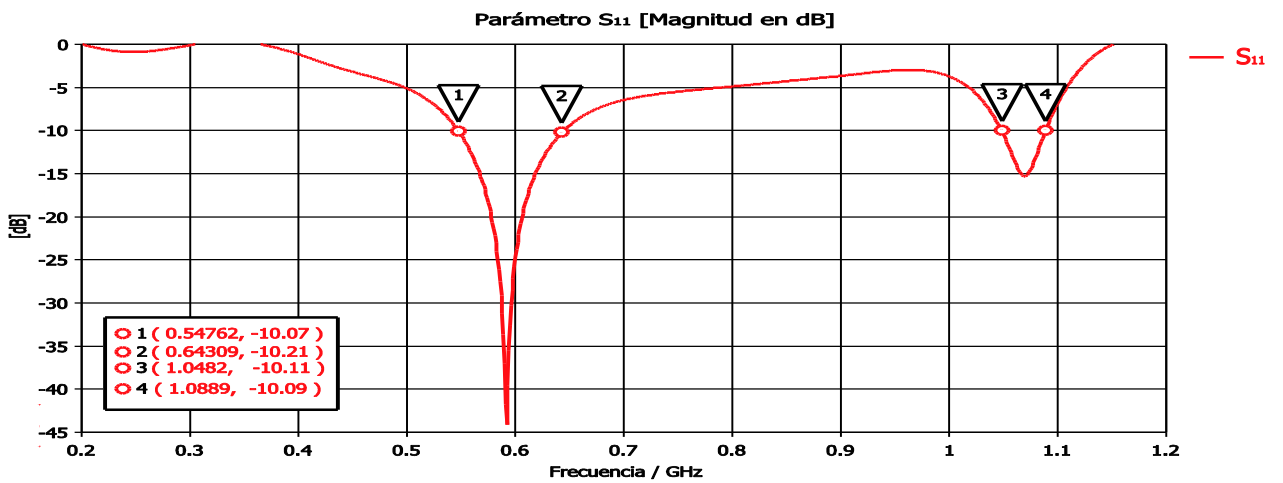


Figura 2.18. Acoplamiento de dipolo impreso con balun integrado

Modificar los parámetros puede dar mayor acoplamiento en la parte central de las dos bandas mencionadas; pero alterar algún parámetro del radiador, el balun o la alimentación, forzará a la variación de los demás. El patrón de radiación de ganancia realizada se muestra en la figura 2.19.

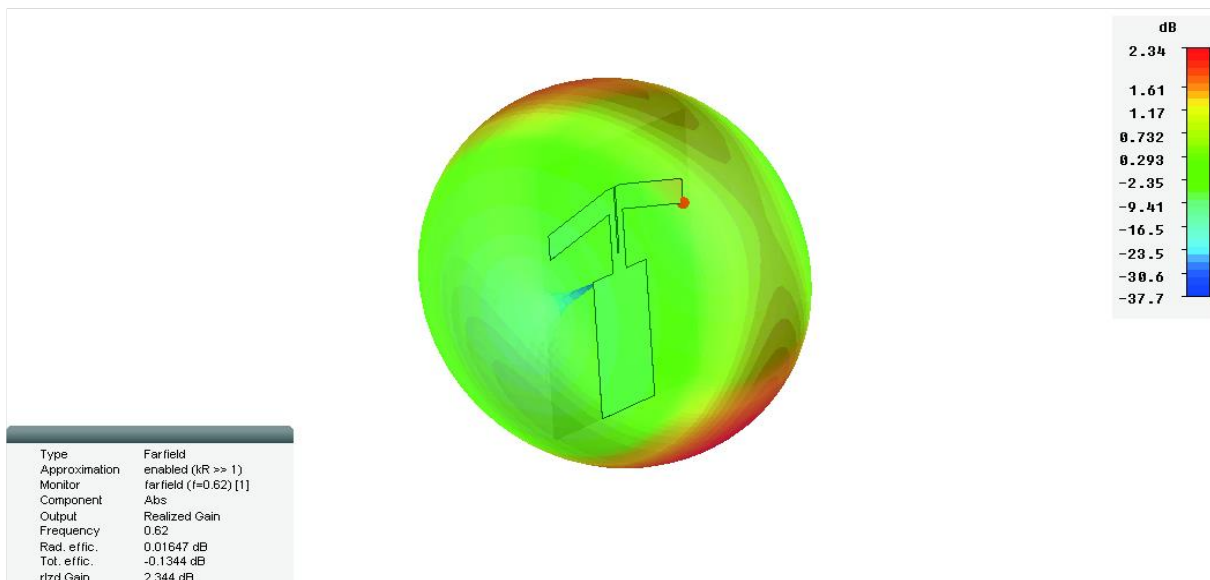


Figura 2.19. Patrón de radiación en tres dimensiones

Los cortes del patrón de radiación correspondientes al plano-E y plano-H se muestran en la figura 2.20, observando que el patrón de radiación del dispositivo es omnidireccional.

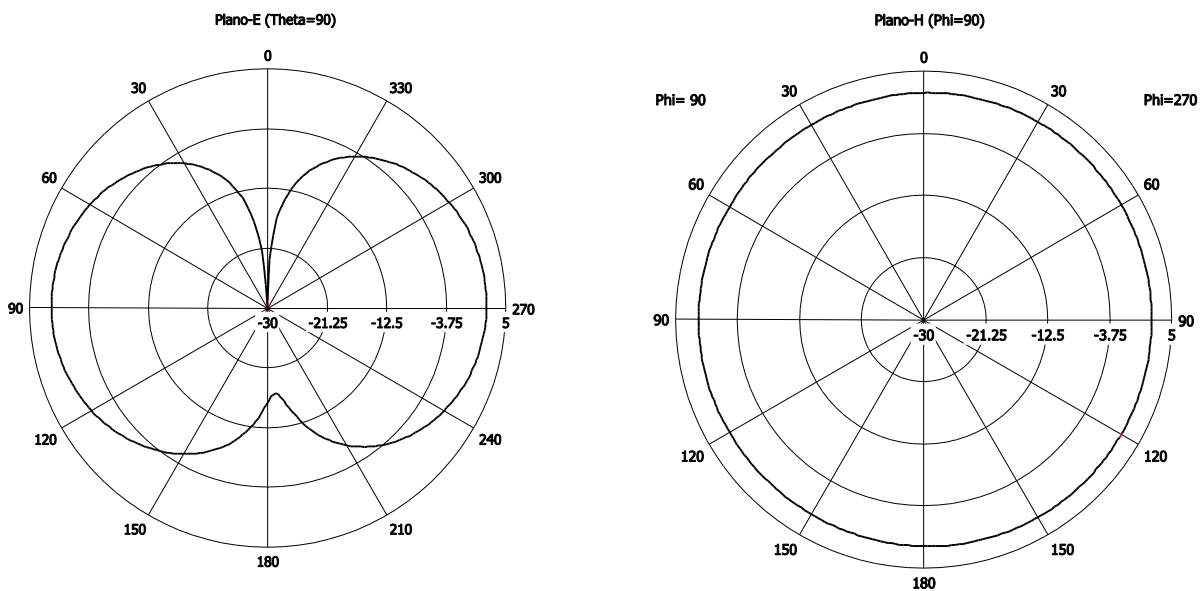


Figura 2.20. Patrones principales de radiación de dipolo impreso con balun integrado

Las dimensiones de la antena podrán ser modificadas para adecuar su acoplamiento a la banda donde opera TDT, limitando el ancho de banda únicamente a los canales que cuentan con este servicio.

La colocación del plano de tierra y el dobléz que presentan los brazos, puede dar mayor direccionalidad a la antena. Por ejemplo, con el dobléz de los brazos de 20 mm y el plano de tierra extendido hasta el punto final de la longitud del radiador, se tiene la estructura mostrada en la figura 2.21. El patrón de radiación en tres dimensiones (figura 2.22) y los planos de radiación dejan ver que la antena tiene mayor direccionalidad, en consecuencia, mayor ganancia.

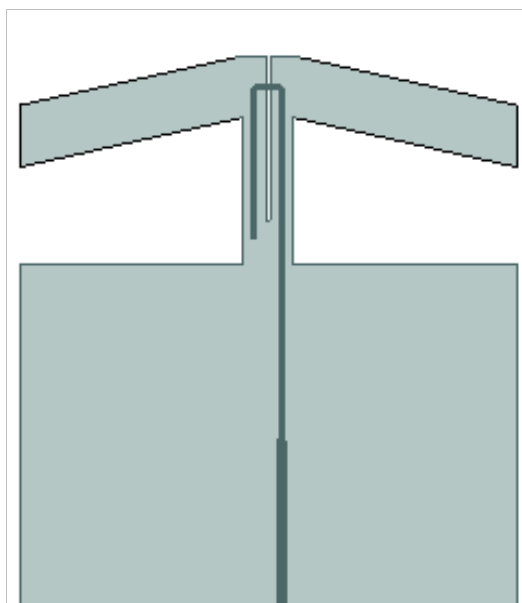


Figura 2.21. Extensión de plano de tierra

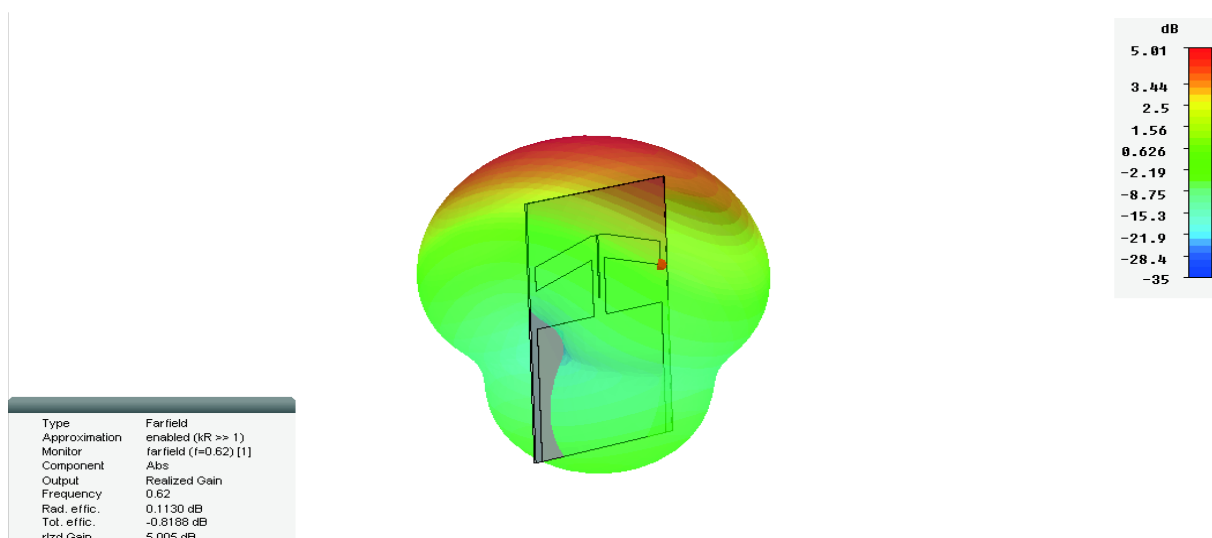


Figura 2.22. Patrón de radiación con ampliación de plano de tierra

Observando el cambio claro en los planos principales de radiación por la extensión del plano de tierra, afectando también el acoplamiento y queda de la siguiente forma:

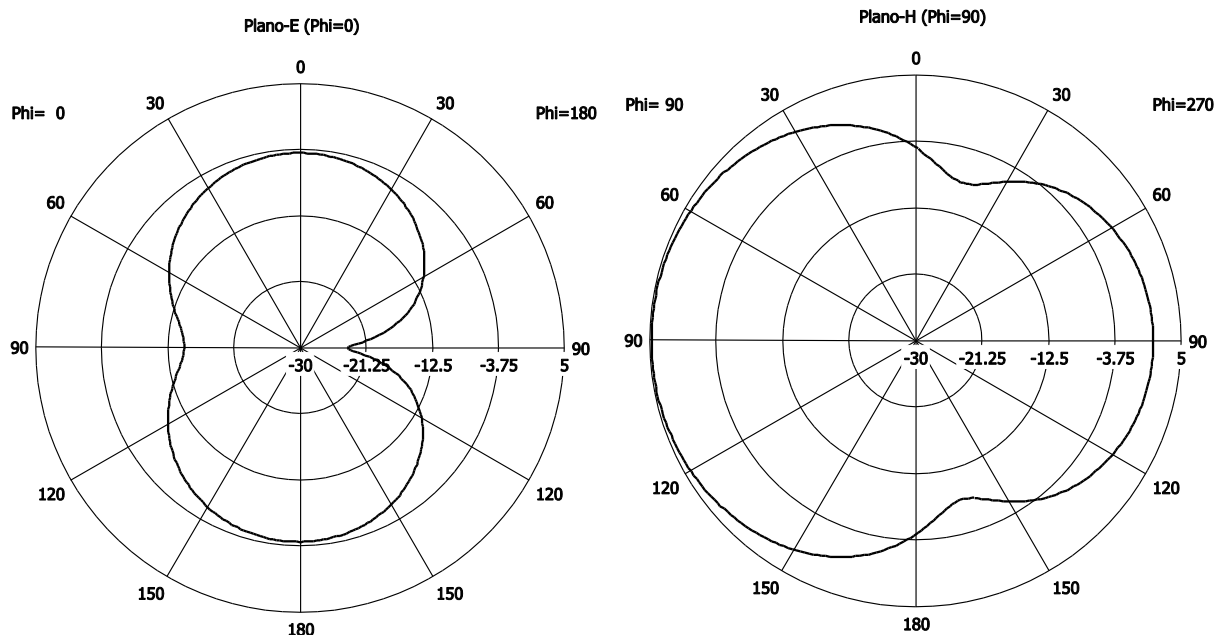


Figura 2.23. Patrones principales de extensión de plano de tierra

2.5. Reflector Parabólico

Fue inventada en 1933 por Grote Reber, pero fue tomada en cuenta hasta 1937 con fines astronómicos. Hoy en día las aplicaciones más comunes de este tipo de antena son radioastronomía, radares, microondas, localización por satélite y comunicaciones. En la ciudad de México el uso común de estas antenas es la televisión vía satélite.

La antena parabólica puede ser clasificada como reflectora por su manera de operar, es de fácil diseño y construcción. Posee una alta ganancia siendo característica por su gran capacidad de producir un haz en el patrón de radiación conocido como “haz de lápiz”, el cual es altamente direccional y con bajos lóbulos secundarios [14].

2.5.1. Estructura

La estructura posee un elemento activo y una superficie reflectora paraboidal como se muestra en la figura 2.24, el reflector parabólico es generado por la rotación de la parábola sobre su propio eje, también conocida como parábola de revolución.

La antena ilumina dicha superficie generando reflexión en cada uno de los focos de la parábola, por lo que es una antena altamente direccional, es decir, si la superficie reflectora tuviera una longitud infinitamente larga y la alimentación fuese un punto focal de radiación solo hacia la superficie reflectora, el ancho de banda generado sería cero y todas las ondas tendrían una sola dirección [11].

Esta antena, si bien es ocupada para televisión, cuenta con un patrón de radiación direccional, el servicio es vía satélite y las frecuencias en las que opera son distintas a las mencionadas en el presente trabajo; por ello no se profundizará más en estas antenas.

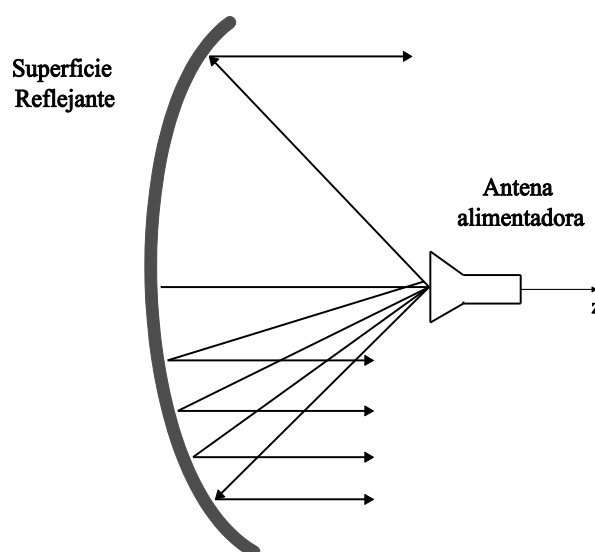


Figura 2.24. Estructura básica de la antena parabólica

2.6. Selección de antena

De acuerdo con el estudio previo y los diseños realizados de forma básica las estructuras para sistemas televisivos, se concluye que la antena Yagi-Uda así como la logarítmica son antenas de tamaño considerable. Las estructuras deben instalarse fuera de las casas o departamentos y es necesario que tengan soporte mecánico que asegure la resistencia de la estructura a adversidades climáticas como viento, calor y humedad; sin embargo, asegurar lo anterior eleva el costo y la robustez de la misma. En caso de que algún elemento se afecte, se debe considerar el reacomodo apropiado.

Un objetivo de este trabajo recepcional, es la búsqueda de un diseño de bajo costo y tamaño reducido y que pueda ser instalado en interiores, por lo que no se considerarán las estructuras antes mencionadas. Por otra parte, la estructura básica del dipolo con alambre, cuenta con un patrón de radiación omnidireccional, pero el ancho de banda es limitado debido a que es una antena resonante.

Con base en la tabla 2.7, la figura 2.25 ilustra la ubicación de las antenas transmisoras, se observa que algunos lugares dentro del D.F. requieren de un dispositivo omnidireccional para la detección de la señales ya que se emiten de dos puntos distantes entre sí, el Cerro del Chiquihuite y el Pico de Tres Padres. Si bien, la transmisión debe darse con la potencia suficiente para suministrar de señal toda la Ciudad de México, los edificios, clima y obstáculos a los que se enfrenta, enfatiza en la necesidad de un dispositivo con omnidireccionalidad. Otros usuarios requerirán de un dispositivo capaz de brindar mayor ganancia y direccionalidad para la detección de las señales debido a que se ubican a las orillas de la ciudad.

Tabla 2.7. Lugares de transmisión de canales digitales

CONCESIÓN	CANAL DE RF	EQUIVALENTE ANALÓGICO	UBICACIÓN DE ANTENA TX
TELEVISIÓN METROPOLITANA, S.A. DE C.V.	23	22	Cerro de Chiquihuite De La Brecha(del Chiquihuite). Delegación Benito Juárez y Gustavo A. Madero. Ciudad de México, Distrito Federal
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL	33	11	
GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL	21	21	
TELEVISIÓN AZTECA, S.A. DE C.V.	25	13	
TELEVISIÓN AZTECA, S.A. DE C.V.	24	7	
ORGANISMO PROMOTOR DE MEDIOS AUDIOVISUALES	30	30	
COMPAÑÍA INTERNACIONAL DE RADIO Y TELEVISIÓN S.A.	27	28	
TELEVISORA DEL VALLE DE MEXICO, S.A. DE C.V.	26	40	
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	49	4	Pico Tres Padres Sierra de Guadalupe, Coacalco. (Con respaldo de antena de Chapultepec)
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	50	2	
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	44	9	
TELEVIMEX, S.A. DE C.V.	48	2	

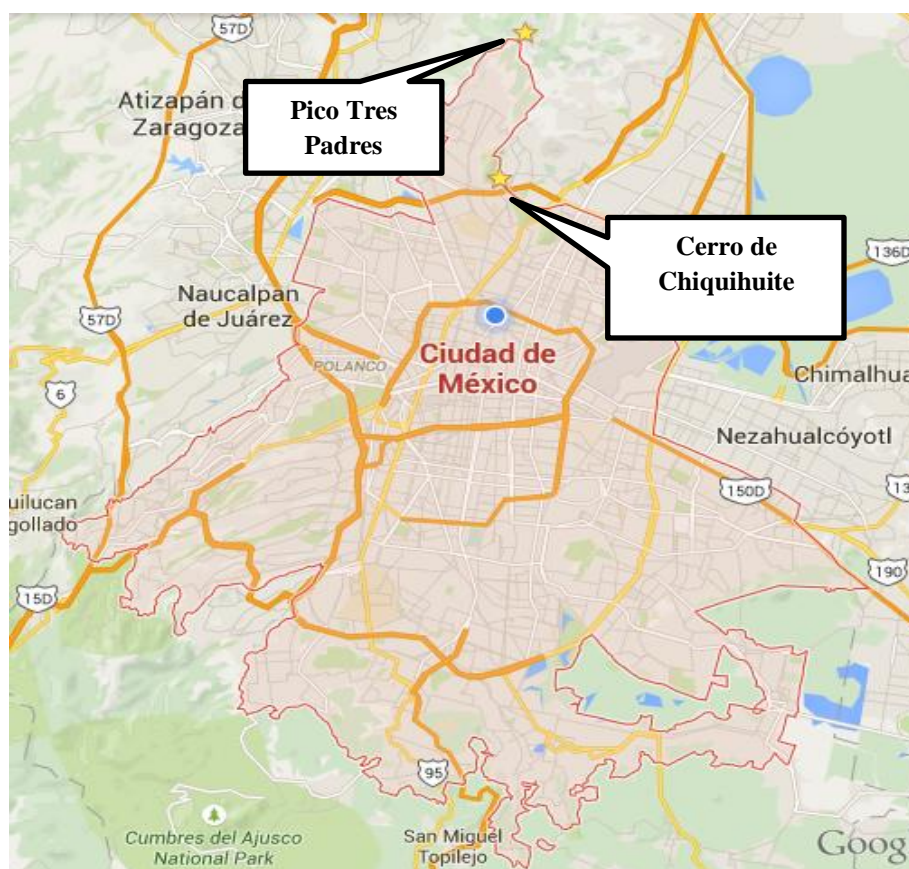


Figura 2.25. Ubicación de antenas transmisoras de TV abierta que abastecen al D.F.

Finalmente la antena impresa con balun integrado tiene las ventajas siguientes:

- ✓ Bajo costo y peso en comparación con las estructuras antes presentadas. Una placa con las características requeridas pueden adquirirse en lugares de venta de dispositivos electrónicos.
- ✓ Cuenta con un diseño de fácil reproducción. El diseño puede realizarse por medio de fabricación de circuitos impresos (PCB), serigrafía o devastado mecánico.
- ✓ Alta resistencia mecánica. El grosor del sustrato provee fortaleza a la antena e incrementa la capacidad de potencia radiada.
- ✓ Da la oportunidad de realizar un diseño direccional o en caso opuesto omnidireccional. Variando elementos dentro de la impresión del diseño se puede contar con una antena direccional u omnidireccional.
- ✓ Mayor ancho de banda alcanzado. En el diseño básico se puede modificar para lograr mayor ancho de banda, para ajustarse a las frecuencias de TDT.

En contraparte, si la antena sufre algún daño, se debe realizar nuevamente la construcción del dispositivo y solo cubre el espectro de televisión digital.

Finalmente, realizado el análisis de las antenas convencionales para equipos terminales de televisión, considerando su caracterización física en frecuencias de TV digital y tomando en cuenta sus ventajas y desventajas, se eligió la antena impresa con balun integrado.

Como siguiente paso, se considerará realizar de forma individual un análisis más profundo y con ello adecuar al dispositivo para trabajar exclusivamente de 513.60 MHz a 691.75 MHz, el siguiente capítulo consta del diseño y desarrollo a nivel simulación de la antena.

Capítulo 3.

DISEÑO DE ANTENA PARA EQUIPOS DE TELEVISIÓN

~

El diseño del dipolo impreso con balun integrado, consta básicamente del elemento radiador (dipolo), el balun y la microcinta que alimenta al dipolo. Éstos son impresos sobre un sustrato con permitividad relativa ϵ_r . Cada sección de la antena se estudia en este capítulo y consta del análisis teórico, simulación y caracterización con el software CST Microwave Studio.

Las dimensiones finales de la antena serán resultado de la optimización en conjunto de todas sus partes. El objetivo es usar esta estructura para operar de manera eficiente en el espectro de frecuencia de la TDT.

3.1. Estructura de las líneas de microcinta

Las microcintas son líneas de transmisión dispuestas en un sustrato, sobre un plano de tierra como se observa en la figura 3.1. Tiene un ancho W , largo L y espesor t impreso en un material de grosor h con constante dieléctrica ϵ_r [20].

La microcinta es ocupada como medio de transmisión en circuitos de radiofrecuencia y microondas. A bajas frecuencias tendrán más influencia las dimensiones físicas, impedancia, longitudes eléctricas y la constante dieléctrica efectiva; es decir, las dimensiones tienden a reducirse para frecuencias mayores y constante dieléctrica alta. La desventaja que presentan estas líneas son pérdidas de potencia que se pueden minimizar al ocupar un sustrato delgado y constante dieléctrica alta [14].

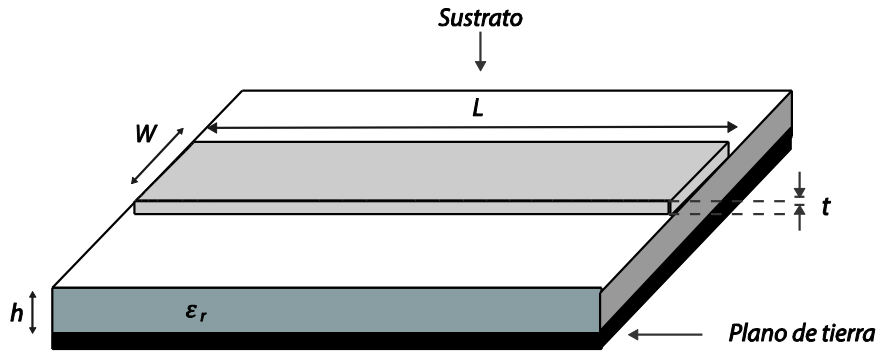


Figura 3.1. Línea de microcinta

3.1.1. Análisis matemático de la microcinta

Para el diseño de la microcinta, es importante el análisis matemático respecto a las características del material en que será impresa la antena. Para conductores realmente delgados (donde $t \rightarrow 0$) la forma cerrada está establecida por las siguientes expresiones [20]:

Para $W/h \leq 1$:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right\} \quad (3.1)$$

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right) \quad (3.2)$$

Para $W/h \geq 1$:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} \quad (3.3)$$

$$Z_c = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (3.4)$$

donde:

Z_c es la impedancia característica de la microcinta.

ϵ_{re} la permitividad relativa efectiva.

η es la impedancia de la onda en el espacio libre con valor 120π .

Una forma de calcular la constante dielectrica efectiva es con mayor exactitud es [20]:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u}\right)^{-ab} \quad (3.5)$$

donde $u = W/h$, y

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{u}{18.1}\right)^3 \right] \quad (3.6)$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (3.7)$$

La expresión de ϵ_{re} tiene una exactitud de 0.2% para $\epsilon_r \leq 128$ y $0.01 \leq u \leq 100$ [20].

Con el cálculo de las anteriores expresiones podrá obtenerse la longitud de onda en modo quasi-TEM de la microcinta de la siguiente forma:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (3.8)$$

donde λ_o es la longitud de onda en el espacio libre y está dada en metros con lo que puede ser calculada la constante de propagación β y la longitud eléctrica θ como se muestra:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_s} \quad (3.9)$$

$$\theta = \beta l \quad (3.10)$$

donde l es definida como la longitud física de la microcinta.

3.1.2. Síntesis de $\frac{W}{h}$

Una expresión aproximada para $\frac{W}{h} \leq 2$ en términos de Z_c y de ϵ_r son calculados en la ecuación 3.11.

$$\frac{W}{h} = \frac{8\exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (3.11)$$

donde:

$$A = \frac{Z_c}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{0.5} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.12)$$

y para $\frac{W}{h} \geq 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (3.13)$$

Obteniendo la componente B de la siguiente forma:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.14)$$

De la ecuación 3.11 a 3.14, tienen una precisión de 1% [20].

3.1.3. Pérdidas de la microcinta

Un concepto importante en las antenas de microcintas, son los tipos de pérdidas que pueden existir en estos dispositivos.

Las pérdidas de potencia en el caso de la microcinta son consecuencia de la construcción y el material utilizado, englobándose en tres factores importantes: por conductor (α_c), dieléctrico

(α_d) y radiación (α_r), que son expresadas en decibeles por unidad de longitud (dB/longitud) [20, 21]. Con la suma de las pérdidas presentadas en la microcinta se obtiene la atenuación total.

$$\alpha_T = \alpha_c + \alpha_d + \alpha_r \quad (3.15)$$

3.1.3.1. Pérdidas en el conductor

Son las mayores pérdidas presentadas y se dan por la conductividad finita de la cinta, el plano de tierra y el tipo de material. También se generan pérdidas por el plano de tierra, sin embargo, son menores que las de la cinta conductora [21].

Una expresión para obtener la atenuación producida por las pérdidas del conductor es la descrita en la ecuación 3.16.

$$\alpha_c = \frac{8.686R_s}{Z_c W} \quad (3.16)$$

En la que Z_c es la impedancia característica de la microcinta con ancho W , y R_s la resistencia del sustrato en ohms por la superficie entre el conductor y el plano de tierra, con la siguiente relación [20]:

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (3.17)$$

donde: σ = Conductividad

μ_0 = Permeabilidad en el espacio libre

ω = Frecuencia angular

3.1.3.2. Pérdidas en el Dieléctrico

Se presentan por el material dieléctrico utilizado, dichas pérdidas son generalmente mucho menores que las debidas al conductor. No obstante, con materiales como el silicio igualan e incluso superan las pérdidas por el conductor.

$$\alpha_d = 8.686\pi \left(\frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \frac{\epsilon_r \tan \delta}{\epsilon_{re} \lambda} [dB/unidad\ de\ longitud] \quad (3.18)$$

donde δ = Pérdidas tangenciales del sustrato dieléctrico.

3.1.3.3. Pérdidas por radiación

Debido a la geometría de la línea y el sustrato, se presentan las pérdidas por radiación α_r . Es posible disminuir este tipo de pérdidas con el incremento de la impedancia o de la constante dieléctrica, para el caso opuesto con la reducción del espesor del dieléctrico.

3.2. Antena impresa y de microcinta

Las antenas de parche o también conocidas como antenas de microcinta (*microstrip*), comienzan a utilizarse a partir de la década de 1970, aunque es en el año de 1953 que se remonta el primer diseño de esta antena y posee su patente desde 1955 [11]. Debido a su bajo perfil, tiene mayor tendencia a ocuparse en aplicaciones inalámbricas, ya que poseen practicidad para introducirse en dispositivos móviles. Sus aplicaciones más comunes son aeronáutica, aviación, aplicaciones en misiles y telemetría.

Las desventajas que presentan las antenas de microcinta son su ancho de banda estrecho y poca ganancia, por lo que son también utilizadas para sistemas de seguridad que requieren de anchos de banda angostos.

3.2.1. Estructura de antena impresa

La estructura general de la antena de parche rectangular es mostrada en la figura 3.2, compuesta por una superficie conductora (parche) de longitud L y ancho W , con espesor t impreso sobre un sustrato con constante dieléctrica ϵ_r y espesor h . La parte inferior es tomada como plano de tierra, direccionando la potencia por lo que radia solo por en la parte superior [20, 22].

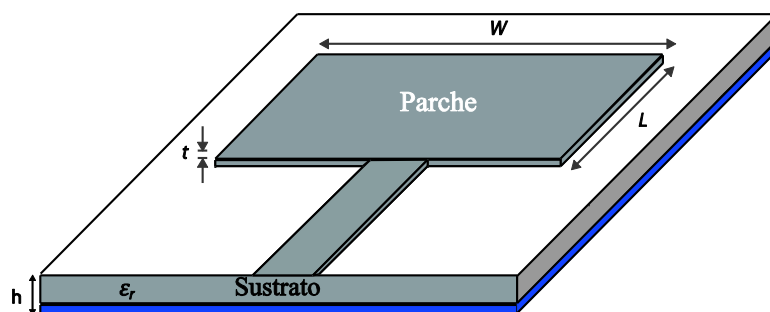


Figura 3.2. Estructura básica de antena impresa o de microcinta

A diferencia de las líneas de microcinta, las antenas impresas requieren de una constante dieléctrica pequeña y un sustrato grueso, con la extensión de estos parámetros se presenta mejor radiación [14]. El parche puede tomar varias formas geométricas que dependerán de los requerimientos del diseño, las más comunes son rectangulares, circulares y elípticas como se observa en la figura 3.3. No obstante, dicha superficie puede tener una geometría arbitraria para satisfacer las necesidades del diseño [22].

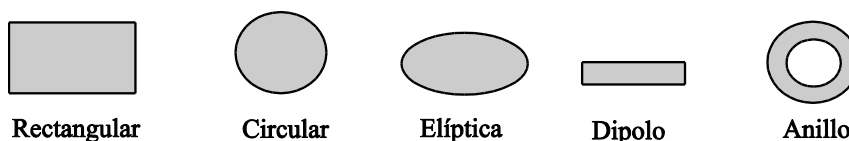


Figura 3.3. Formas para parche de la antena de microcinta

Este tipo de antenas regularmente trabaja en el intervalo de las microondas que se encuentra de los 3 GHz a los 30 GHz.

3.2.2. Principio de funcionamiento

Debido a que la microcinta de la antena es un conductor, se forman líneas de campo (véase la figura 3.4.) que se cierran con el plano de tierra. Estas líneas se crean en las discontinuidades o circuitos abiertos de la estructura, especialmente si su tamaño está directamente relacionado con una longitud de onda [21]. El efecto se manifiesta en los bordes de la estructura de la antena y es dependiente de la permitividad del dieléctrico.

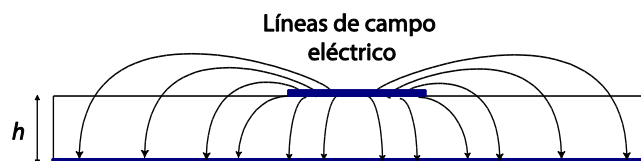


Figura 3.4. Líneas de campo generadas en una antena impresa

Generalmente, el patrón de radiación de una antena impresa es direccional, ya que la estructura baja que forma el plano de tierra que se considera infinito, elimina la radiación en la parte inferior [14], como puede verse en la figura 3.5.

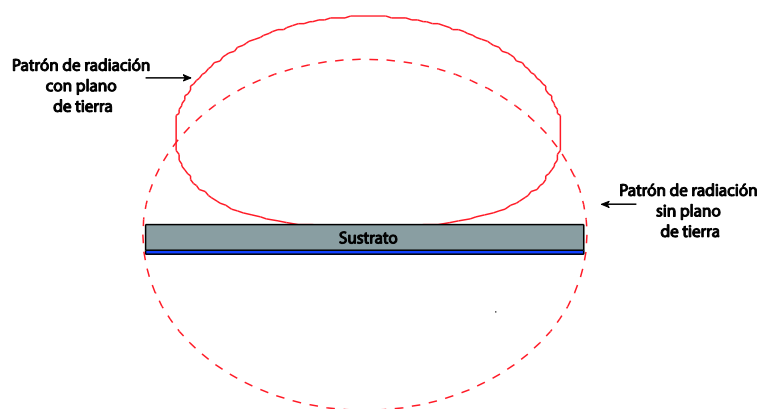


Figura 3.5. Variación del patrón de radiación debido al plano de tierra

3.3. Elección del sustrato

La elección de un sustrato adecuado para una antena con tecnología impresa, es un paso elemental en el diseño, por lo que es necesario buscar que el material sea capaz de brindar soporte mecánico para la antena.

El sustrato está compuesto de un material dieléctrico, que afecta el diseño eléctrico y mecánico del dispositivo; poseen factores intrínsecos que deben ser considerados como: constante dieléctrica, pérdidas tangenciales, la relación impedancia-ancho de banda, entre otros.

Un sustrato de espesor considerable aumentará la fuerza mecánica de la estructura, incrementando la potencia radiada y con ello se reducirán las pérdidas del conductor, lo que resulta en el incremento del ancho de banda [21]; en contraparte, aumentará el peso y las pérdidas por el dieléctrico.

La constante dieléctrica ϵ_r juega un papel similar al del ancho del sustrato, ya que puede incrementar las líneas de campo de las periferias del parche y su potencia radiada [17, 21].

La selección del sustrato se basa en permitirle al radiador y a la microcinta de alimentación soporte mecánico y garantizar que la antena reciba ondas electromagnéticas de forma eficiente. Algunos materiales comúnmente ocupados se describen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Materiales comúnmente ocupados para diseño de tecnología de microcinta

Material	Constante Dieléctrica	Pérdidas tangenciales a 1GHz
Alúmina	9.8	0.0004
Espuma de polimetacrilato	1.07	0.0009
Epoxi/vidrio (FR-4)	4.5	0.01

La elección del sustrato está basada en las características descritas, ya que es recomendable encontrar un material de bajo costo cuya impresión pueda hacerse mediante procedimientos clásicos como la serigrafía, por lo que se seleccionó el material RF-45, cuyas propiedades están descritas en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades físicas del material

Material	Espesor del sustrato	Espesor de metalización	Permitividad
RF-45 0620	1.5748mm	0.035 mm (1oz)	4.5

3.4. Dipolo impreso con balun integrado

La antena es formada del dipolo impreso, la microcinta de alimentación y el transformador de $\frac{\lambda}{4}$, son impresos en un sustrato en una configuración de dos capas como se muestra en la figura 3.6. El dipolo colocado en la parte inferior del sustrato, se forma como extensión del plano de tierra bifurcada que emerge del elemento (tierra) de la microcinta de alimentación, dicha microcinta en forma de J invertida proporciona al radiador potencia de alimentación justo en los puntos en los que existe un doblez y debe colocarse a la mitad de los brazos del dipolo.

La microcinta surge de la parte inferior de la estructura con una impedancia $Z_p = 50 \Omega$ continuando con un transformador de $\frac{\lambda}{4}$ con impedancia Z_T para acoplar Z_p con la impedancia de la cinta de alimentación de valor $Z_b = 80 \Omega$.

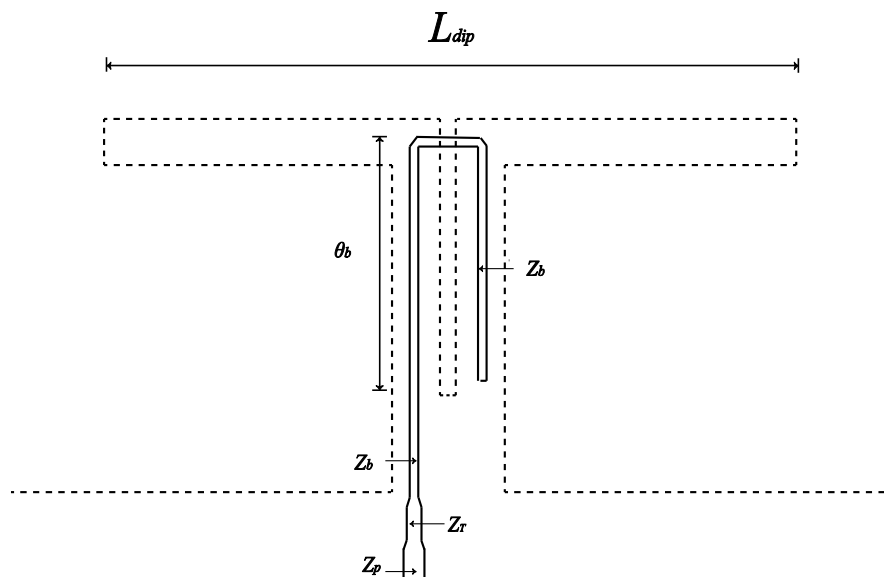


Figura 3.6. Configuración del dipolo impreso con balun integrado [18]

La antena ofrece doble banda de acoplamiento (véase la figura 2.17), que es resultado de la adecuada elección de la longitud eléctrica de la microcinta de alimentación con valor $\theta_b = 90^\circ$. El análisis de los componentes de la antena se desarrollará de forma individual en este apartado.

3.4.1. Análisis del dipolo impreso

Un importante radiador es el conocido como dipolo impreso [19], es muy popular debido a su bajo costo y fabricación con técnicas comunes de impresión de circuitos. En esta sección se analizará el comportamiento del dipolo impreso cuando se realiza la variación de sus dimensiones en ancho y longitud de los brazos, así como la separación entre ellos.

La estructura posee una longitud total marcada como L_{dip} y un ancho a con una separación entre los brazos definida como i (véase la figura 3.7). Estas longitudes, en conjunto con las características del sustrato en el que se monta el dipolo, definen el intervalo de frecuencias al que se acopla la antena como se observa más adelante.

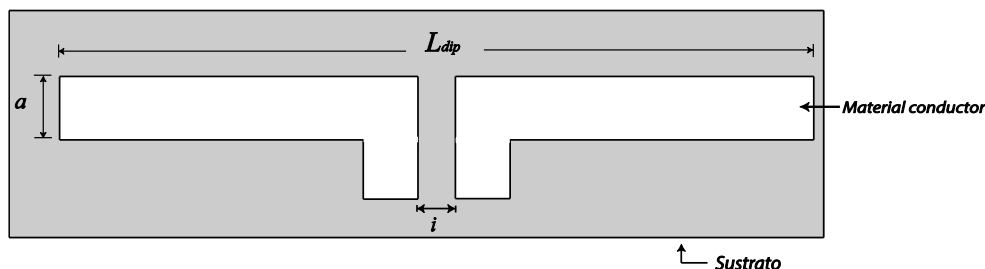


Figura 3.7. Análisis de brazos de dipolo

La estructura mostrada en la figura 3.7 es impresa sobre un sustrato que posee permitividad constante y es necesario que siga el principio mencionado en la sección 3.3 sobre sustratos para antenas de microcinta. Por medio de técnicas convencionales de devastado mecánico podría retirarse el exceso para tener únicamente la estructura deseada.

El acoplamiento del dipolo impreso cambia en función de sus dimensiones. El principal parámetro que influye en el desempeño del radiador es la longitud L_{dip} pues este determina la frecuencia de resonancia del mismo.

La longitud total L_{dip} es regularmente 0.5λ , no obstante, en la figura 3.8 se muestra el parámetro S_{11} , respecto a los valores enlistados en la tabla 3.3 donde λ es 497.79 mm a la frecuencia central de 602.67 MHz .

Tabla 3.3. Longitud total del dipolo impreso

Longitud respecto a λ	L_{dip}
0.25λ	125 mm
0.35λ	166 mm
0.5λ	249 mm

En la figura 3.8 se muestra la simulación del dipolo impreso con un ancho constante $a = 24.88 \text{ mm}$ y para diferentes valores de L_{dip} . La frecuencia de resonancia depende de la longitud del dipolo, a menor longitud, mayor frecuencia de resonancia.

Los cambios de longitud además influyen, aunque en menor grado, en la intensidad de acoplamiento y en el ancho de banda.

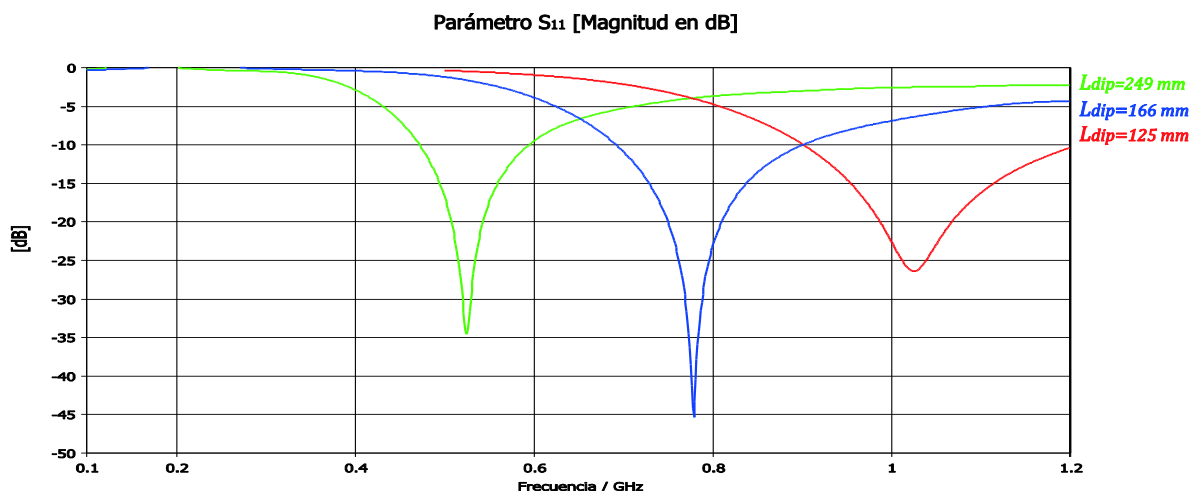


Figura 3.8. Comparativa de parámetro S_{11} respecto a L_{dip}

La separación entre brazos modificará la impedancia del radiador, de la misma forma al acoplamiento, de manera que cuando $i = 1\text{ mm}$ mejora el acoplamiento como se observa en la figura 3.9.

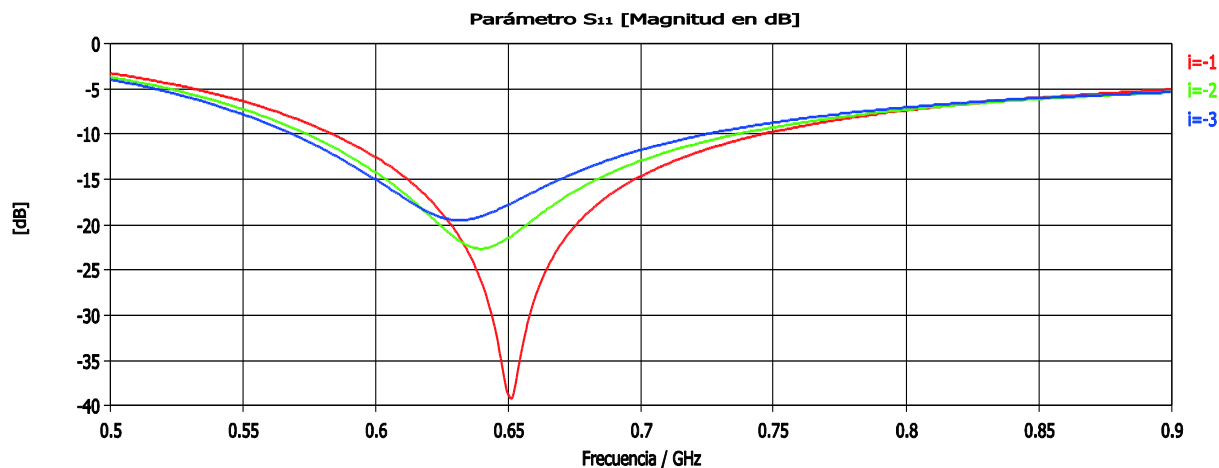


Figura 3.9. Comparativa de parámetros S_{11} en función de la separación i .

Observando la figura 3.10, el ancho a de los brazos del dipolo impreso inicialmente se definió de 0.05λ . Se propone realizar un aumento del ancho, al que se denomina a_{ext} , esto permitirá cambiar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda.

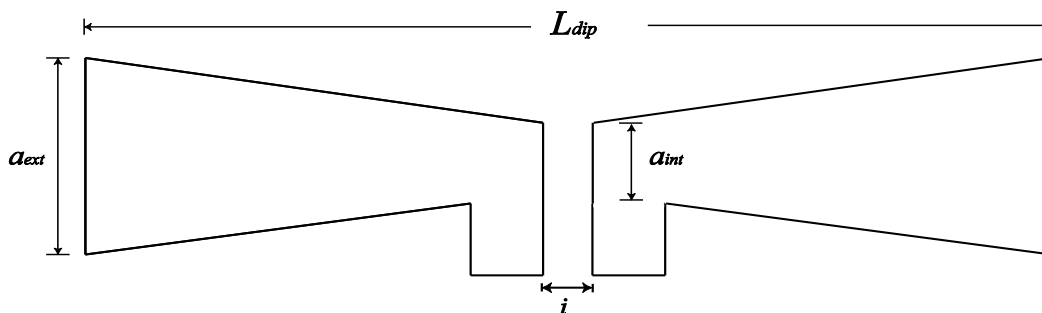


Figura 3.10. Variación de ancho en la parte externa de los brazos.

En la figura 3.11 se muestra el acoplamiento del dipolo impreso con el cambio del ancho de los brazos, de esta figura se puede concluir que la frecuencia de acoplamiento será menor cuando sea mayor el ancho externo de los brazos, además se observa que el intervalo de frecuencias en las que el dipolo se encuentra acoplado es mayor.

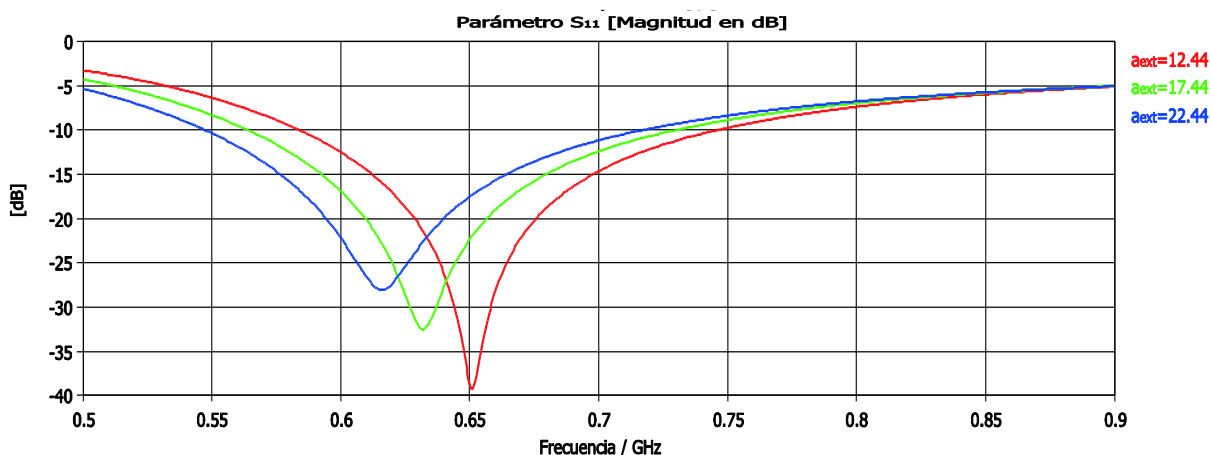


Figura 3.11. Variación de ancho de brazos en la parte final.

Hasta este punto, la principal razón de la variación en el acoplamiento de la antena es el cambio de las dimensiones en el dipolo impreso y su alimentación es ubicada al centro de los brazos.

3.4.2. Alimentación del dipolo

La antena normalmente se conecta a una línea de transmisión y un buen acoplamiento es esencial. El dipolo es un elemento balanceado y tendrá una impedancia aproximada de 75Ω . Un cable coaxial es una línea no balanceada y se emplea regularmente para conectar la antena. Si se conecta de forma directa el dipolo con el cable se establece un desequilibrio de corrientes

como se observa en la figura 3.12, afectando de forma negativa al patrón de radiación y a la impedancia [23].

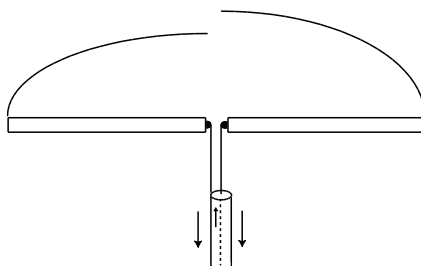


Figura 3.12. Diferencia de corrientes en la conexión de un dipolo a coaxial [11]

Para ajustar este desequilibrio se ocupa un dispositivo conocido como Balun (*Balanced-unbalanced transformer*), cuya finalidad es hacer que el camino de las corrientes hacia ambos brazos del dipolo sea el mismo y conseguir la simetría de dicha distribución sobre los brazos, como se ilustra en la figura 3.13 [11].

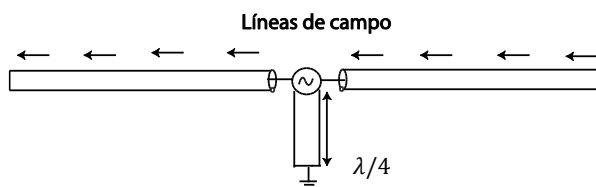


Figura 3.13. Simetría de distribución de corriente mediante Balun.

3.4.2.1. Balun impreso

El balun es un dispositivo que transforma una línea balanceada a no-balanceada y viceversa [11, 14], existen diferentes formas de implementarlo, una forma ampliamente utilizada es empleando líneas de transmisión coaxial, como se muestra en la figura 3.14, en el que el punto H representa la fuente no balanceada (carga) mientras que las terminales F y G son los puntos del circuito balanceado.

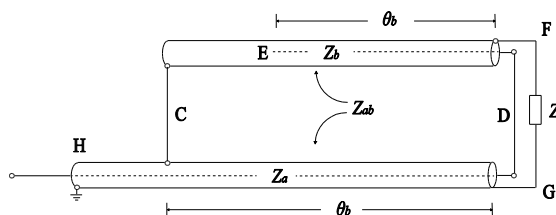


Figura 3.14. Balun propuesto por Roberts

Este balun fue propuesto por Roberts en 1957 [24], la estructura puede ser diseñada como el conjunto de secciones de líneas de transmisión coaxial ilustrada en la figura 3.14 la cual se puede representar de manera equivalente en la figura 3.15, la entrada en el punto H es no-balanceada y la carga balanceada se ubica en los puntos F y G. Al tener una óptima selección de las longitudes eléctricas, se tendrá la transformación de la línea no-balanceada a balanceada (véase la figura 3.13).

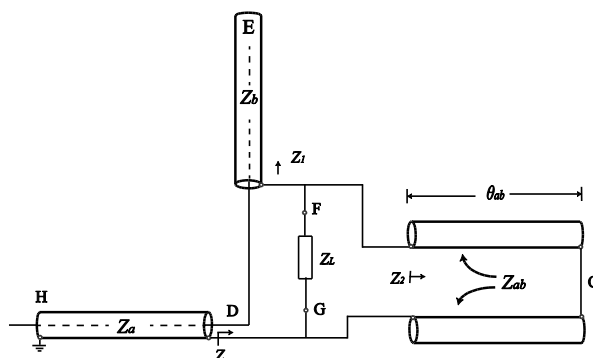


Figura 3.15. Estructura básica del balun [18]

Otra función que puede desempeñar este balun es el acoplamiento de las impedancias de la línea no-balanceada a la carga Z_L , para que se reduzcan considerablemente las pérdidas por reflexión entre ellas.

3.4.2.2. Transformador de un cuarto de longitud de onda

Un transformador $\frac{\lambda}{4}$, es un circuito simple que cambia la impedancia característica de una línea de transmisión con una carga como se muestra en la figura 3.16, su principal característica es que sólo acopla impedancias puramente reales [25].

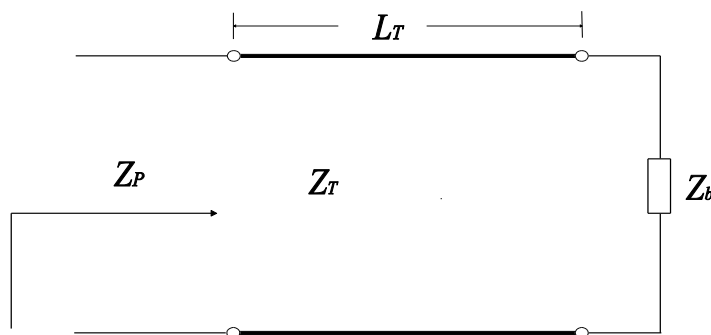


Figura 3.16. Esquema del transformador de un cuarto de longitud de onda

El valor de la longitud total L_T es igual a $\frac{\lambda_s}{4}$. Por lo tanto, la línea con impedancia Z_p se acopla con la línea de impedancia Z_b , integrando un pedazo de microcinta con impedancia Z_T y su valor es descrito por la ecuación 3.19, observándose un esquema en la figura 3.17.

$$Z_T = \sqrt{Z_p Z_b} \quad (3.19)$$

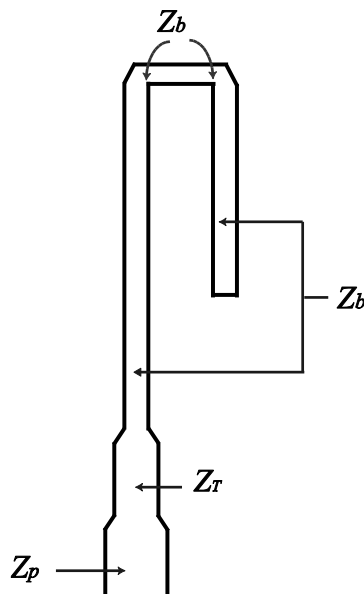


Figura 3.17. Configuración de balun de Roberts.

La sección de microcinta con impedancia Z_T , es el transformador $\frac{\lambda}{4}$ y es agregado para que la reflexión de la energía entregada sea mínima.

3.5. Cálculo de las dimensiones de la antena

El diseño de la antena de este trabajo receptional, depende en gran medida del intervalo de frecuencias en el que está asignado la TDT en el D.F, el espectro de frecuencias que se requiere cubrir es de 513.60 MHz a 691.75 MHz. La frecuencia central es de 602.67 MHz y al usar la ecuación 2.2 se tiene una longitud de onda de $\lambda = 497.79 \text{ mm}$.

En el diseño típico del dipolo impreso con balun integrado, la longitud de los brazos L_{dip} y el ancho del dipolo a mostrados en la figura 3.10 se establecen por las ecuaciones 3.20 y 3.21

respectivamente, debido a que son las condiciones en las que la antena tiene una máxima radiación en la frecuencia central [17].

$$L_{dip} = 0.4(\lambda) \quad (3.20)$$

$$a = 0.05(\lambda) \quad (3.21)$$

Tomando como referencia la figura 3.10, para una separación $i = 2mm$, se calcula usando las ecuaciones 3.20 y 3.21 como se mencionó en la sección 2.4 sus dimensiones son:

$$L_{dip} = 199.11 \text{ mm}$$

$$a = 24.88 \text{ mm}$$

La impedancia del dipolo impreso es de aproximadamente 80Ω . La impedancia del receptor televisivo en la conexión de la antena es de 75Ω , en principio se podría conectar directamente y esperar pocas reflexiones. No obstante, para fines de medición y análisis, la impedancia recibida por la línea de transmisión se diseña a 50Ω y es necesario un transformador de $\frac{\lambda}{4}$ como se explicó anteriormente.

La configuración que se obtiene es la mostrada en la figura 3.18 y la variación de alguna dimensión cambiará características de la antena como impedancia, ancho de banda o patrón de radiación.

Para el desempeño de las líneas de microcinta (véase la sección 3.1), el plano de tierra debe estar impreso en el inverso del sustrato, cubriendo toda microcinta que conforma el balun, por lo que cuenta con tierra bifurcada que se recomienda, tenga un grosor mínimo de tres veces el ancho de la microcinta [17].

Si se desea un radiador omnidireccional, es necesario el plano de tierra visto en la figura 3.1, cuente con grosor de diez veces el ancho de la microcinta [17]. Se considera que el mínimo grosor de plano de tierra es de 78.97 mm para dar balance en las medidas físicas y sin perder la omnidireccionalidad.

Para la alimentación el transformador de $\frac{\lambda}{4}$, se realizan los cálculos de la línea de microcinta con las impedancias antes descritas. Usando la ecuación 3.19 para acoplar la impedancia Z_p con Z_b , se tiene $Z_T = 63.24 \Omega$. Basado en la figura 3.17 y respecto a la ecuaciones 3.9 a 3.11, se obtienen los siguientes resultados de ancho y longitud física del transformador:

$$W_{Z_p} = 2.96 \text{ mm}$$

$$W_{Z_T} = 1.95 \text{ mm} \quad L_{Z_T} = 68.04 \text{ mm}$$

$$W_{Z_{ab}} = 1.20 \text{ mm}$$

La longitud de la microcinta con impedancia Z_p se propone de 27 mm y debe tener el espacio suficiente para fijar el conector. Así mismo, la microcinta de impedancia Z_b es de 70 mm . En la figura 3.18 se muestra un esquema con las medidas finales de la microcinta de alimentación. En el caso de la microcinta con impedancia Z_p , puede modificarse la longitud para reducir la dimensión final de la estructura sin modificar el comportamiento de la antena.

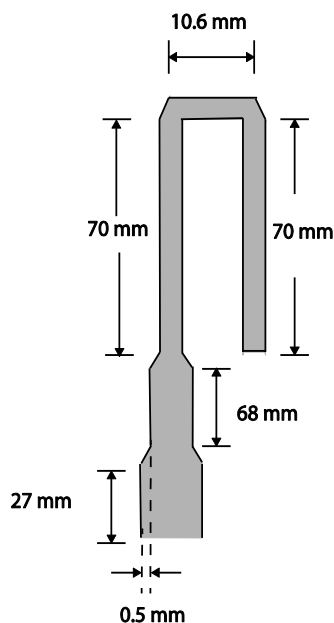


Figura 3.18. Esquema final de microcinta de alimentación

Debido a que el plano de tierra que se encuentra debajo del dipolo tendrá un ancho de 10 veces el ancho de la microcinta, se ocupó la microcinta más ancha (Z_p) dando un total de 29.60 mm y un largo hasta cubrir al transformador de 137.21 mm , concluyendo con el ancho

de la tierra bifurcada que debe ser de 3 veces el ancho de la microcinta, por lo que se obtiene el valor de 8.81 mm como se muestra en la figura 3.19.

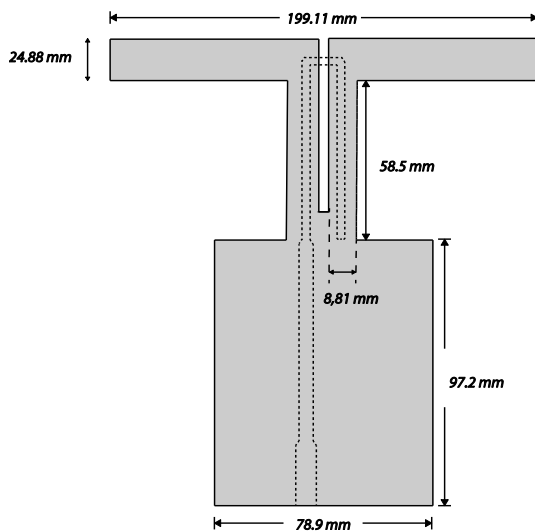


Figura 3.19. Esquema de dipolo impreso

En la figura 3.20 se observa el acoplamiento que se obtiene con el desarrollo anterior, con valor por debajo de los -15 dB el acoplamiento máximo se encuentra a los 602 MHz, y posee un ancho de banda de 84 MHz.

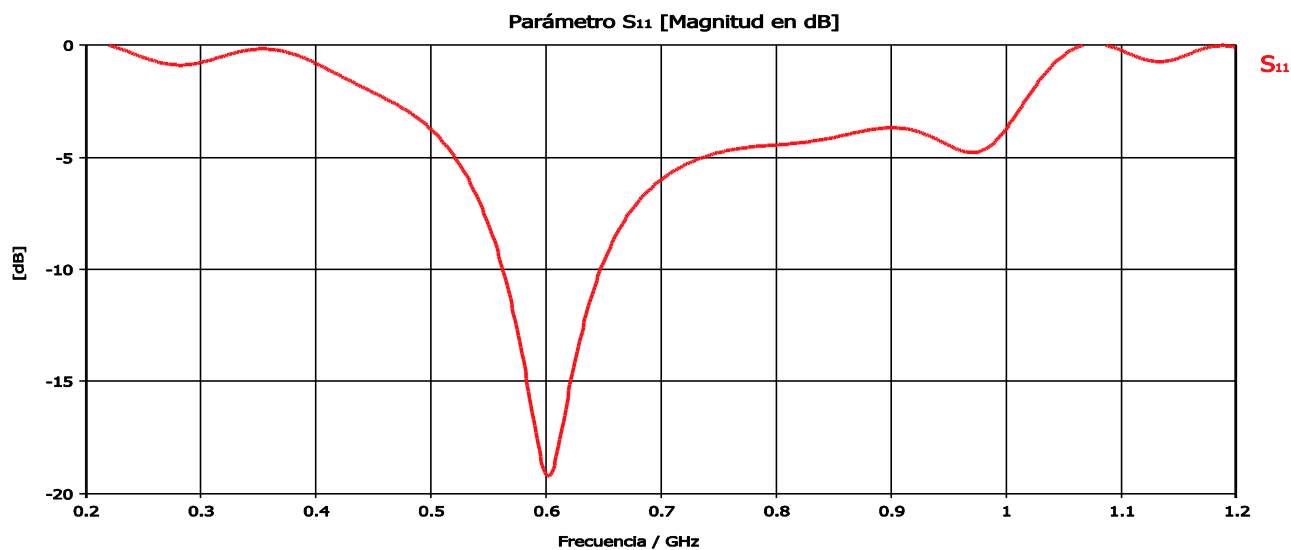


Figura 3.20. Acoplamiento de antena impresa propuesta

El dipolo se puede modificar en el ancho de brazos, tanto exterior como interior. En la figura 3.21, se ha estudiado que la variación de los brazos en la parte externa desplaza la frecuencia de acoplamiento y realizando un barrido de a_{ext} (véase la figura 3.10), la frecuencia de acoplo será menor si la longitud de a_{ext} es mayor.

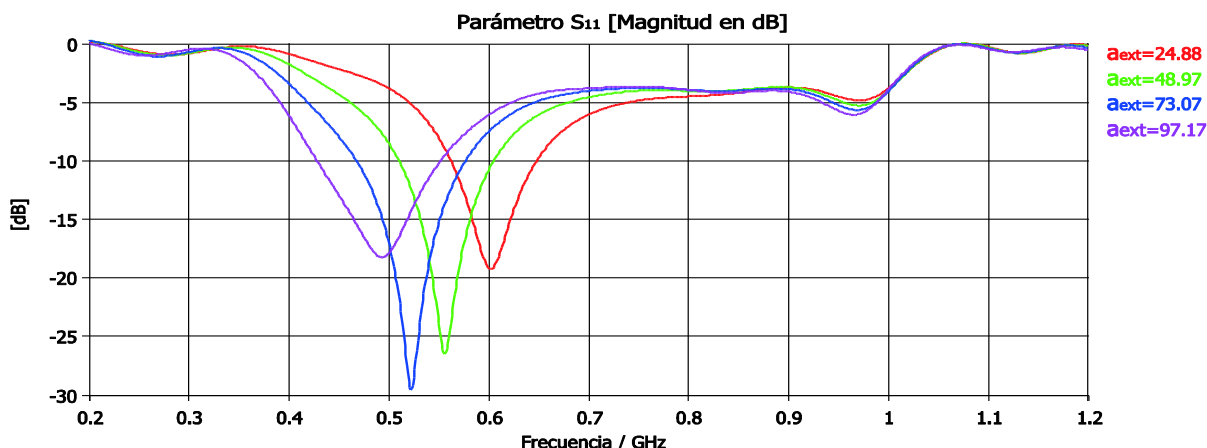


Figura 3.21. Barrido con variación de a_{ext}

Por otro lado, la longitud de a_{int} está relacionada con la frecuencia de corte superior y como se aprecia en la figura 3.22 la alteración en longitud de dicho parámetro aporta el acoplamiento en la parte superior de la banda.

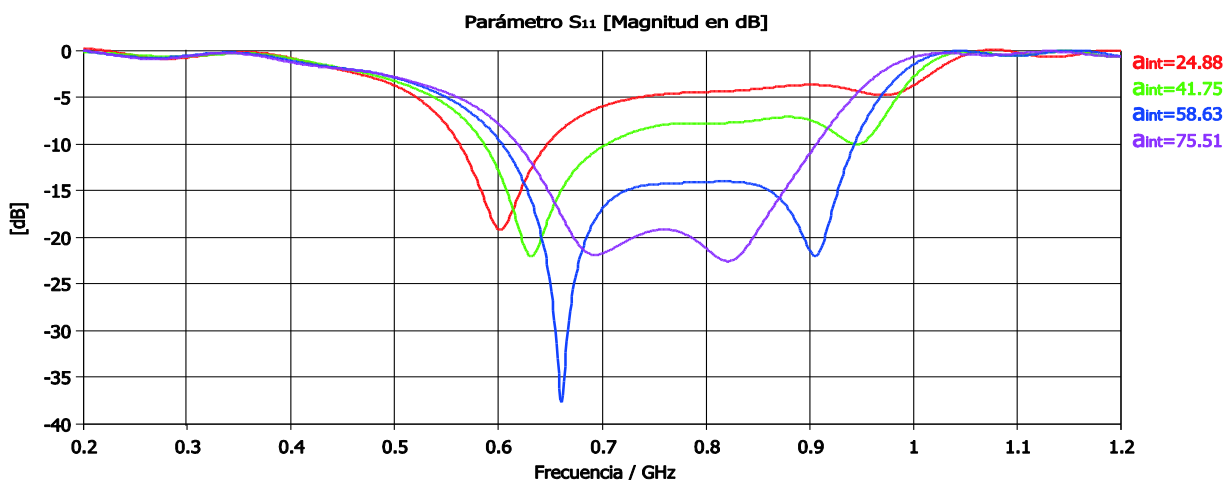


Figura 3.22. Variación de parámetro a_{int}

El balun, para alimentar al radiador cuenta con 3 secciones de línea de transmisión en forma de “J” invertida, realiza el acoplamiento de impedancias, dándole transiciones suaves entre las líneas para que se reduzcan las pérdidas. Ahora bien, si se varía la longitud de la microcinta,

afectará el acoplamiento. Con una mayor longitud existe desacoplamiento considerable como se observa en la figura 3.23, siendo m el valor agregado a la longitud por encima del diseño original, por lo que variar este parámetro no se considerará para la propuesta de antena.

El plano de tierra debe tener un ancho de por lo menos 3 veces el ancho de la microcinta para ser complemento de la línea de microcinta que alimenta a la antena; no obstante, la omnidireccionalidad no se perderá si por cada lado se agrega 10 veces el ancho de la microcinta.

Para un dispositivo direccional debe incrementarse el ancho del plano de tierra modificando el acoplamiento del dispositivo. La tierra bifurcada cubre el resto de la microcinta, de modo que los puntos de alimentación se encuentren en el centro de cada brazo.

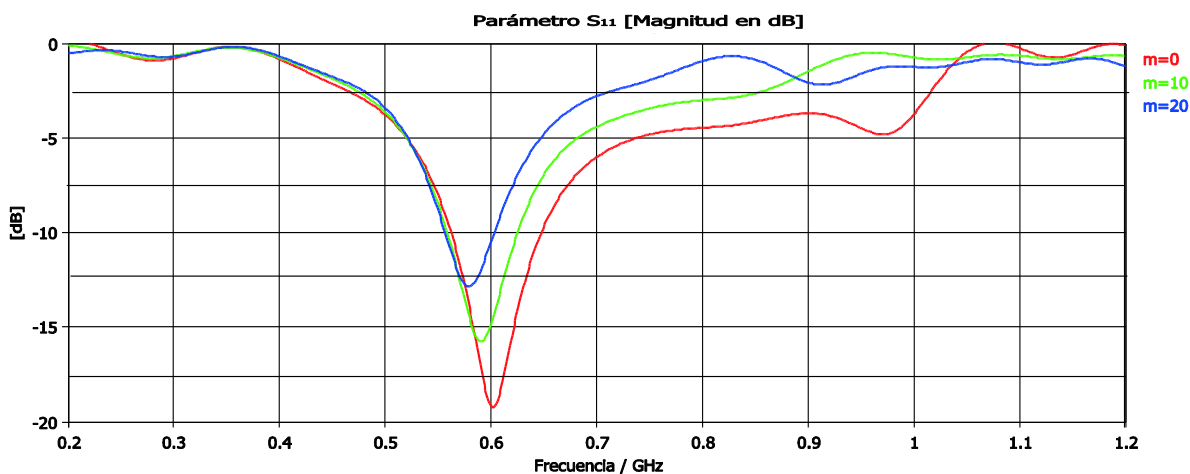


Figura 3.23. Modificación de longitud de microcinta en extremo final

La altura de la ranura (*slot*) entre los brazos del dipolo, también puede variarse. En la figura 3.25, se observa que con las dimensiones calculadas de la estructura y dándole tres valores distintos a dicha altura modifica el acoplamiento, éste baja conforme es menor la distancia entre la parte inferior de la estructura y el inicio de la ranura.

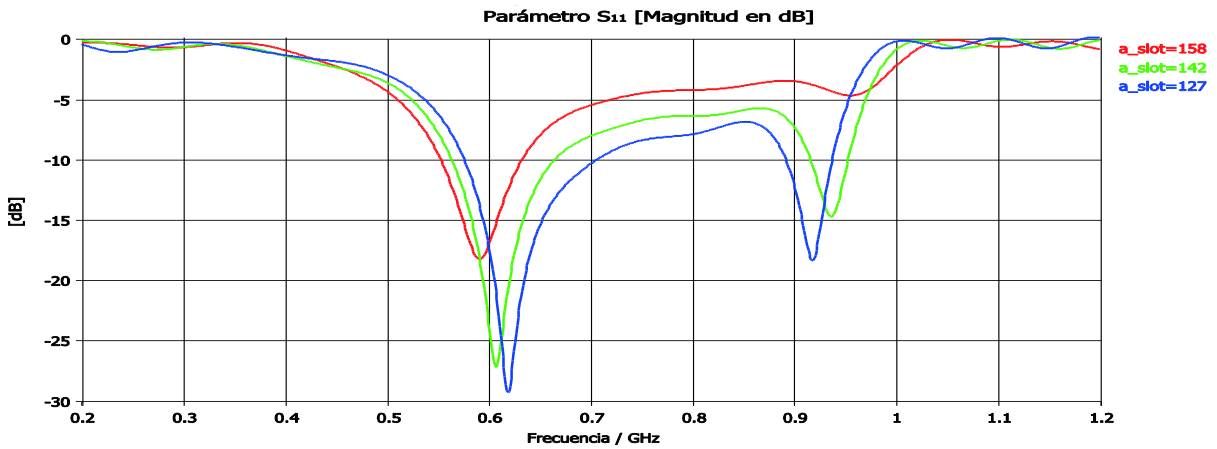


Figura 3.24. Variación de altura de ranura entre brazos del dipolo

Agrupando las modificaciones expuestas en el análisis anterior, se consideran las variaciones en los brazos del radiador, omitiendo cambios en las medidas de la microcinta o del plano de tierra. Por ello, se propone una antena con las longitudes que se muestra en la figura 3.25

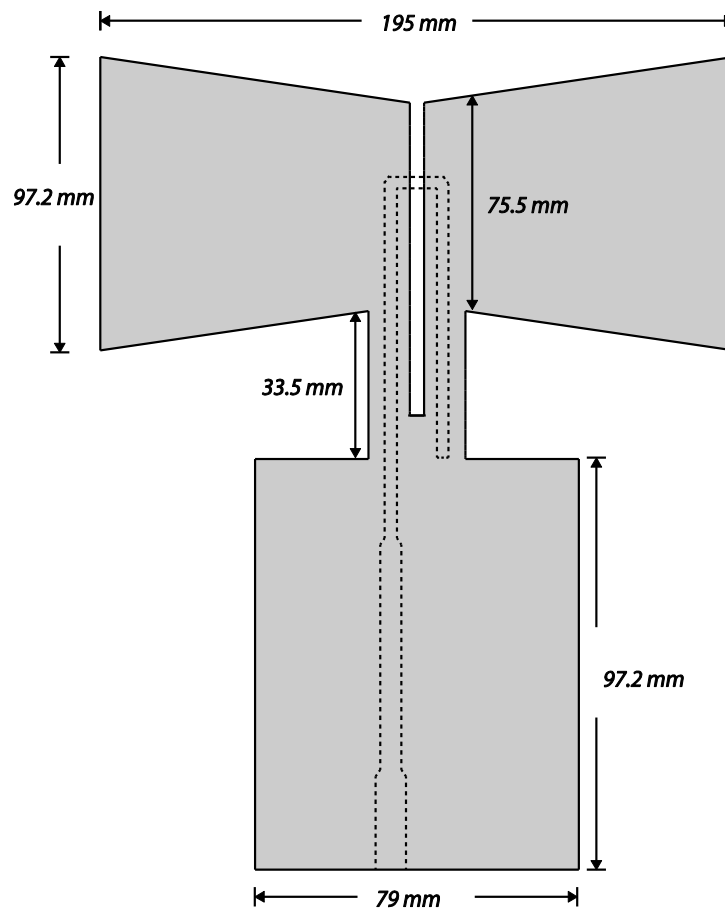


Figura 3.25. Diagrama de antena con medidas propuestas

La separación entre brazos del dipolo es de 2 mm para no afectar la impedancia del radiador y la longitud total del radiador será $L_{dip} = 0.39\lambda = 195\text{ mm}$.

Por lo tanto, en la figura 3.26, se muestra el parámetro S_{11} de la antenna propuesta, que ha sido optimizada para radiar en el ancho de banda de TDT. El acoplamiento expuesto se encuentra en el intervalo de los 500 MHz a los 900 MHz aproximadamente, cubriendo en su totalidad el espectro de frecuencias deseado.

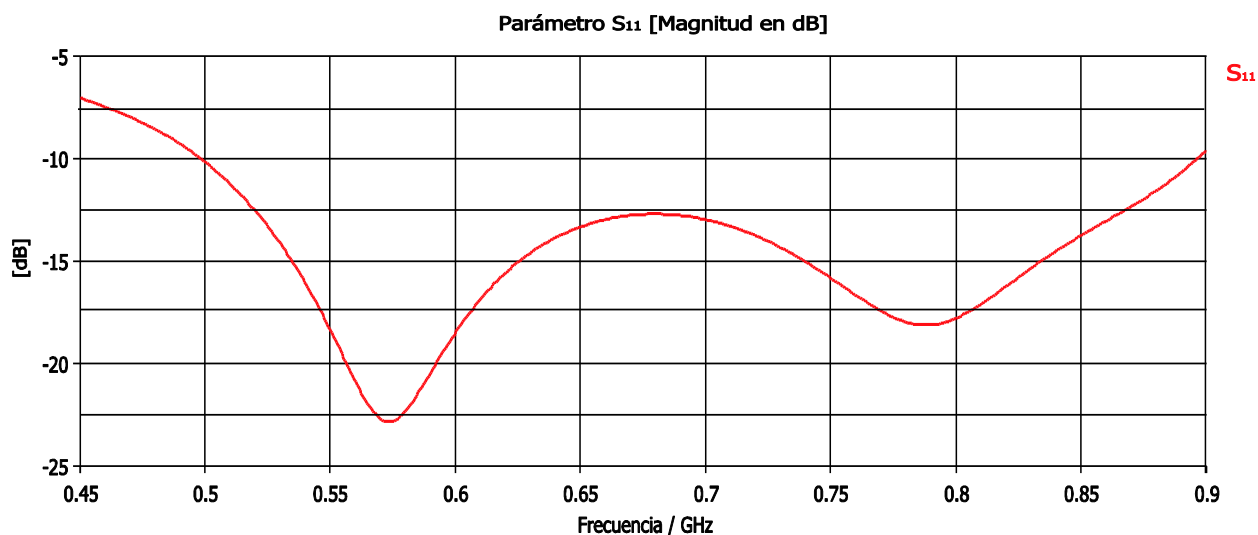


Figura 3.26. Acoplamiento de diseño final

En la figura 3.27, se observa el patrón de radiación en tres dimensiones en la frecuencia de 513.60 MHz, siendo ésta la frecuencia inferior del ancho de banda, con una ganancia en la dirección de máxima propagación de 2.24 dBi. La eficiencia total de la antenna es de -0.2645 dB, lo que en magnitud escalar es 0.94 y se aproxima a la unidad, asegurando que la mayor parte de la potencia recibida por la antenna será transferida al receptor.

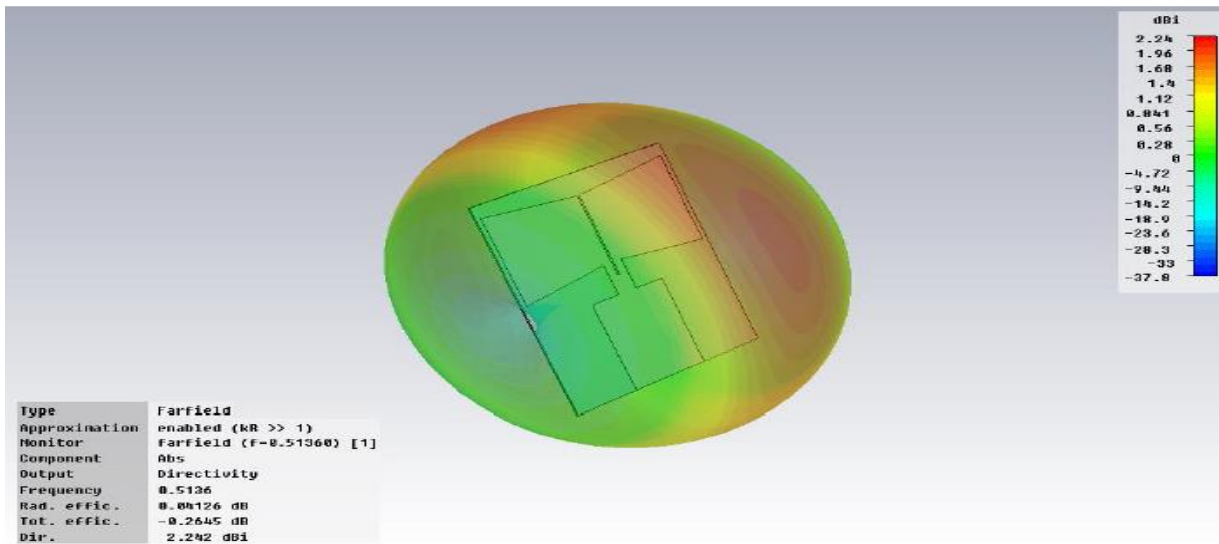


Figura 3.27. Diagrama de radiación en tres dimensiones a 513.60 MHz

En la figura 3.28, los cortes del plano-E y plano-H, muestran un diagrama de radiación omnidireccional.

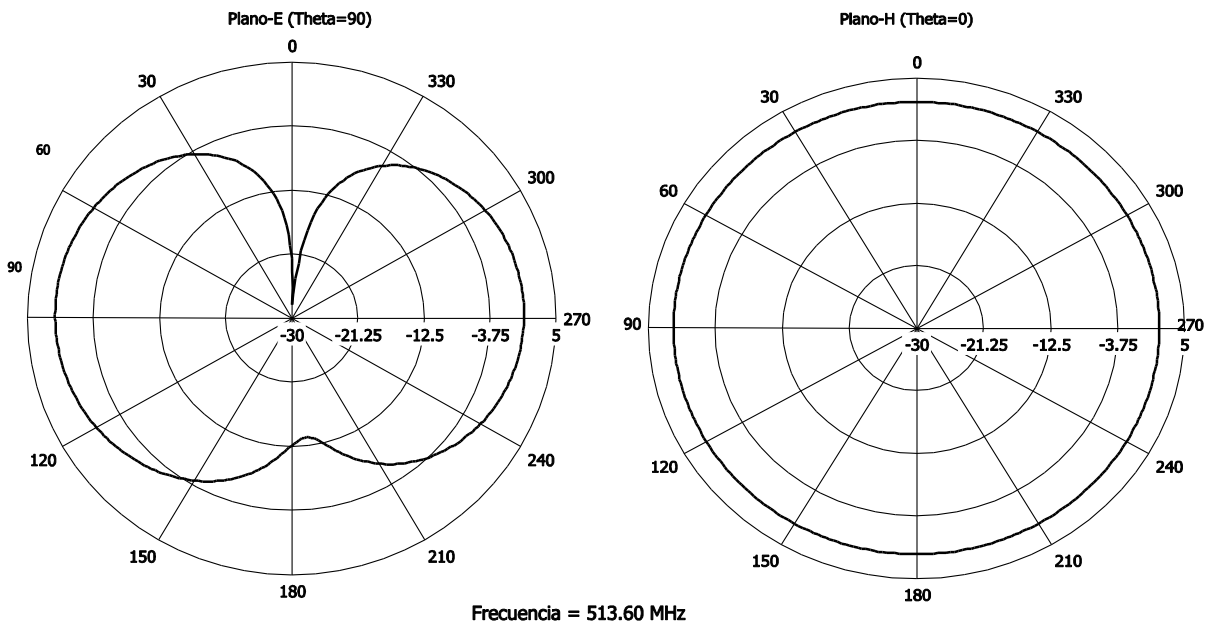


Figura 3.28. Cortes principales del diagrama de radiación a 513.60 MHz

Para el caso de la frecuencia central con valor de 602.67 MHz, el patrón de radiación en tres dimensiones se observa en la figura 3.29 y los cortes principales se muestran en la figura 3.30.

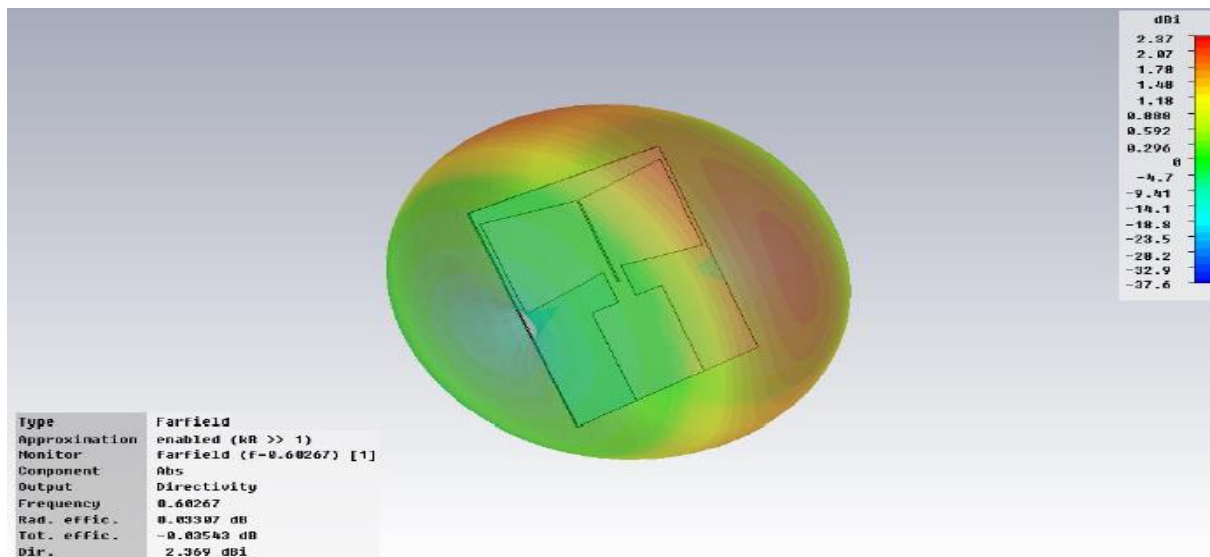


Figura 3.29. Patrón de radiación en tres dimensiones a la frecuencia central

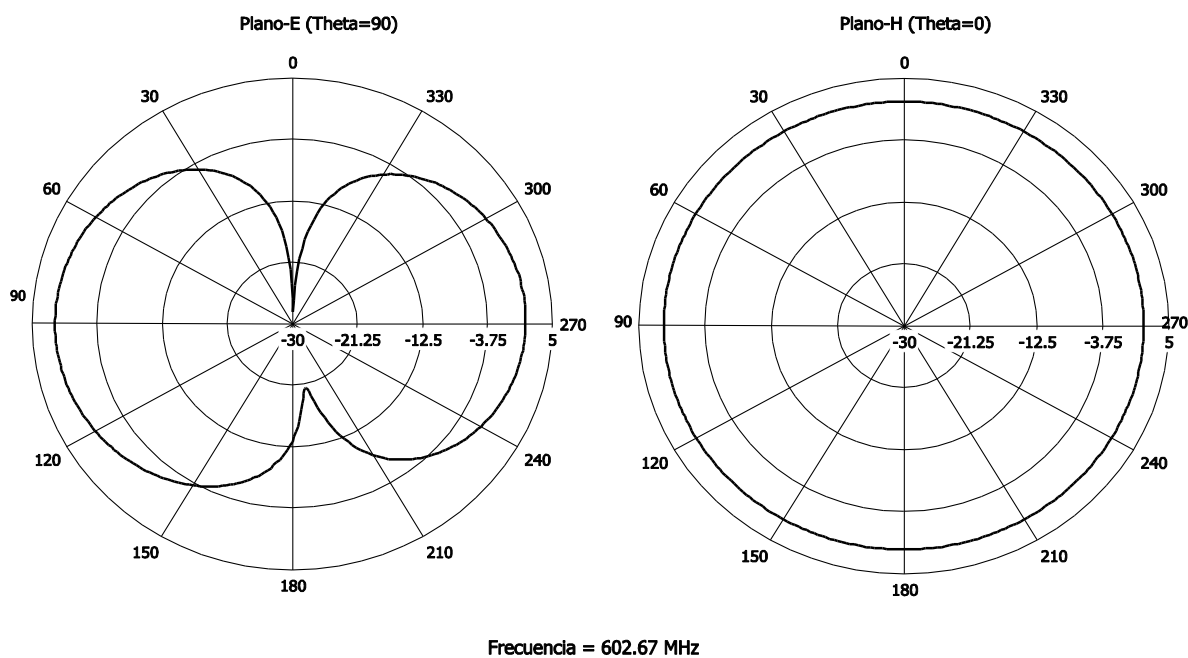


Figura 3.30. Planos principales de radiación a la frecuencia de 602.67 MHz

La eficiencia de la antena para esta frecuencia es de -0.035 dB y su ganancia en la dirección de máxima propagación es de 2.37 dB.

La figura 3.31 ilustra el diagrama de radiación en la frecuencia superior del ancho de banda. La ganancia en la dirección de máxima propagación es de 2.46 dBi y eficiencia de -0.1939 dB para la frecuencia de 691.75 MHz.

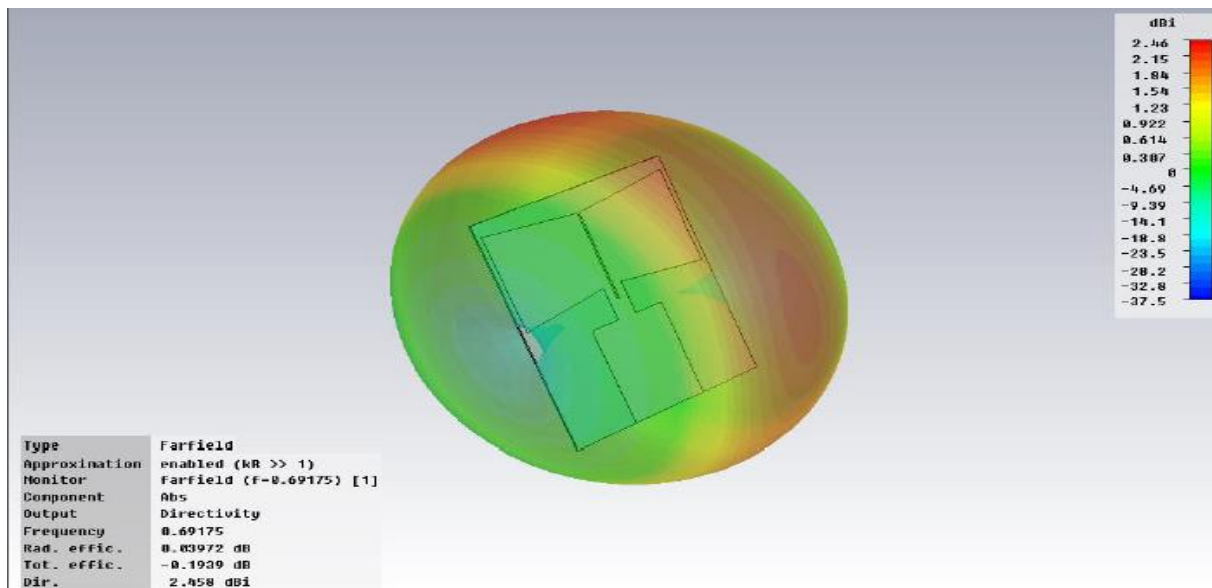


Figura 3.31. Diagrama de radiación en tres dimensiones en la frecuencia de 691.75 MHz

Finalmente, la figura 3.32, ilustra los cortes principales del patrón de radiación a 691 MHz, en el que se observa que el dispositivo también es omnidireccional en la banda superior del espectro de TDT.

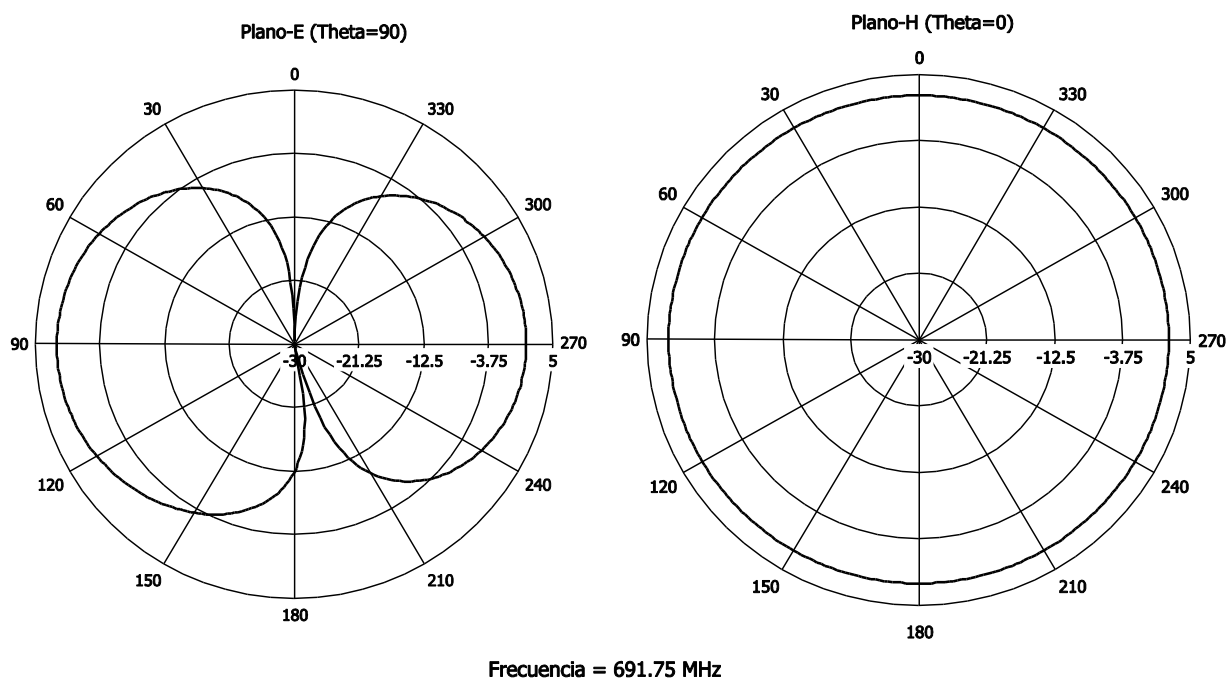


Figura 3.32. Planos principales de la antena a la frecuencia superior de TDT

A lo largo de este capítulo, se estudió el comportamiento de la antena. Se realizó un análisis por partes y se muestra la propuesta final optimizada para cubrir el espectro asignado a la televisión digital. Con todo este análisis se expone a modo de conclusión que:

La antena es alimentada por una microcinta impresa en la parte superior del sustrato, a la vez que ofrece al radiador alimentación balanceada. Así mismo, ocupa un transformador de lambda cuartos para el acoplamiento de la impedancia característica del radiador y el equipo de medición, debido a que la impedancia que maneja el equipo de medición es de 50Ω y la del radiador es de aproximadamente 80Ω .

El dipolo impreso, basado en las referencias y al análisis matemático, ofrece un ancho de banda más angosto al que se requiere para los servicios de TV digital. Esto llevó a estudiar el comportamiento de la antena con la modificación de las longitudes del dipolo, tomando las mejores opciones para el comportamiento de la estructura en el espectro deseado. Finalmente, el plano de tierra, se consideró para la propuesta de un dispositivo omnidireccional por lo expuesto en la sección 2.6.

Capítulo 4.

CONSTRUCCIÓN Y

CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA

~

En el capítulo 2 se analizaron las estructuras comúnmente ocupadas para televisión analógica, tomando en cuenta ventajas y desventajas de su uso en TV digital, y concluir con la elección una antena. Se continuó en el capítulo 3 con su análisis por medio de simulación, de modo que trabaje eficientemente en el ancho de banda de 513.60 MHz a 691.75 MHz.

La antena impresa con balun integrado ha sido optimizada en CST Microwave Studio para operar en las frecuencias que se desean cubrir. En este capítulo se describe la construcción física y caracterización de la antena; se presentan las técnicas de construcción, los tipos de medición, el análisis de los resultados y una comparativa con los obtenidos de la simulación. En la última parte del capítulo se proponen dos mejoras al diseño que constan de una antena direccional y una antena con etapa de amplificación.

4.1. Construcción de antena pasiva

La construcción se realizó con el material proporcionado por el laboratorio de Radiocomunicaciones de la sección de comunicaciones del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV).

Las técnicas ocupadas para realizar el impreso de la antena son: devastado mecánico y ataque químico. El devastado mecánico, se realiza con un *plotter* que con pequeños cortadores marca el contorno de los elementos metálicos (dipolo, microcinta y balun) y retira el exceso de cobre. Si se extrae todo el cobre con esta técnica, el proceso es tardado y se desgasta la herramienta. Por lo tanto, se utiliza la técnica híbrida. Tomando como referencia la estructura diseñada en CST Microwave Studio, se agregan secciones de cobre para cubrir el total de la placa y se dejan

10 *mm* de distancia entre los elementos de la antena y los excedentes agregados, como se muestra en la figura 4.1.

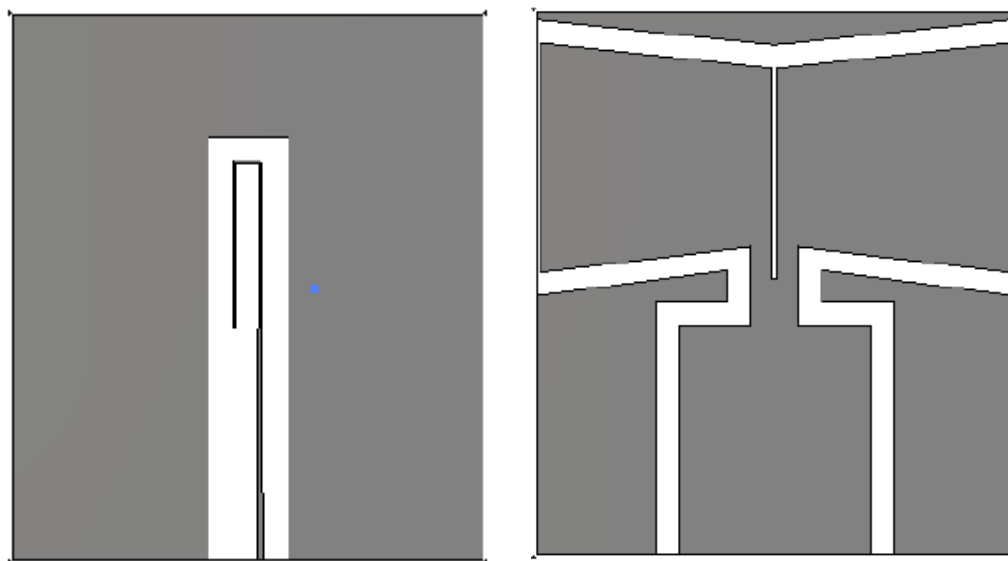


Figura 4.1. Esquema de estructura con excedente de cobre

Se exportan las dos caras del diseño en archivos *gerber*; para poder fabricar la antena se utiliza el software Circuit CAM, en el cual básicamente se configura el diseño para elegir las partes se quieren devastar, además aquí se agregan cuatro referencias que facilitan la construcción y la alineación de las dos caras de la antena.

De este software se exporta un archivo de extensión *.lmd* que es compatible con el software del plotter Proto Mat C30 de la compañía LPKF, en el cual se realizó el devastado mecánico del diseño de la antena mostrada en la figura 4.1. Este proceso se ilustra en la fotografía de la figura 4.2.

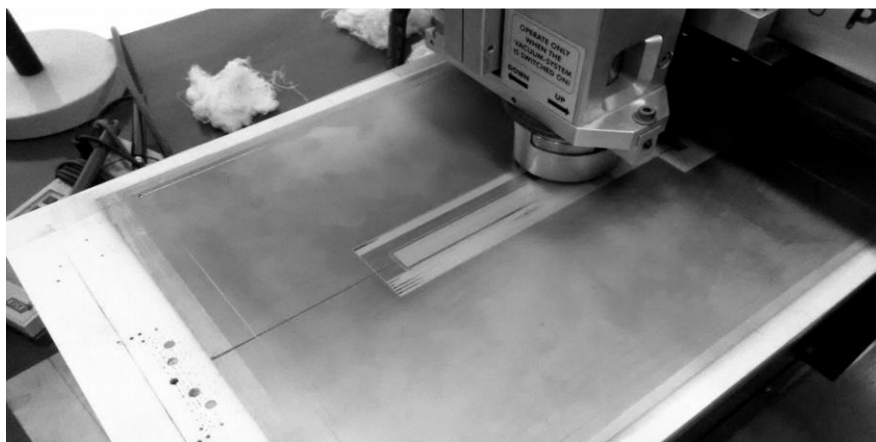


Figura 4.2. Devastado de cobre con plotter

Después, el excedente de cobre es retirado con la técnica de ataque químico, en la que el cobre se remueve por la exposición del circuito a cloruro férrico, los elementos de la antena son protegidos con una capa de barniz, una capa de plumón indeleble y cinta canela. Posteriormente, un conector SMA (*SubMiniature version A*) es soldado a la microcinta de alimentación del radiador con el fin de realizar la caracterización de la antena con el equipo del laboratorio. La estructura final es mostrada en la figura 4.3, a la que se le agrega una capa de barniz en aerosol para evitar la oxidación posterior del cobre.

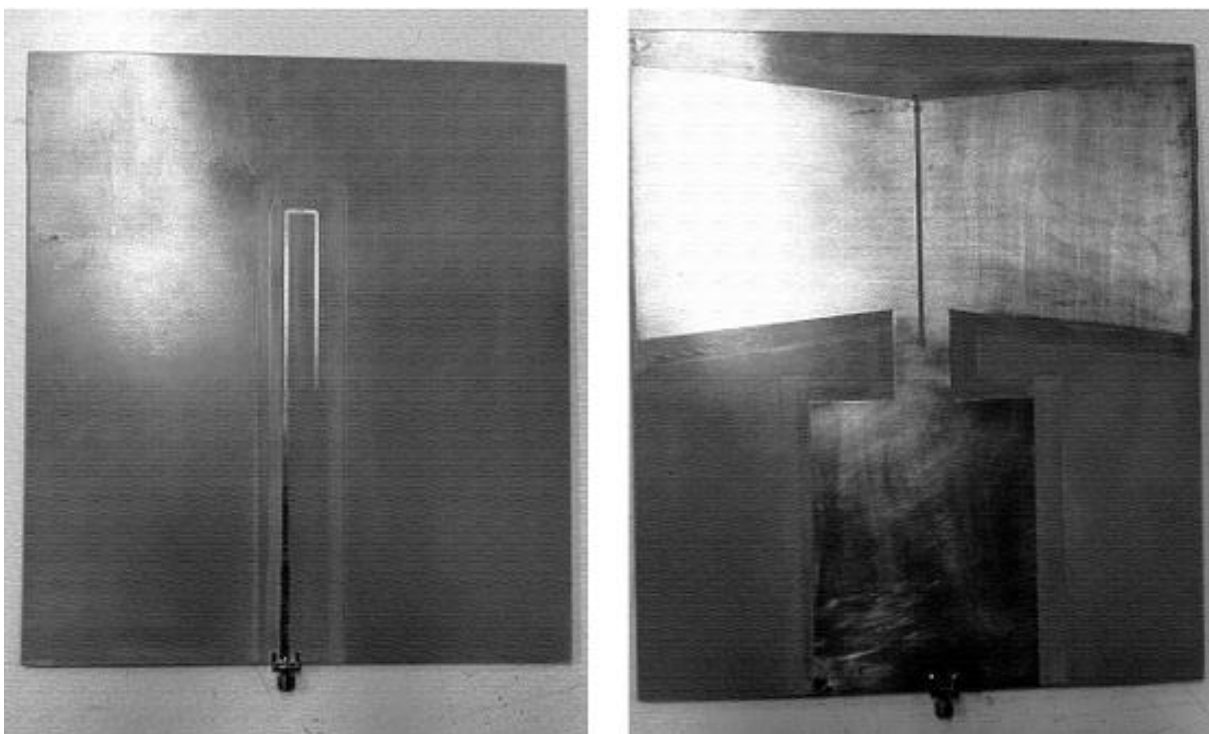


Figura 4.3. Construcción de dipolo impreso con balun integrado

4.2. Caracterización de antenas

Al caracterizar una antena se obtienen los parámetros medibles de forma física de la estructura. El procedimiento para obtener el acoplamiento y la ganancia se puede realizar mediante diferentes técnicas, las más relevantes se exponen en esta sección.

4.2.1. Acoplamiento

El acoplamiento en una antena se puede obtener utilizando un analizador de redes vectorial, en el que se conecta la antena a uno de sus puertos, por ejemplo el puerto 1 y se realiza la medición del parámetro S_{11} .

Para esta medición se usó el analizador de redes marca Agilent FieldFox modelo N9912A, el cual fue previamente calibrado. En la figura 4.4 se muestra la medición de dos prototipos de la antena propuesta así como los resultados de simulación en CST Microwave Studio. Existe una gran convergencia entre los resultados de simulación y los medidos, las pequeñas diferencias se deben fundamentalmente a errores en el proceso de fabricación y a la exactitud de la simulación.

El ancho de banda medido es ligeramente menor, sin embargo, esto no afecta a su desempeño debido a que la frecuencia superior de la TDT asignada hasta el momento es a los 691.75 MHz. Así mismo, dentro del ancho de banda, hay mínimas variaciones que no son consideradas como graves por encontrarse por debajo de -10 dB.

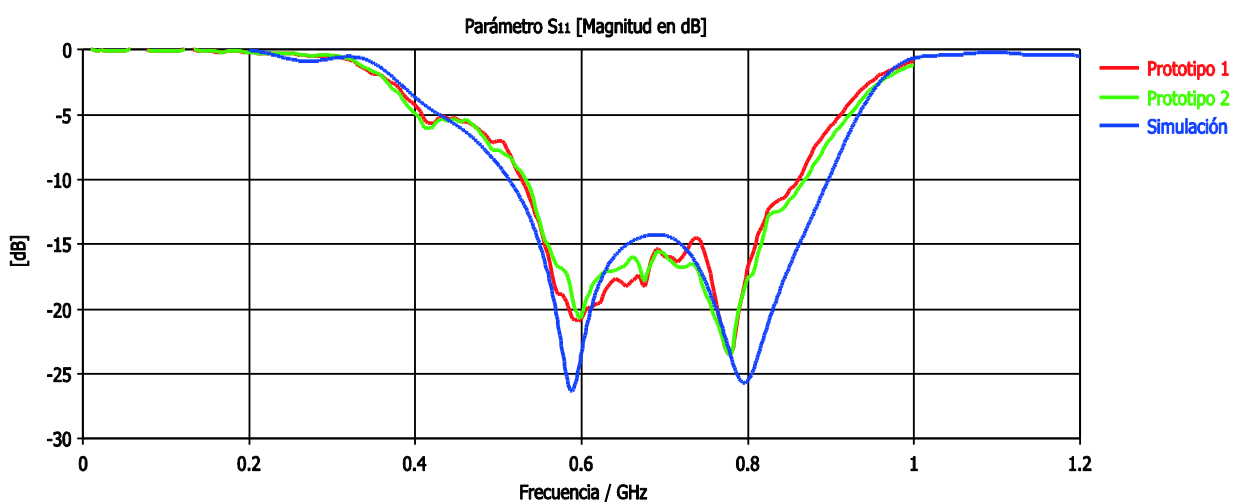


Figura 4.4. Comparativa de acoplamiento de simulación y construcción física.

Una medición relativa del desempeño de la antena se realizó utilizando un analizador de espectros marca ROHDE & SCHWARZ modelo FSL. La antena se conectó al puerto de entrada y se observó el espectro asignado a la television en el espectro de 500 MHz a 700 MHz mostrando la grafica en la figura 4.5. Los resultados muestran la presencia de las señales de TV analógica y de TDT.

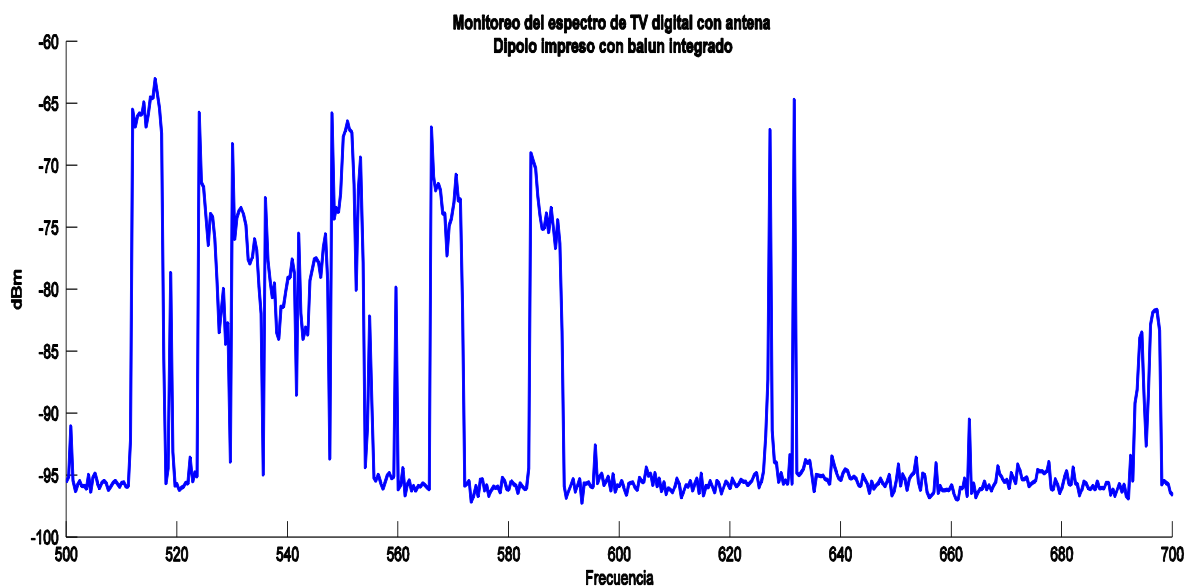


Figura 4.5. Espectro de dipolo impreso con balun integrado

4.2.2. Ganancia

La ganancia es uno de los principales parámetros en el diseño de un radiador, existen varias técnicas de medición que dependen de la frecuencia de operación [12, 14]. Para frecuencias por arriba de 1 GHz se toman condiciones de espacio libre, para frecuencias de 0.1 GHz a 1 GHz es difícil la medición con un modelo de espacio libre y se consideran reflexiones por la tierra; en frecuencias por debajo de 0.1 GHz, se suponen antenas mecánicamente largas, y los efectos de reflexiones en la tierra comienzan a ser más perjudiciales [26].

Se tienen dos métodos comúnmente usados para medir la ganancia del radiador: ganancia absoluta y ganancia relativa. El método de ganancia absoluta basado en el modelo de espacio libre (ecuación de Friis), es comúnmente ocupado para caracterizar antenas, ya que no se tiene conocimiento previo de la ganancia de los radiadores; mientras que, el método de ganancia transferida o de comparación requiere de un conocimiento previo de ganancia para obtener este parámetro de la antena a prueba [23].

El método de ganancia absoluta, tiene 4 técnicas de caracterización de antenas que son:

- a) *Dos antenas.* Dos dispositivos radiadores con características físicas iguales son colocadas a la distancia necesaria para alcanzar las condiciones de campo lejano, para que al simular un modelo de espacio libre, debido a que los diseños son iguales se podrá obtener la ganancia.
- b) *Tres antenas.* Si la ganancia de dos antenas no son iguales, es necesario ocupar la técnica de tres antenas. En la combinación de las tres antenas se realiza el procedimiento anterior para obtener la ganancia de cada radiador y se vuelve un sistema de ecuaciones.
- c) *Extrapolación.* Con la posibilidad de ser aplicada en la técnica de tres antenas, la técnica de extrapolación es creada para tomar en cuenta errores por trayectorias múltiples, proximidad o diferencia de polarización.
- d) *Rango de tierra reflejante.* Ocupado para medir la ganancia de las antenas con ancho de banda de haz a frecuencias por debajo de 1 GHz, toma en cuenta las reflexiones de la tierra.

En la caracterización del dipolo impreso con balun integrado se ocupa el método de ganancia absoluta con la técnica de dos antenas. Para realizar las mediciones, es necesario colocar dos antenas con las mismas características físicas, asumiendo la configuración mostrada en la figura 4.6. La antena A, se usa como transmisor, al conectarla a un generador de señal que emite una señal controlada, mientras que la antena B funciona como receptora y se conecta a un analizador de espectros.

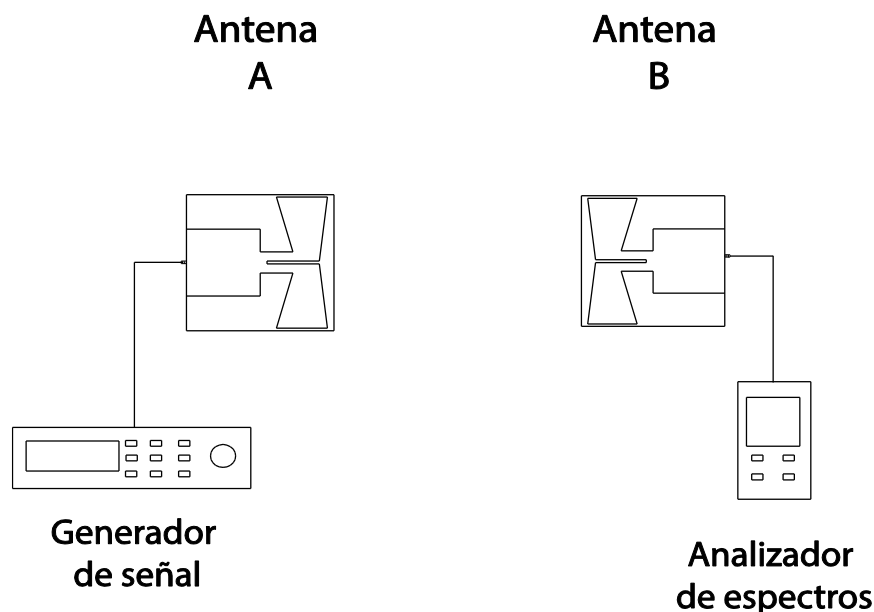


Figura 4.6. Configuración de antenas para medición

R es la distancia que existe entre el transmisor y el receptor. Para considerar únicamente las características de campo lejano, la distancia debe cumplir es:

$$R > \frac{2D^2}{\lambda_o} \quad (4.1)$$

Considerando λ_o como la longitud de onda en el vacío y D es la dimensión más larga de la antena. Bajo la condición de campo lejano, se puede aplicar la ecuación de Friis para obtener la ganancia de la antena, con la ecuación 4.2.

$$P_{r_{dB}} = P_{t_{dB}} + G_{1_{dB}} + G_{2_{dB}} + 20 \log_{10} \lambda_o - 20 \log_{10} 4\pi R \quad (4.2)$$

En la medición, el valor de la potencia de transmisión, la longitud de onda y la distancia son conocidas, por lo tanto, al medir la potencia recibida las incógnitas son las ganancias de las antenas. Las estructuras son iguales (véase la figura 4.6) y la ganancia para ambas antenas es la misma, haciendo una sola incógnita que al final será dividida entre dos, quedando la ganancia de la siguiente forma:

$$G_{1,2_{dB}} = \frac{P_{t_{dB}} + P_{r_{dB}} - 20 \log_{10}(\lambda_o) + 20 \log_{10}(4\pi R)}{2} \quad (4.3)$$

Siguiendo el esquema mostrado en la figura 4.6 y de acuerdo a la ecuación 4.1, la distancia mínima a considerarse es de 36.15 mm ; no obstante, la medición se hace a una distancia de 2.12 mm ; se ocupan tres frecuencias que se encuentran en el espectro de TDT pero no son empleadas para la transmisión de canales comerciales, y con ello se evita la interferencia en la medición. La señal se emite con un generador de señales y con base en la ecuación de Friis, se desglosan las ganancias de la simulación y medición en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Ganancia de antena

Frecuencia (MHz)	Potencia de transmisión en dBm	Ganancia en dBi (simulación)	Ganancia en dBi (medición)
521.5	3.45	1.4	0.5517
602.7	2.83	1.8	1.5202
686.2	2.04	2.09	1.22

La medición se realizó alejándose lo más posible de objetos reflejantes e instalando material absorbente en la trayectoria de reflexión por tierra, para que la antena detecte con mayor intensidad la señal directa. El patrón de radiación en la frecuencia central se obtiene rotando la antena B sobre el centro del dispositivo, cada 5 grados en sentido contrario a las manecillas del reloj; en cada uno de esos puntos, se mide la potencia recibida y se aplica la ecuación 4.3, que al graficarlo de forma polar y en una comparativa con la simulación da como resultado la gráfica de la figura 4.7. En esta figura se puede apreciar una alta convergencia entre los resultados de medición con respecto a los de simulación.

La medición se realizó de la mejor forma posible, para considerar un entorno sin obstáculos, en donde no existan reflexiones e interferencias. No obstante, el patrón presenta mínimas diferencias que no afectan la característica de omnidireccionalidad de la antena. La variación en ganancia es menor a 1 dB, en el intervalo de 513.67 MHz a 690.75 MHz.

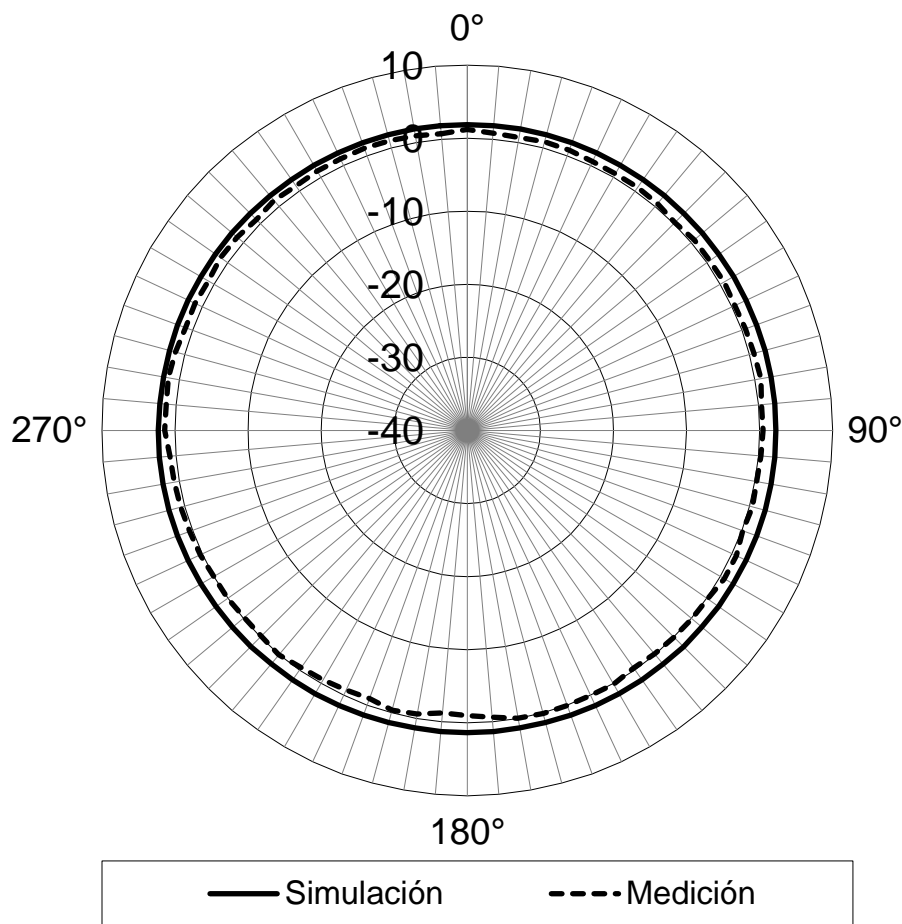


Figura 4.7. Comparación de patrón de radiación de la simulación y la caracterización

4.3. Mejoras al diseño

Para algunos usuarios, es conveniente una antena que además de estar acoplado en las frecuencias de TDT asignadas en el D.F, tenga mayor ganancia aunque se sacrifique omnidireccionalidad, ya sea porque vive en los extremos de la ciudad o en su caso, porque la dirección de las antenas transmisoras sea la misma. Otros usuarios requerirán de la omnidireccionalidad y alta ganancia por obstáculos que se puedan presentar como edificios o cerros.

Para establecer una propuesta a las dos situaciones presentadas, se presentan mejoras al diseño propuesto que incluye un diseño direccional y otro con etapa de amplificación.

4.3.1. Antena direccional

Hasta ahora, la estructura propuesta y caracterizada es una antena omnidireccional acoplada en el ancho de banda de TDT. No obstante, realizar modificaciones sobre la estructura, lleva a proponer un dispositivo direccional para espacios donde es más conveniente contar con este tipo de antena, es lo que se estudiará en esta sección.

La estructura de la antena propuesta (figura 3.23), propone un plano de tierra de 10 veces el ancho de la microcinta de mayor grosor, por cada lado de la misma. Así mismo, la estructura patentada en 1989 [17], propone un elemento reflector que emerge sobre el plano de tierra, a una distancia de un cuarto de longitud de onda del dipolo impreso.

Con dichas consideraciones, se extiende el plano de tierra hasta el final de cada brazo del dipolo y se establece la distancia de $\lambda/4$ entre ellos. La distancia dependiente de la longitud de onda d_t , se calcula con una frecuencia de 513.60 MHz para tener acoplamiento en la mayoría de las frecuencias de TV digital y la radiación se encuentre hacia la misma dirección.

$$d_t = 146 \text{ mm}$$

El resultado de esta modificación se muestra en la figura 4.8, en el que se observa que el ancho de banda es de 362.2 MHz, cubriendo las frecuencias de 524.08 MHz a 887.7 MHz aproximadamente. No obstante, el espectro requerido es de 513.60 MHz a 691.75 MHz, existiendo desacoplamiento en las frecuencias bajas de la banda.

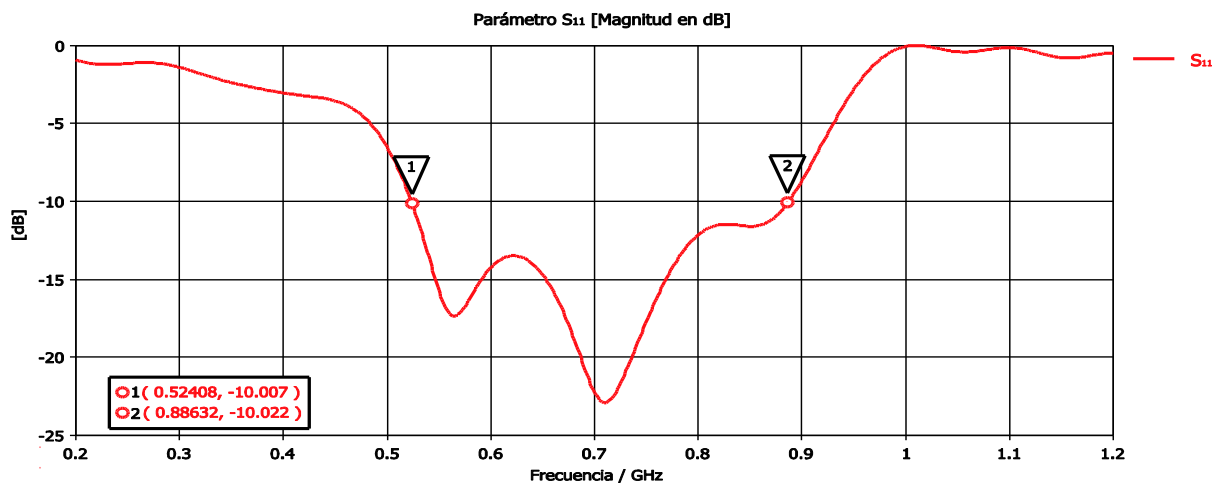


Figura 4.8. Parámetro S₁₁ con expansión de plano de tierra

La diferencia de ganancia es poca y en las frecuencias superiores, la ganancia tiene un valor de 1.34 dBi, como se observa en la figura 4.9 (b), debido a que la dirección de máxima propagación es a los lados de la estructura. Finalmente, la figura 4.9 (a) expone que la máxima ganancia se encuentra en la frecuencia de 585.2 MHz con valor de 4.31 dB.

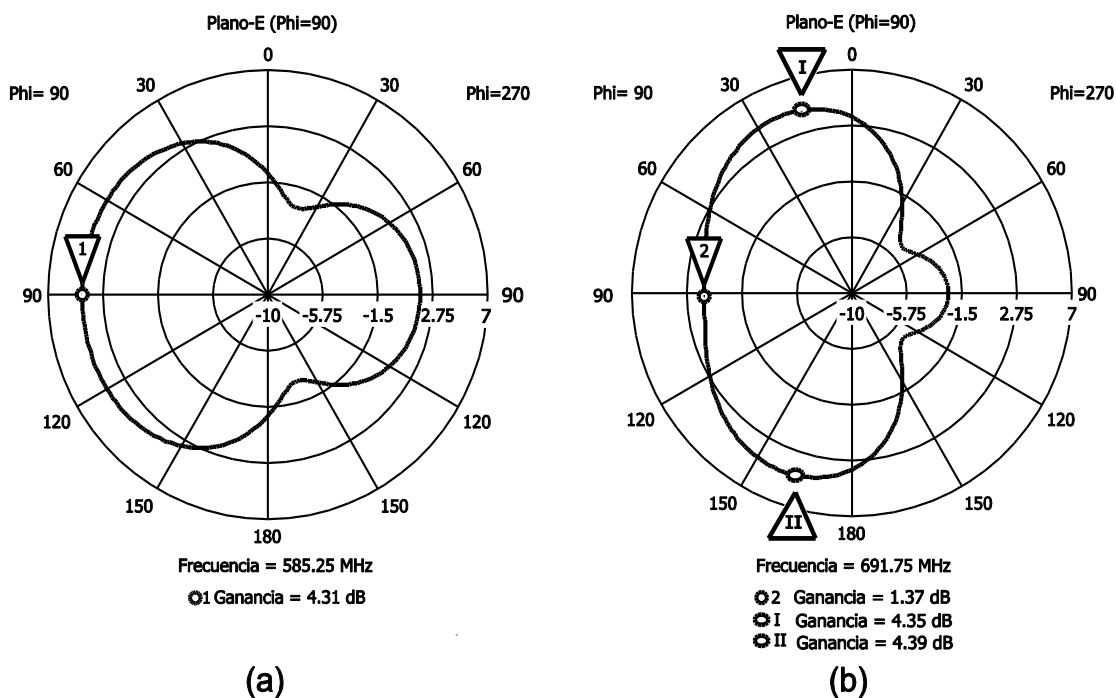


Figura 4.9. Planos de elevación.
 (a) Frecuencia de máxima radiación, (b) Frecuencia superior

Incrementar el ancho del plano de tierra, excediendo la longitud de los brazos del radiador 7 mm modifica el patrón de radiación, dando mayor direccionalidad a la antena y ganancia de hasta 5.68 dB. Así mismo, la ganancia disminuye si el dipolo se encuentra a la distancia marcada por d_t dándole el valor final de 76.19 mm. En la figura 4.10 se muestra la diferencia de ganancia en la frecuencia más alta de TDT al modificar la distancia d_t .

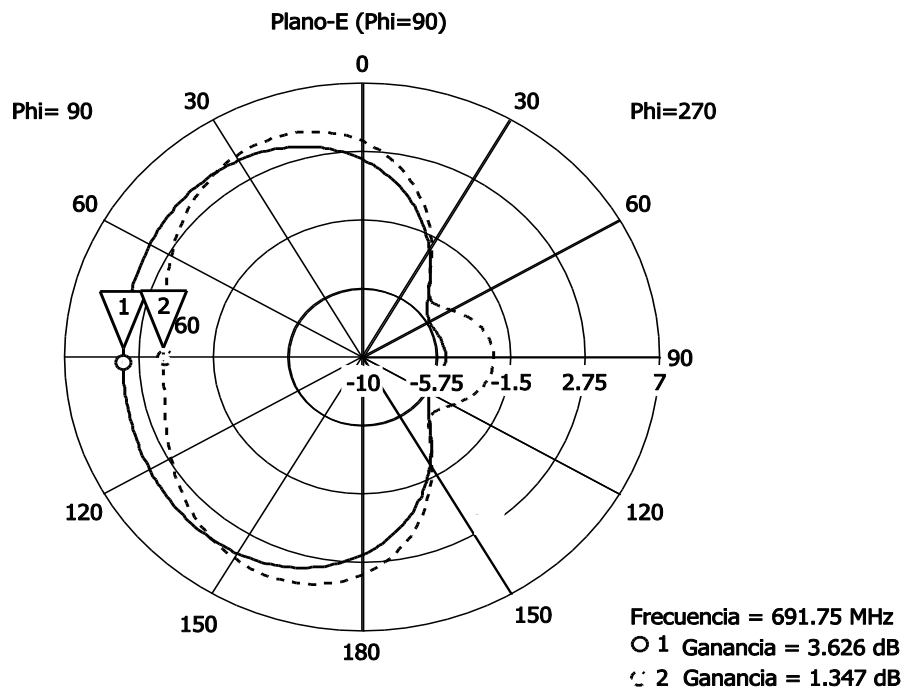


Figura 4.10. Comparativa de plano-E en 691.75 MHz

La frecuencia más baja en el ancho de banda de TV digital es de 513.60 MHz, que como se observa en la figura 4.8 no se encuentra acoplada. Extendiendo los brazos del radiador 12 mm y dando el valor del ancho $a_{int} = 70.84 \text{ mm}$ (véase la figura 3.14) se logra el acoplamiento en dicha frecuencia, con el parámetro S_{11} que se observa en la figura 4.11, por lo que las medidas de la estructura direccional propuesta se muestran en la figura 4.12.

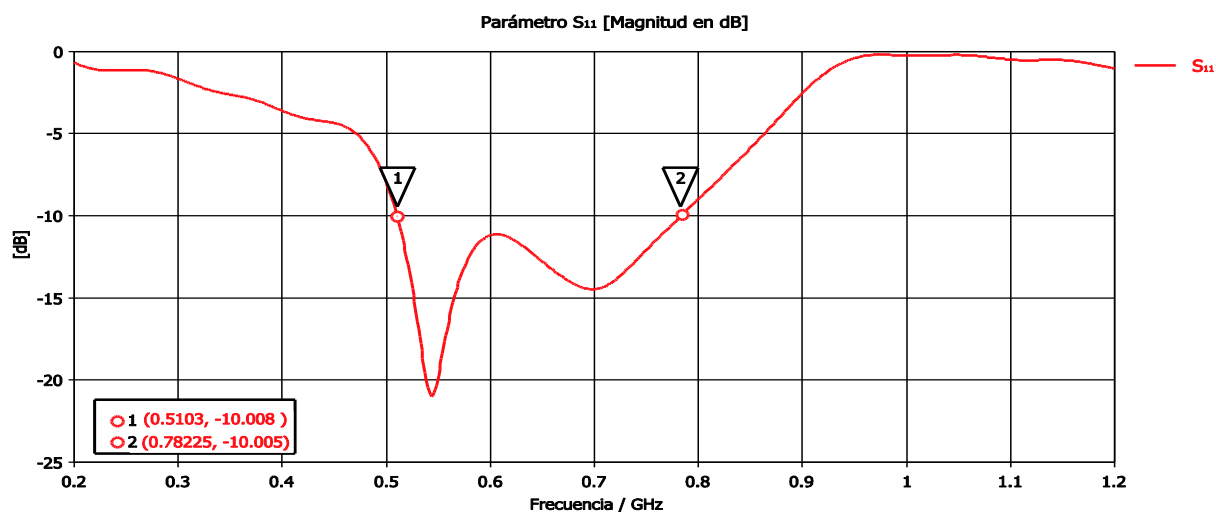


Figura 4.11. Acoplamiento de antena direccional

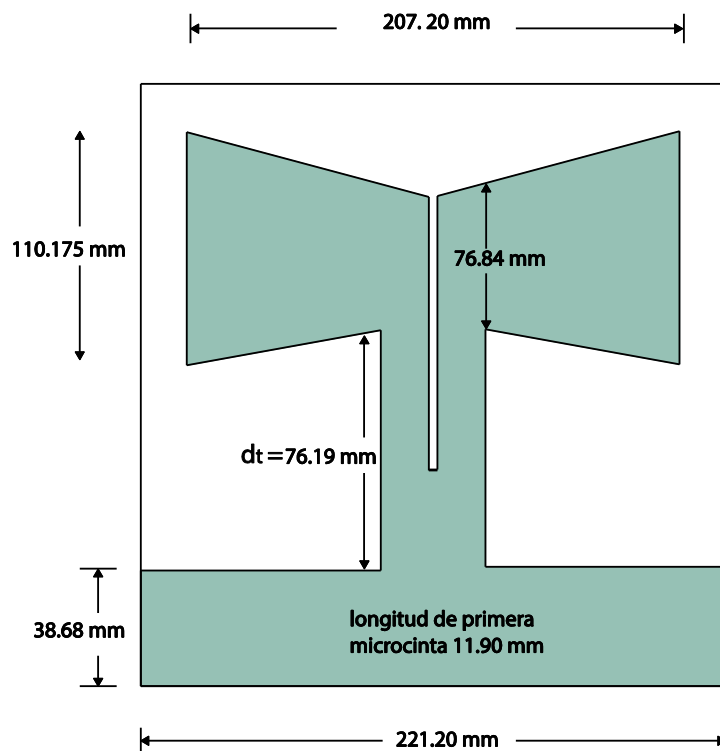


Figura 4.12. Esquema final de antena direccional

La figura 4.13(a) muestra el plano de elevación en 513.6 MHz, en este caso hay mayor radiación entregada en la parte frontal y trasera de la antena, por lo que la ganancia que se encuentra en la parte frontal de la estructura es de 3.32 dB, que es mayor que la de la antena omnidireccional. El inciso (b) ilustra el mismo plano a la frecuencia de 567.25 MHz y la antena tiene ganancia de 5.68 dB, que es la máxima ganancia alcanzada por el dispositivo en el espectro de frecuencias de TDT. Finalmente, el inciso (c) a la frecuencia de 691.75MHz la ganancia disminuye a 3.62 dB.

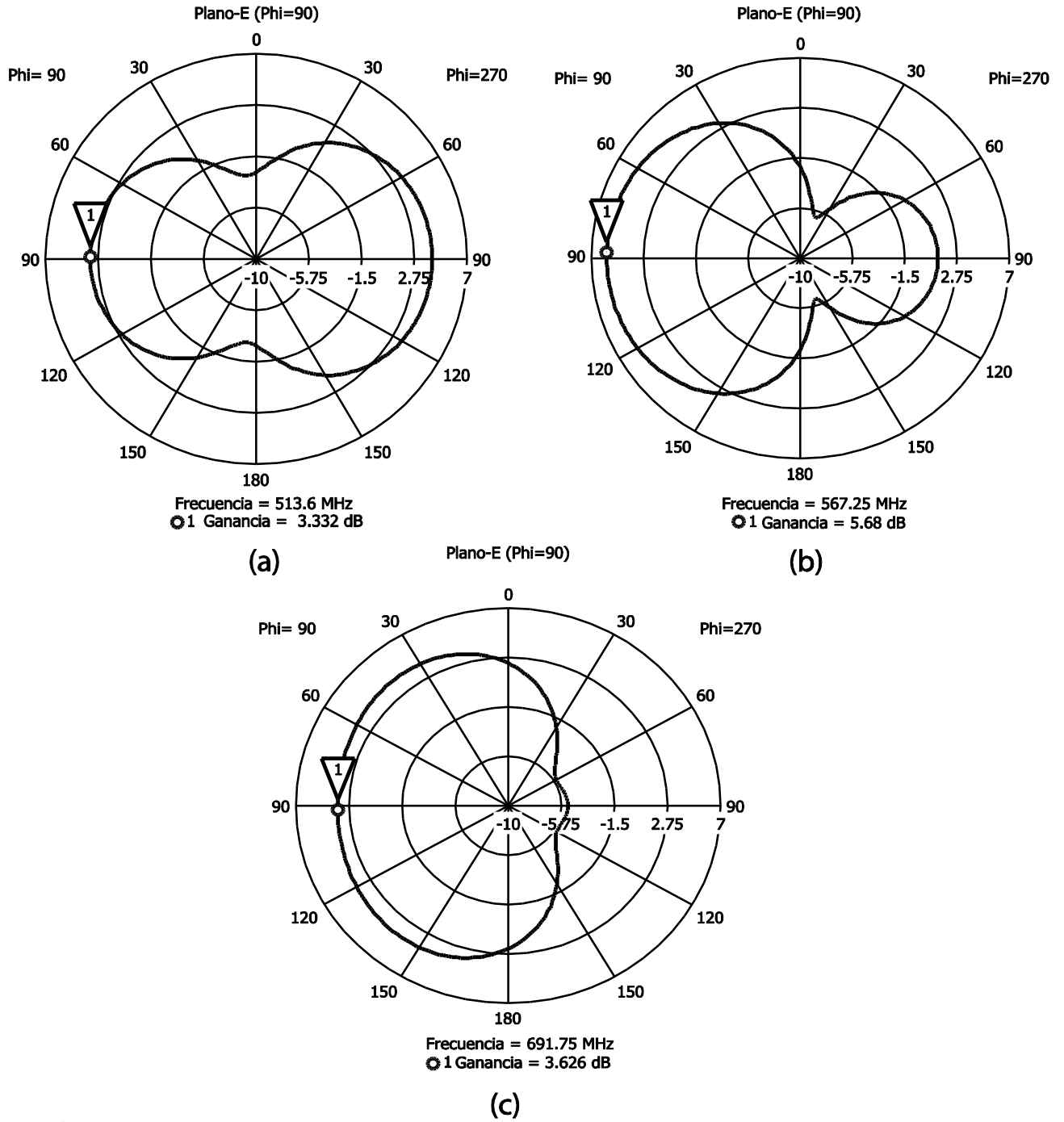


Figura 4.13. Planos de elevación. (a) Frecuencia mínima de TV digital. (b) Frecuencia de máxima ganancia. (c) Frecuencia máxima de TV digital.

El patrón de radiación en la frecuencia central junto con la estructura de la antena se muestra en la figura 4.14, la ganancia máxima es de 5.69 dB en la parte superior de la antena

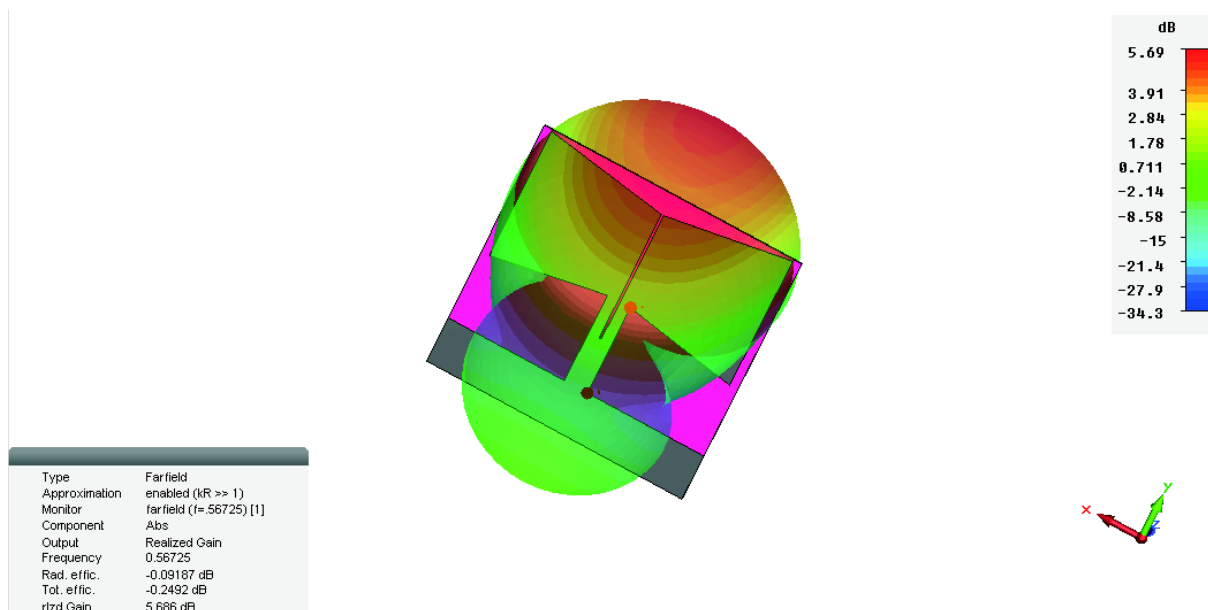


Figura 4.14. Esquema en tres dimensiones de antena direccional

4.3.2. Etapa de amplificación

Los niveles de potencia detectada en la antena del receptor pueden variar en un intervalo muy amplio, estos niveles se encuentran en función de la potencia radiada por las antenas transmisoras, contando con una señal útil y varias señales interferentes. Las señales interferentes provienen de radiotransmisores de otros sistemas de radiocomunicaciones y de radiodifusión; así como de diferentes equipos, sistemas y dispositivos que emplean energía eléctrica para su funcionamiento [27].

Las antenas activas son acompañadas de un circuito responsable de modificar en algún parámetro la señal obtenida, que puede ser amplificada, combinada o mezclada. En el caso de la propuesta de antena impresa con balun integrado, se le agrega una etapa de amplificación que incremente la ganancia de la antena para la recepción de señales de TV.

4.3.2.1. Amplificadores de bajo nivel de ruido (LNA)

Un amplificador en un receptor debe ser de bajo nivel de ruido y de alta ganancia de potencia. Además, se necesita alta linealidad debido a que su ancho de banda es relativamente amplio y el conjunto de la señal portadora con las señales interferentes estará presente.

En el receptor de televisión, la señal pasa por varias etapas que degradan la SNR con cierta intensidad, la figura de ruido y la ganancia de cada etapa pueden describirse por la ecuación 4.2, en donde F_1 es la figura de ruido en la primera etapa y G_1 su ganancia. Los factores que continúan son los de las etapas siguientes.

$$F_T = F_1 + \frac{F_1}{G_1} + \frac{F_1 F_2}{G_1 G_2} \dots + \frac{F_N}{G_1 G_2 \dots G_N} \quad (4.2)$$

Puede observarse que el factor F_1 influye en mayor grado a la figura de ruido total del sistema que se denota como F_T , por lo tanto, el primer elemento del receptor es crucial para su desempeño. Con ello, es necesario que el amplificador cuente con bajo nivel de ruido y proporcione ganancia de potencia a la señal recibida por la antena.

4.3.2.2. Selección de amplificador

En los sistemas de difusión, el transmisor cubre un área muy grande y el límite de área de servicio está determinado por la SNR necesaria para que la reproducción de los canales digitales se lleve a cabo. Sin embargo, existen puntos de la ciudad en los que la señal es tan pequeña que el receptor obtiene la señal con la potencia mínima de 15 dB para que el equipo receptor decodifique los datos [28].

Una propuesta para garantizar una elevada SNR es ocupar el amplificador modelo RAMP-33LN+ de la empresa Mini-Circuits (hojas de especificaciones en el anexo 1). El amplificador trabaja en un intervalo de frecuencias de 50 MHz a 3000 MHz ofreciendo ganancia aproximada de 20 dB en el espectro de televisión digital. El voltaje de alimentación manejado por el fabricante es de 3V o 5V y en la figura 4.15 se observa el nivel de ganancia que depende del voltaje de alimentación proporcionado y de la frecuencia de operación como se observa en la figura 4.15.

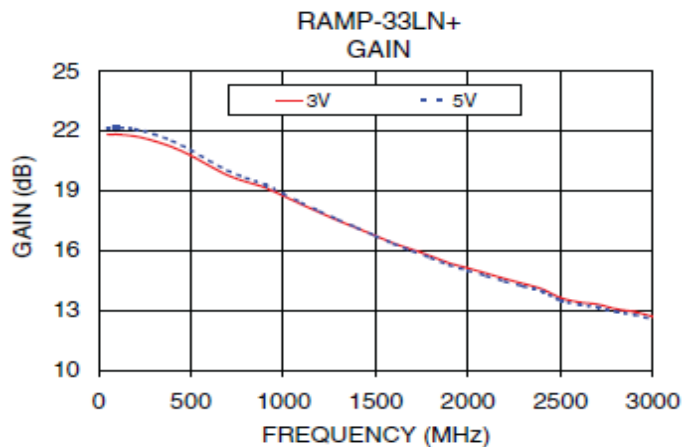


Figura 4.15. Nivel de ganancia del amplificador

El dispositivo cuenta con una figura de ruido máxima de 1.4 dB en la frecuencia de operación de la antena, dependiente también del voltaje de alimentación, el ruido que se puede generar por el amplificador es mínimo, esto se muestra en la figura 4.16.

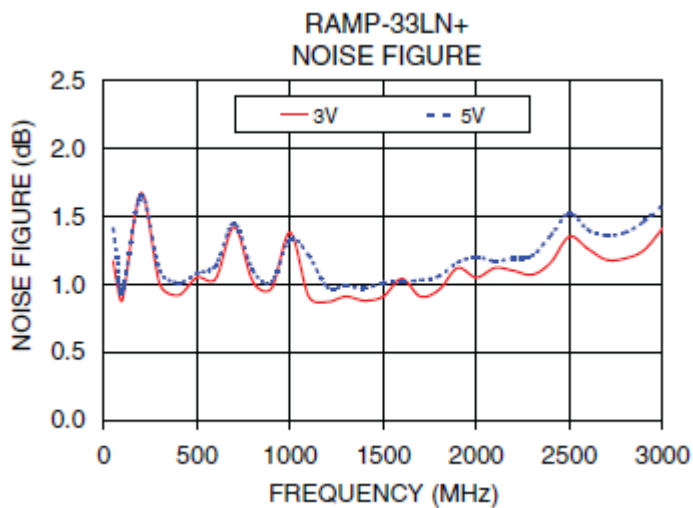


Figura 4.16. Figura de ruido del amplificador

El amplificador se sitúa en la microcinta con impedancia Z_p de 50Ω (véase la figura 3.17) para lograr el acoplamiento adecuado con el amplificador ya que este usa impedancias de entrada y salida de 50Ω .

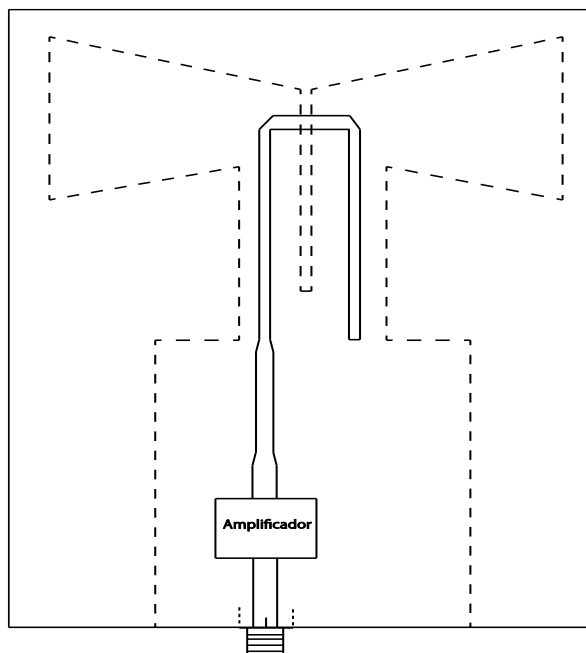


Figura 4.17. Esquema de antena activa

En la figura 4.17, se muestra un esquema del diseño final de la antena activa con amplificador. El radiador detecta las señales emitidas por las televisoras, que al llegar a la tercer microcinta entra al amplificador y suministra a la señal una ganancia en potencia de aproximadamente 20 dB. La elección del amplificador fue basada en el ancho de banda del dispositivo, su bajo costo, por ser de montaje superficial, nivel de alimentación, ganancia de potencia y bajo nivel de figura de ruido.

El diseño final de la antena es mostrado en la figura 4.18, la alimentación se suministra en la parte frontal de la antena, los orificios en el plano de tierra comunican los pines del amplificador que requieren de conexión a tierra. Es necesario destacar, que el amplificador es un dispositivo sensible a la electrostática, por lo que debe tenerse cuidado en el momento de emplearlo.

La alimentación del amplificador se ha realizado con dos pilas alcalinas AA, brindando voltaje de 3V. No obstante, la figura 4.19 muestra qué: con una alimentación de 0.35 V la antena cuenta con ganancia de 6 dBm por arriba de la señal recibida por la antena pasiva. Lo que permite afirmar que la antena continuará trabajando hasta llegar a este nivel de voltaje de alimentación.

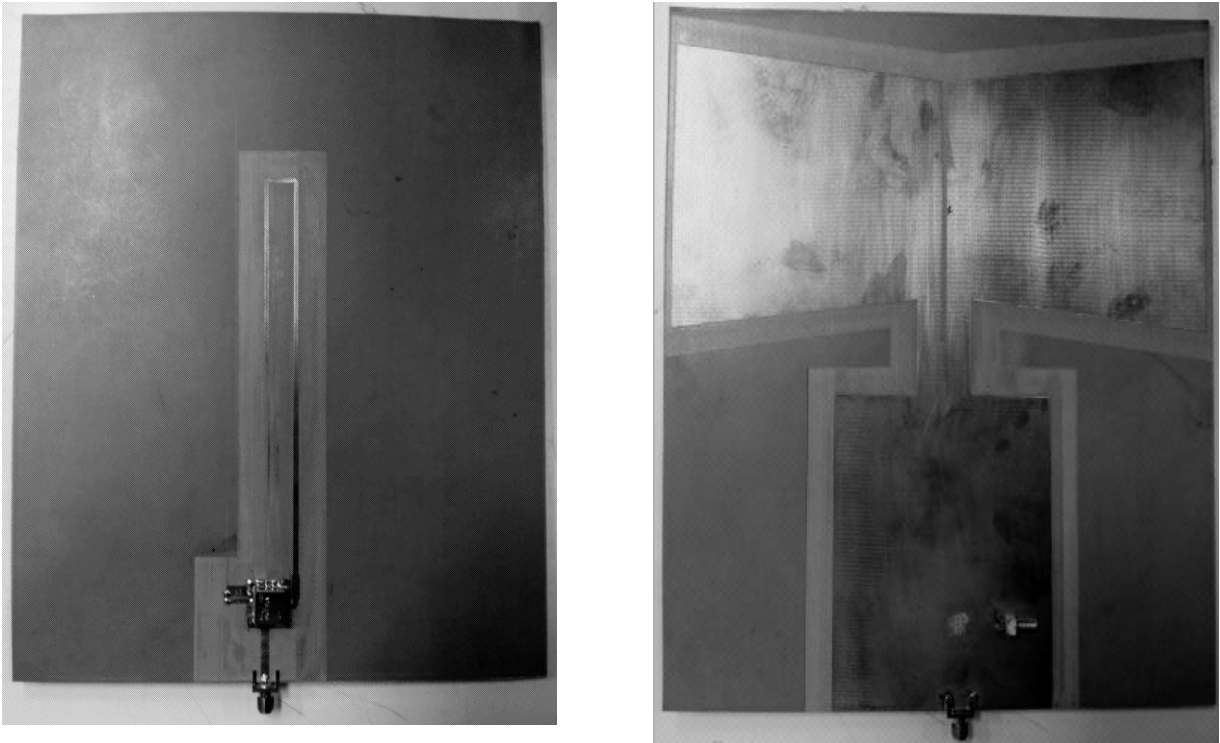


Figura 4.18. Construcción de antena activa

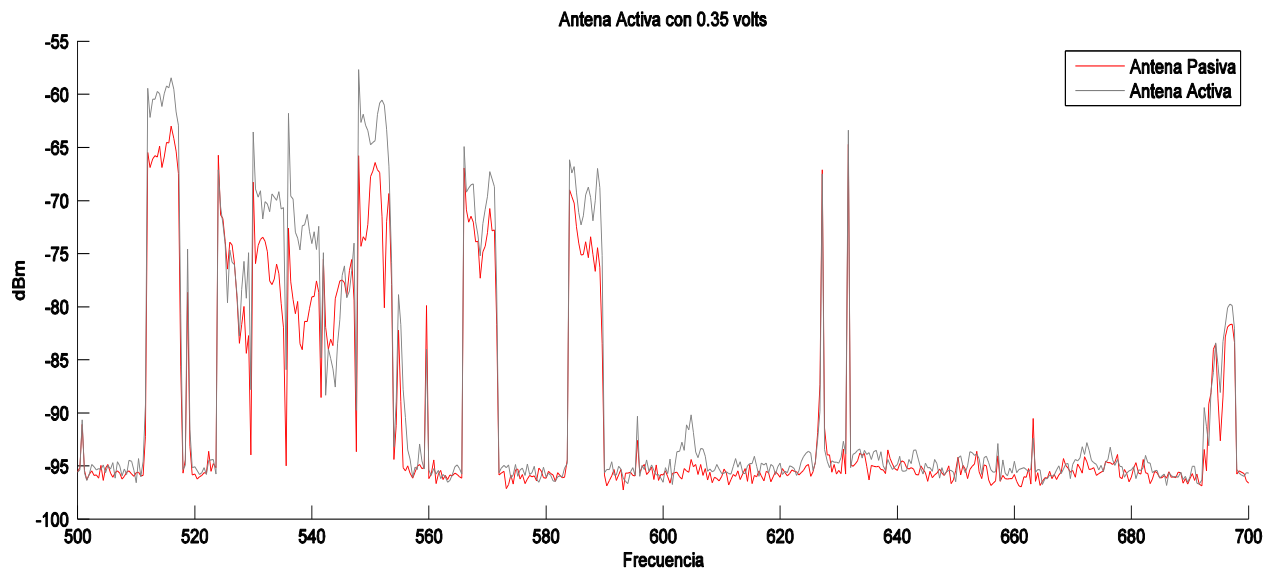


Figura 4.19. Comparativa de espectro de antena pasiva con antena activa

Finalmente la figura 4.20 (a) y 4.20 (b) muestran el nivel de amplificación en amplitud en 4 V y 5 V, respectivamente, alcanzando un nivel de ganancia aproximada de 20 dBm.

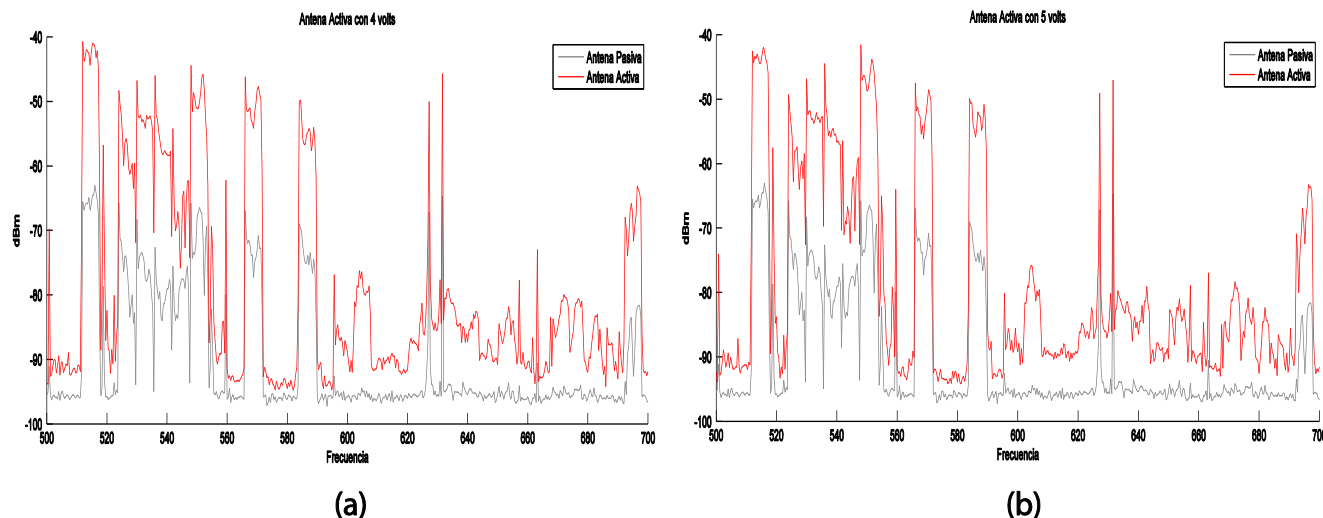


Figura 4.20. Espectro de antena activa con alimentación de (a) 4V y (b) 5V

4.3.2.3. Nivel de ganancia

Siguiendo el esquema de la figura 4.5, el dispositivo activo es conectado como la antena B, detectando la señal y enviándola al analizador de espectros, los niveles de potencia recibida se toman en las tres frecuencias usadas para la caracterización de la antena, resultando en la amplificación del orden aproximado de 18 dB. En la tabla 4.2, se muestran las frecuencias a las que se realizó el cálculo de ganancia y su comparación con la antena pasiva.

Tabla 4.2. Comparación de potencia recibida por antena pasiva y activa

Frecuencia (MHz)	Ganancia de la antena pasiva (dBi)	Ganancia de la antena activa (dBi)
521.5	0.55	19.29
602.7	1.52	20.02
686.2	1.22	17.63

Así mismo, se realizó una prueba del dispositivo al conectar la antena a cuatro receptores televisivos en distintos puntos de la Ciudad de México. Esta medición es subjetiva, ya que puede presentar variaciones dependientes de la ubicación geográfica de los receptores; en todos los casos, la antena se situó al extremo derecho del televisor y se realizó la comparativa con las antenas ocupadas comúnmente para la detección de canales digitales.

Las antenas con las que se comparó el dipolo impreso con balun integrado, se colocan en ventanas o en el exterior y en la tabla 4.3 se muestra la comparativa de lo detectado en estos cuatro puntos.

Tabla 4.3. Comparativa de antenas conectadas al aparato receptor televisivo.

Ubicación del receptor televisivo	Total de canales detectados por la antena ocupada por el receptor	Total de canales detectados por el dipolo impreso con balun integrado	Total de canales detectados por el dipolo impreso con balun integrado con amplificación
Colonia Peralvillo Delegación Cuauhtémoc	18	22	23
Colonia Gabriel Hernández Delegación Gustavo A. Madero	18	21	22
Colonia Loma la Palma Delegación Gustavo A. Madero	15	17	17
Colinas de San José Tlalnepantla Estado de México	3	25	26

Con esto, se afirma que la antena impresa con balun integrado es eficiente para captar las señales en el espectro de televisión digital en la Ciudad de México.

Con las mediciones realizadas hasta ahora, se asevera que los resultados de la caracterización del dipolo impreso con balun integrado convergen al comportamiento esperado del dispositivo, lo que permite concluir que el diseño de la antena impresa para los servicios de televisión digital en la Ciudad de México se hizo de forma correcta.

Finalmente, el diseño direccional abre el panorama de implementación del diseño de la antena para servicios de TDT, incrementando la ganancia y dejando de lado la omnidireccionalidad del dispositivo. Sin embargo, éste no es el único camino para aumentar la ganancia, otro camino es la etapa de amplificación presentada en este capítulo, en el que la antena conserva la omnidireccionalidad de la potencia radiada e incrementa la ganancia del dispositivo. Se confirma que el diseño es correcto, lo que es respaldado por su caracterización.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO



Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido proponer antenas de radiofrecuencia para los servicios de televisión digital en el Distrito Federal, a través del diseño asistido por computadora hasta llevarlo a la implementación física.

Para cubrir el objetivo, se inició con un análisis teórico de la difusión de las señales de televisión. En el capítulo 1 se resaltaron las características de la televisión analógica y la televisión digital, enfatizando que el procesamiento de imagen y sonido en el receptor de televisión se realiza de forma distinta en cada tecnología.

Un tema importante en la transición de tecnologías, es el espectro de frecuencias asignado al servicio, mientras que la televisión analógica en el D.F. maneja un intervalo de frecuencias de 55.25 MHz a 631.75 MHz, actualmente la televisión digital ocupa frecuencias de 513.6 MHz a 691.75 MHz, utilizando el mismo ancho de banda de canal de 6 MHz. La TDT ofrece ventajas como: mejor calidad de imagen y sonido, mayor número de emisiones televisivas dentro del mismo ancho de banda y servicios adicionales (imágenes panorámicas, subtítulos, selección de idiomas).

La antena receptora, es la responsable de la detección de las señales en el espacio, ésta debe tener alta eficiencia para distinguir las portadoras de la TDT de un conjunto de señales propagándose en el espacio. El desempeño de la antena se determina por parámetros fundamentales, como son: directividad, ganancia, impedancia de entrada, ancho de banda y patrón de radiación.

La antena también puede acompañarse de un circuito que proporciona un cambio en amplitud o frecuencia de la señal detectada, refiriéndose a éstas como antenas activas.

El traslape del espectro asignado a la TV analógica y digital, ha permitido a los usuarios ocupar las mismas antenas para la detección de ambas señales. En el capítulo 2 se estudiaron las antenas de uso común para TV como el dipolo, la antena Yagi-Uda, logarítmica, e incluso el dipolo impreso con balun integrado. Se realizó una reseña histórica de los dispositivos, análisis matemático, y diseño en simulación de las estructuras, para mostrar sus principales características como: dimensiones, ancho de banda, patrón de radiación y los planos principales de radiación.

El punto fundamental del trabajo recepcional fue diseñar una antena para interiores del tipo omnidireccional, las antenas Yagi-Uda y logarítmica propuestas en el capítulo 2 son de dimensiones muy grandes y su apuntamiento puede ser engorroso puesto que son antenas directivas.

El dipolo de alambre posee un patrón de radiación omnidireccional, pero fue descartado por el ancho de banda que maneja. El dipolo impreso con balun integrado maneja un patrón de radiación omnidireccional y es grabado en una placa de circuito impreso, lo que da ventajas como la fuerza mecánica de la estructura, dimensiones pequeñas, la posibilidad de una doble banda acoplada que se puede usar para incrementar el ancho de banda, el patrón de radiación omnidireccional y el bajo costo de producción, fue lo que impulsó la elección de esta estructura.

Una vez seleccionada la antena, en el capítulo 3 se presentaron las herramientas de análisis de las líneas de transmisión de microcinta, los criterios para elegir el mejor material y el principio de funcionamiento de las antenas impresas. Además, se realizó el análisis de cada una de las partes que conforman al dipolo impreso con balun integrado que son el radiador, la microcinta de alimentación y el transformador de un cuarto de longitud de onda. Se seleccionó el material RF-45 0620 para el desarrollo de la antena por ser un material barato, fácil de conseguir y con características compatibles para el diseño de la antena de este trabajo recepcional.

El radiador es un dipolo impreso, que con apoyo de la simulación en CST Microwave Studio se analizó variando cada elemento que lo compone a través de un análisis paramétrico, para lograr el acoplamiento deseado. Las medidas del plano de tierra se obtuvieron con las medidas mínimas para que no actuará como plano reflector. La alimentación fue calculada con el análisis

matemático de microcintas, agregando un transformador de $\lambda/4$ con fines de acoplamiento del equipo de medición.

Se observó que la modificación de algún elemento modifica el comportamiento de la antena, variar en dimensiones a la microcinta, el plano de tierra o el radiador traía consigo la necesidad de armonizar a los elementos restantes para no provocar desacoplamiento en la banda asignada a TDT. El punto central de los análisis fue llegar a una parametrización óptima de la antena, y una vez observadas las repercusiones en el acoplamiento al modificar las dimensiones del radiador, se simuló la antena completa en CST Microwave Studio.

Las modificaciones en las longitudes se realizaron principalmente sobre el radiador y el ancho interno y externo de los brazos. Las medidas del plano de tierra y de la microcinta no sufrieron variaciones. Con esto, se logró acoplar la antena en todo el ancho de banda en el que se encuentran las frecuencias de televisión digital conservando el patrón de radiación omnidireccional.

Una vez que se estudió el comportamiento de la antena a nivel simulación, en el capítulo 4 se realizó la implementación física. El proceso para la elaboración de la antena debe ser cuidadoso, aunque se pueden considerar otras técnicas para la fabricación de la antena, se implementó una técnica híbrida que brinda la precisión necesaria para el diseño de la antena de este trabajo recepcional.

Para caracterizar la antena, se fabricaron dos prototipos y asegurando las mejores condiciones posibles para la medición, se obtuvo el acoplamiento usando un analizador de redes del laboratorio de radiocomunicaciones del CINVESTAV. Las variaciones presentadas son mínimas y pueden ser resultado de consideraciones no tomadas en cuenta en la simulación como errores en el proceso de fabricación o la exactitud de la simulación. La respuesta del parámetro S_{11} tiene un comportamiento muy parecido al del software, la diferencia presentada en las frecuencias más altas es mínima y no repercute en la aplicación de la antena.

La medición de ganancia de la antena se realizó utilizando el método de las dos antenas descrito en el capítulo 4. Las ganancias medidas son 0.5517 dBi, 1.5202 dBi y 1.22 dBi para las frecuencias de 521.5 MHz, 602.7 MHz y 686.2 MHz respectivamente. También se realizó

la medición del plano-H del patrón de radiación. Los resultados de los experimentos tienen una gran convergencia con los resultados de la simulación.

Dentro de este capítulo se consideraron mejoras en los parámetros de la antena. La primera es con base en el diseño omnidireccional, se propone una modificación en la estructura para utilizar el plano de tierra como reflector, y así implementar un diseño direccional con ganancia alrededor de 5 dBi.

Finalmente, la segunda mejora, consiste en agregar a la antena un dispositivo amplificador, el cual incorpora una ganancia extra de 20 dB. La medición de la ganancia de la antena activa es de 20.02 dBi en la frecuencia de 602.7 MHz. Además, se realizó una medición relativa con un analizador de espectros, mostrando la comparación de la antena pasiva con respecto a la versión con amplificador, observando una mejora en el desempeño.

De todo lo anterior se concluyen los siguientes puntos específicos:

- ✓ Por la ubicación de las antenas emisoras y la aplicación en interiores, es necesario para algunos puntos de la ciudad un dispositivo omnidireccional, para captar las señales de TV digital.
- ✓ El diseño del dipolo impreso con balun integrado lleva consigo la sencilla manipulación de la antena para su acomodo en interiores sin modificar los elementos de la misma.
- ✓ La parametrización del dispositivo debe hacerse de forma tal, que sólo se modifique el acoplamiento, variar inadecuadamente los elementos puede producir cambios en la impedancia, lo que no dejará resonar al radiador.
- ✓ Los parámetros que fueron medidos de la antena, como son: ganancia, acoplamiento y patrón de radiación, expresan una gran similitud a los resultados del simulador. Lo anterior, permite afirmar que el diseño fue realizado de manera correcta.
- ✓ El dispositivo direccional entrega mayor ganancia, sin embargo, se debe sacrificar la omnidireccionalidad, lo que para algunos usuarios puede ser una desventaja.
- ✓ Una alternativa considerada para no perder omnidireccionalidad y entregar ganancia en la amplitud de la señal recibida es agregar una etapa de amplificación. Debe implementarse un dispositivo que tenga una figura de ruido baja, lo que se realizó de forma correcta en este trabajo, la desventaja es que el diseño es que se utilizan baterías para la alimentación del amplificador.

Trabajo Futuro

La asignación de frecuencias de televisión digital, es un proceso continuo en la ciudad, por lo que pueden agregarse más frecuencias al espectro de TDT. Así mismo, el cambio de tecnología se acompañará de nuevas emisoras del servicio, una mejora a la estructura es el acoplamiento de nuevas frecuencias asignadas a su espectro.

Dentro de las mejoras al diseño propuesto se encuentra la etapa de amplificación aplicado a la antena direccional, proponiendo un diseño de amplificador optimizado para cubrir el ancho de TDT con la menor contribución de ruido. Por otra parte, por el ancho de banda que maneja la antena, puede diseñarse como filtro pasa-banda para su aplicación en sistemas de comunicaciones.

El contexto de este trabajo recepcional fue la propuesta de antenas, para los servicios de televisión digital. Sin embargo, la estructura puede ser empleada en otros sistemas de radiocomunicaciones como Wi-Fi, estaciones base, entre otros; considerando la resistencia mecánica de la antena y su menor tamaño a frecuencias mayores.

REFERENCIAS

- [1] Arnold, John; Frater, Michael; Pickering, Mark. *“Introduction to Analog and Digital Television, Technology and Standards”*. John Wiley & Sons, Inc. Canada, 2007. 644pp.
- [2] Instituto Federal de Telecomunicaciones «IFT». Arias F. José de Jesus. *“Tabla de Asignación de frecuencias TDT en México”*. 2013, [En línea].
Disponible en: <http://www.ift.org.mx/iftweb/>. [Último acceso: 2013 Octubre 2014].
- [3] Moreno, E. F. *“Sistemas de Radio y Televisión”*. McGraw-Hill, 2° ed, 2006. 289pp.
- [4] Pierre, A. *“Historias de la Radio y la Televisión”*. Fondo de Cultura Económica, 2001. 176 pp.
- [5] Pérez, V. Constantino. *“Introducción a los Sistemas Transmisores de Televisión de Transmisión de Televisión”*. Fondo de Cultura Económica, México, 2005. 34pp.
- [6] Morton, V. K. Zworykin. *“Television”*. John Wiley & Sons, New York, 1954. 711-753 pp.
- [7] Wayne, Tomasi. *“Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”*. Prentice Hall, México, 2003.
- [8] Balabam, R. Alvin; Low, L. Michael; Fox, C. Edward. *“Receiver for Analog and Digital Television Signal”*. U. S. Patent 6,369,857. 9 Abr. 2002.
- [9] Advanced Television System Commite, Inc. *“ATSC, Digital Television Standard”*. Washington 3 Ene. 2007.
- [10] Eilers, Carl; Sgrignoli, Gary. *“Digital Television Transmission Parameters-Analysis and Discussion”*. IEEE Xplore, vol. 45, nº 4, 1999. 20pp.
- [11] Huagn, Yi; Boyle, Kevin. *“Antennas from Theory to Practice”*. Wiley, India, 2008. 356pp.
- [12] Kraus, D. John; Marhefka, J. Ronald. *“Antennas. For all applications”*, McGraw-Hill, 3° ed, 2002. 938pp.
- [13] Society, IEEE Antennas and Propagation. *“Standar Definitions of Terms for Antennas”*. 22 Jun. 1983.
- [14] Balanis, Constantine. *“Antenna Theory”*. Wiley, 3rd. Edition, New Jersey, 2005. 1117pp.
- [15] Lin, Jensham. *“Active Integrated Antennas, Transaction on Microwave theory and techniques”*. IEEE. vol. 42, No.: 12, 1994. 2186-2194pp.
- [16] Volakis, L. John *“Antenna Engineering Handbook”*. McGraw-Hill, 4° ed, 2007. 1775 pp.
- [17] Brian, J. Edward; Rees, F. Daniel. *“Microstrip fed Printed Dipole with an Integral Balun”*. Patent US 4,825,220. 25 Abr. 1989.
- [18] Brian, J. Edward; Rees, F. Daniel. *“A Broadband Printed Dipole with Integrated Balun”*. Microwave Jounal, 1987. 339-344 pp.

-
- [19] Anatoly, P. Gorbachev; Mariet, A. Bzhasso. "*The Modified Printed Dipole Antenna*". IEEE 2010.
- [20] Hong, J. Sheng; Lancaster, M. J. "*Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*". John Wiley & Sons, Inc., 2001. 457 pp.
- [21] Garg, Ramesh; Bhartia, Prakash; Bahl, Inder; Ittipiboon, Apisak. "*Microstrip Antenna Design Handbook*", Artech House, Inc. Boston, 2001. 845pp.
- [22] Chen, Z. Ning; Chia, Y. Michael. "*Broadband Planar Antennas Design and Applications*". John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra, 2006. 17-43 pp.
- [23] Stutzman, L. Warren; Thiele, A. Gary. "*Antenna Theory and Design*". John Wiley Sons, Inc., Estados Unidos, 1998, 395-424 pp.
- [24] Willimar, K. Roberts. "*A New Wide-Band Balun*". IEEE, vol. 45, No.: 12, 1957. 628 – 1631 pp.
- [25] Pozar, David M. "*Microwave Engineering*". John Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos, 2012. 735 pp.
- [26] Committee, Antenas Standards. "*IEEE Standard Test Procedures for Antennas*". 15 Dic. 1977.
- [27] Jardón Aguilar, Hildeberto. "*Fundamentos de los Sistemas Modernos de Comunicación*". Alfaomega, México, 2002. 488 pp.
- [28] Wallace, Dennis. "*A Primer for Digital Television RF Facility Design and Construction*". IEEE Transactions on broadcasting, vol. 43, No.: 1, 1997. 3-11 pp.
- [29] Flores Leal, Rubén "*Desarrollo de una antena retrodirectiva activa en la banda de los PCS*". Tesis de Maestria, CINVESTAV México, D.F. 2007.

Anexos

Low Noise Amplifier

RAMP-33LN+

50Ω 50 to 3000 MHz

The Big Deal

- Low Noise Figure, 1.1 dB typ.
- Wide bandwidth, 50 to 3000 MHz
- High IP3, 30 dBm typ.
- Integrated Bias Matching and Stability Circuits



CASE STYLE: CK605

Product Overview

The RAMP-33LN+ (RoHS compliant) utilizes advanced E-PHEMT technology in a single stage low noise amplifier design built into a shielded case (size: .500"x.500"x.180"). The drop-in module offers low noise figure and high output IP3 over the full bandwidth of 50 to 3000MHz, without the need for external matching components. This amplifier supports a wide variety of applications requiring moderate power output, low distortion and 50 ohm matched input/output ports.

Key Features

Feature	Advantages
Wide band high dynamic range	The RAMP-33LN+ covers a wide spectrum of application frequencies from VHF through 'S' band. When combined with the output power and IP3, this amplifier supports a broad array of systems and test applications.
Low NF	With typical 1.1dB NF, the RAMP-33LN+ enables greater sensitivity for receiver applications. It includes all matching and stability circuits making this Drop-in LNA module a turn-key solution for ensuring system sensitivity in demanding applications.
High Output IP3	At +30 dBm IP3, in combination with its low noise performance, the RAMP-33LN+ can improve a systems' spur-free dynamic range which is often the critical driver in many receiver applications.
Power In at 1dB Comp.: +1dBm typ. Input no damage, +13dBm	Provides a good safety margin against damage or saturation from unwanted high power RF signals present at the input to a receiver.
Drop-in Module	Eliminates the need for designers to optimize low noise transistor bias and matching circuitry. The RAMP-33LN+ provides the outstanding combined performance and does not require any external elements. The case PCB area is smaller than most LNA transistor designs with external circuitry.
Metal Case	Provides a protective enclosure improving handling robustness in addition to shielding this sensitive high gain device from close by circuitry.
Unconditionally stable	No adverse effects due to loading of the input and output ports avoiding potential instability which can be a critical requirement when integrating high gain, high frequency devices on an open PCB assembly.



For detailed performance specs & shopping online see web site

P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661 The Design Engineers Search Engine  Provides ACTUAL Data Instantly at minicircuits.com

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp.

Surface Mount Low Noise Amplifier

RAMP-33LN+

50Ω 50 to 3000 MHz

Features

- Wide bandwidth, 50 to 3000MHz
- Low noise figure, 1.1 dB typ.
- Output power, up to +16.5 dBm typ.
- Good output IP3, 30 dBm typ.
- Unconditionally stable

Applications

- Front-end amplifier
- Cellular
- GPS
- Bluetooth



CASE STYLE: CK605
PRICE: \$19.95 ea. QTY (1-24)

+RoHS Compliant

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

Electrical Specifications at 25°C

Parameter	Condition (MHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range		50		3000	MHz
Noise Figure	50 - 3000		1.1	2.0	dB
Gain	100	13.0	22.0		dB
	1000		18.5		
	2000		14.5		
	3000		11.0		
Output Power at 1dB compression	50 - 3000	14.5	16.5		dBm
Output third order intercept point (OIP3)	50 - 3000		30		dBm
Input VSWR	50 - 3000		2.0		:1
Output VSWR	50 - 3000		1.4		:1
DC Supply Voltage			5.0		V
DC Supply Current			70	80	mA

Pin Connections

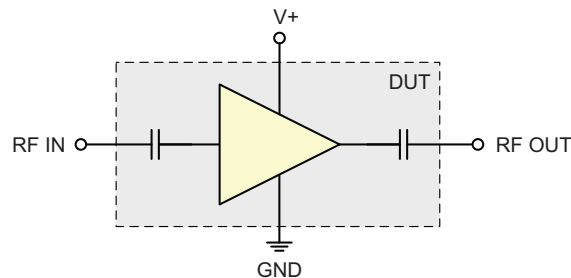
V+	10
RF OUT	14
RF IN	2
GROUND	1,3,4,5,6,7,8,9,11,12,13,15,16

Maximum Ratings

Parameter	Ratings
Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Operating Voltage	5.5 V
Input RF Power (no damage)	+13 dBm
Power Consumption	440 mW

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Simplified Schematic



ESD Rating

Human Body Model (HBM): Class 0 (< 250 V) in accordance with EIA/JESD22-A114-B

Machine Model (MM): Class A (< 200 V) in accordance with EIA/JESD22-A115-A



For detailed performance specs & shopping online see web site

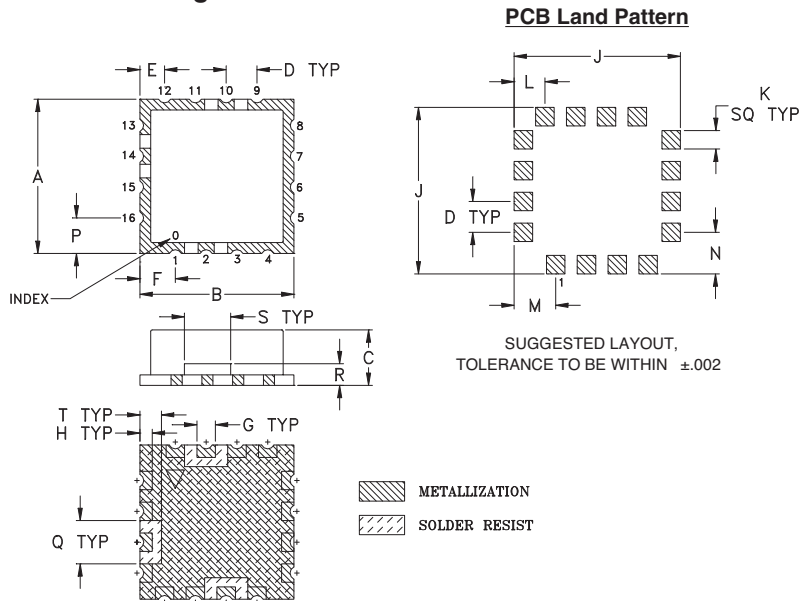
P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661 The Design Engineers Search Engine Provides ACTUAL Data Instantly at minicircuits.com

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp.

REV. B
M134944
RAMP-33LN+
EDR-9084/1AF1
RAV
121021
Page 2 of 4

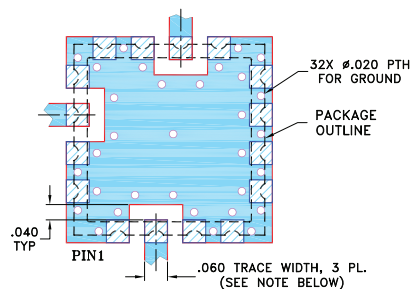
Outline Drawing



Outline Dimensions (inch / mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	wt.
.500	.500	.180	.100	.080	.115	.060	.040	.540	.060	.100	.135	.135	.115	.140	.070	.150	.070	grams
12.70	12.70	4.57	2.54	2.03	2.92	1.52	1.02	13.72	1.52	2.54	3.43	3.43	2.92	3.56	1.78	3.81	1.78	1.0

Demo Board MCL P/N: TB-548+ Suggested PCB Layout (PL-012)

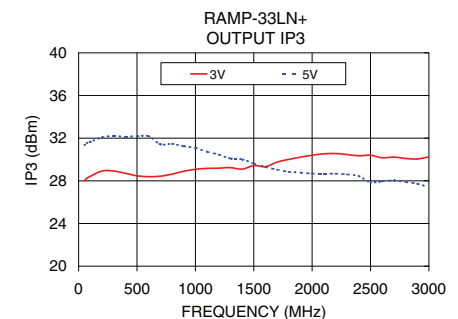
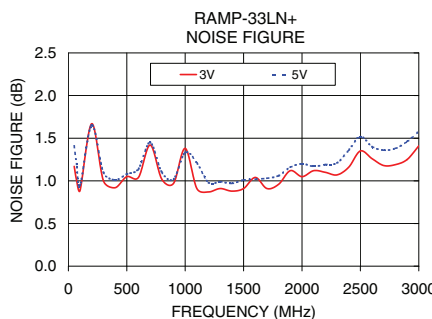
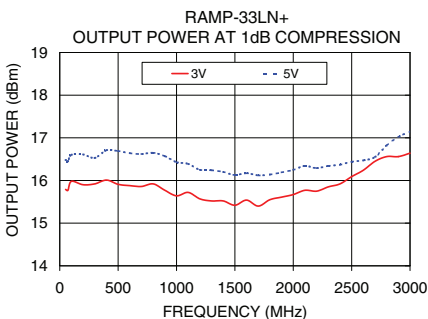
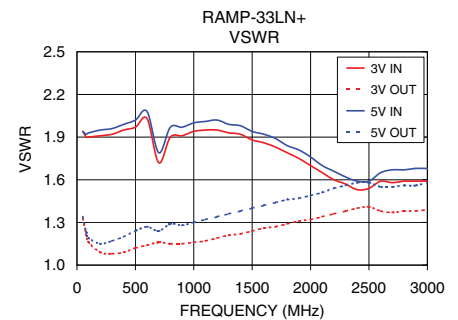
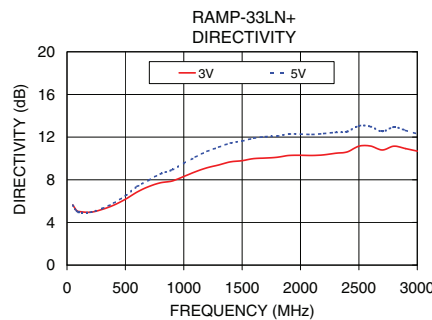
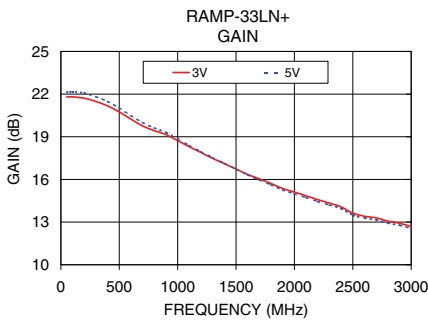


NOTES:

- TRACE WIDTH IS SHOWN FOR FR4 WITH DIELECTRIC THICKNESS $.030" \pm .002"$; COPPER: 1/2 OZ. EACH SIDE. FOR OTHER MATERIALS TRACE WIDTH MAY NEED TO BE MODIFIED.
- BOTTOM SIDE OF THE BOTTOM IS CONTINUOUS GROUND PLANE.

- DENOTES PCB COPPER LAYOUT WITH SMOBC (SOLDER MASK OVER BARE COPPER)
- DENOTES COPPER LAND PATTERN FREE OF SOLDER MASK

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)		DIRECTIVITY (dB)		VSWR IN (:1)		VSWR OUT (:1)		NOISE FIGURE (dB)		P. OUT at 1dB COMPR. (dBm)		IP3 (dBm)	
	3V	5V	3V	5V	3V	5V	3V	5V	3V	5V	3V	5V	3V	5V
50	21.81	22.12	5.64	5.60	1.94	1.94	1.33	1.34	1.17	1.41	15.79	16.48	28.00	31.36
100	21.81	22.16	5.03	4.95	1.90	1.93	1.16	1.19	0.89	0.95	15.98	16.60	28.42	31.66
200	21.71	22.07	4.96	4.95	1.91	1.95	1.09	1.15	1.67	1.65	15.90	16.61	28.92	32.07
300	21.48	21.82	5.22	5.30	1.92	1.96	1.08	1.17	1.00	1.10	15.92	16.53	28.92	32.20
400	21.17	21.48	5.62	5.81	1.95	1.99	1.09	1.20	0.92	1.01	16.01	16.71	28.71	32.13
500	20.75	21.03	6.17	6.50	1.97	2.02	1.12	1.24	1.05	1.08	15.91	16.69	28.47	32.19
600	20.24	20.49	6.85	7.37	2.03	2.08	1.14	1.27	1.04	1.14	15.88	16.64	28.39	32.19
700	19.76	20.00	7.36	7.96	1.72	1.79	1.16	1.24	1.42	1.45	15.86	16.62	28.44	31.43
800	19.43	19.62	7.72	8.55	1.90	1.97	1.15	1.29	1.02	1.10	15.92	16.65	28.63	31.47
900	19.15	19.30	7.88	8.93	1.91	1.97	1.15	1.28	0.97	1.02	15.77	16.57	28.90	31.24
1000	18.73	18.85	8.31	9.54	1.94	2.00	1.16	1.30	1.38	1.33	15.64	16.43	29.08	31.08
1500	16.73	16.73	9.79	11.63	1.88	1.94	1.24	1.40	0.91	1.01	15.42	16.13	29.43	29.63
2000	15.11	14.99	10.30	12.28	1.70	1.76	1.32	1.49	1.05	1.20	15.67	16.25	30.40	28.68
2500	13.63	13.50	11.15	13.06	1.54	1.59	1.41	1.58	1.35	1.52	16.09	16.44	30.40	27.87
3000	12.69	12.54	10.69	12.30	1.59	1.68	1.39	1.58	1.41	1.58	16.64	17.15	30.24	27.40



For detailed performance specs & shopping online see web site

P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661 The Design Engineers Search Engine Provides ACTUAL Data Instantly at minicircuits.com

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp.