



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES



TÍTULO

“DISEÑO VIRTUAL DE UN ARREGLO DE ANTENAS PARA
SISTEMAS DE RADIO COGNITIVA BASADO EN EL
ESTANDAR IEEE 802.22 WRAN”

Tesis de grado previo a obtener el
Título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones.

AUTOR:

Leonel Eduardo Armijos González

DIRECTOR:

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc

LOJA-ECUADOR

2016

CERTIFICACIÓN

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“DISEÑO VIRTUAL DE UN ARREGLO DE ANTENAS PARA SISTEMAS DE RADIO COGNITIVA BASADO EN EL ESTANDAR IEEE 802.22 WRAN”**, previo a la obtención del título de INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, realizado por el señor egresado: **Leonel Eduardo Armijos González**, mismo que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 07 de Septiembre de 2016



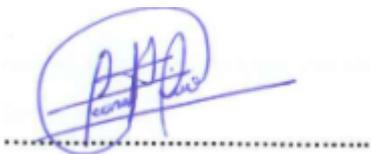
Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg, Sc

DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, **LEONEL EDUARDO ARMIJOS GONZALEZ**, declaro ser el autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cedula: 1105027203

Fecha: 31 de Octubre de 2016

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo **LEONEL EDUARDO ARMIJOS GONZÁLEZ**, declaro ser autor de la tesis titulada: **“DISEÑO VIRTUAL DE UN ARREGLO DE ANTENAS PARA SISTEMAS DE RADIO COGNITIVA BASADO EN EL ESTANDAR IEEE 802.22 WRAN”**, como requisito para optar al grado de: **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los treinta y un días del mes de Octubre de dos mil dieciséis.



Firma:

Autor: Leonel Eduardo Armijos González

Cédula: 1105027203

Dirección: Loja (Las Américas)

Correo Electrónico: leosedu1990@hotmail.com

Teléfono: 3029882 **Celular:** 0981478650

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc

Tribunal de Grado: Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg.Sc

Ing. Diego Vinicio Orellana Villavicencio, Mg.Sc

Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc

DEDICATORIA

Esta tesis quiero dedicar en primer lugar a mi Dios, ya que sin su gracia, bondad y fe nada de esta realidad la estaría viviendo. Él me dio la oportunidad de vivir y de realizarme como persona. Seguidamente a mis padres ya que ellos fueron el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, inyectándome virtudes de responsabilidad, respeto, sinceridad y sencillez, haciéndome una persona de bien. Le pido a Dios que nos regale muchos años más de vida junto a mis padres, para poder seguir admirándolos, aprendiendo de ellos y de alguna manera tratar de recompensar todo el esfuerzo que hicieron por mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios Todopoderoso y a la Virgen del Cisne por brindarme fuerza, salud, fortaleza y vida para superarme como persona. De igual manera a mis padres por todos los esfuerzos realizados, además de su apoyo incondicional.

A la Universidad Nacional de Loja por haberme acogido y formarme profesionalmente.

Al Ing. Andy Vega por su empeño, responsabilidad y apoyo no solo académico sino laboral. Ya que con su entrega se pudo culminar con éxito el trabajo de titulación.

En mi carrera profesional, muchas personas han sido parte de mi trayecto a los que de igual manera me gustaría agradecer por su compañerismo, consejos y apoyo.

TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	pág.
CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA.....	III
CARTA DE AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
TABLA DE CONTENIDOS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	XIV
1. TEMA	1
2. RESUMEN.....	2
3. INTRODUCCIÓN.....	6
4. REVISIÓN DE LITERATURA	7
4.1. ANTENAS	7
4.1.1. Introducción.....	7
4.1.2. Definición y funcionamiento de la antena	7
4.1.3. Clasificación de las antenas.....	8
4.1.4. Estado del arte de Antenas.....	15
4.1.5. Parámetros básicos de transmisión de las antenas.....	17
4.1.6. Agrupación de antenas.....	28
4.1.7. Antenas Microstrip.....	32
4.1.9. Antenas monopolo y Antenas Discónicas	47
4.2. Radio Cognitiva (CR).....	53
4.2.1. Introducción.....	53
4.2.2. Antecedentes de radio cognitiva.	55
4.2.3. Definición de radio cognitiva.	57
4.2.4. Características de radio cognitiva.....	59
4.2.5. Ciclo Cognitivo.....	60
4.2.6. Arquitectura de radio cognitivo (CRN)	62
4.2.7. Estandarización y regulación de la radio cognitiva (WRAN).....	65
4.2.8. Servicios de radio cognitiva para el usuario.	66

4.2.9.	Aplicaciones de radio cognitiva.....	66
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	68
5.1.	Metodología	68
5.1.1.	Fases del proyecto	68
Fase I:	Revisión Bibliográfica.....	68
Fase II:	Escoger geometrías de antenas a estudiar.....	69
Fase III:	Simulación de geometrías escogidas.....	69
Fase IV:	Comparación entre diseños existentes y diseños propuestos en esta investigación.....	70
Fase V:	Presentación de la propuesta final.....	70
5.1.2.	Diseño, dimensiones y materiales de las propuestas	70
5.1.3.	Software utilizado	83
5.2.	Materiales	85
6.	RESULTADOS	86
6.1.	Presentación de los resultados obtenidos	86
6.1.1.	Resultados de la relación de onda estacionaria (ROE), propuesta 1, propuesta 2 y propuesta 3.	86
6.1.2.	Resultados de pérdidas por retorno (S_{1,1}) para la antena propuesta 1, propuesta 2 y propuesta 3	112
6.1.3.	Resultados del patrón de radiación para la antena propuesta 1, propuesta 2 y propuesta 3	119
7.	DISCUSIÓN	128
7.1.	Relación de onda estacionaria	128
7.2.	Pérdidas por retorno	129
7.3.	Patrón de Radiación	130
8.	CONCLUSIONES	133
9.	RECOMENDACIONES	135
10.	BIBLIOGRAFÍA	136
11.	ANEXOS	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	pag
Figura 1. Antenas de cable (hilo). [21]-----	11
Figura 2. Antenas de apertura (bocinas). [21]-----	11
Figura 3. Reflector parabólico. [21]-----	12
Figura 4. Antena microstrip y sus alimentaciones a) Antena Microstrip con sus coordenadas b) Tres configuraciones de alimentación: Alimentación de acoplamiento, Alimentación Microstrip y Alimentación coaxial. [21]-----	13
Figura 5. Antena rectangular sobre un sustrato.-----	14
Figura 6. Agrupaciones de antenas [3]-----	15
Figura 7. Radiación producida por una antena en un barco. El entorno complejo requiere herramientas numéricas de cálculo electromagnético para resolver el problema. [3]-----	15
Figura 8. a) Enlace de radio llevando a cabo la comunicación con la antena transmisora y b) la antena receptora. [4]-----	18
Figura 9. Patrón de radiación de una antena isotrópica con respecto a una antena dipolo. [4]-----	21
Figura 10. Tipos de polarización [1]-----	22
Figura 11. Ancho de banda con dos tipos de conductores. [4]-----	25
Figura 12. Resultado de la simulación de una antena dipolo, incluido el cálculo de la eficiencia de radiación. [4]-----	26
Figura 13. Parámetros del diagrama de radiación [3]-----	28
Figura 14. Ejemplo de un arreglo de antenas bidimensional formado con radiadores microstrip. [10]-----	29
Figura 15 Agrupación lineal de antenas [6]-----	30
Figura 16. Antena Microstrip tipo rectangular [6]-----	33
Figura 17. Formas representativas de elementos microstrip [6]-----	34
Figura 18. Alimentaciones típicas de antenas microstrip [6]-----	34
Figura. 19 Disposiciones de alimentación para arreglos de antenas microstrip. [6]-----	35
Figura 20. Impedancias de alimentación par un arreglo [6]-----	36
Figura 21. Array de patches circulares respaldado por cavidades circulares[6]-----	37
Figura 22. Líneas Microstrip, constante dieléctrica efectiva y líneas de campo eléctrico [6]-----	38
Figura 23. Longitud física y efectiva de la antena patch rectangular-----	40
Figura 24. Patch Rectangular Microstrip y su equivalente circuito del modelo de líneas de transmisión.[6]-----	40
Figura 25. Alimentación de la antena [6],[9]-----	42
Figura 26. Disposiciones de arreglos tanto en el Plano E y H [6]-----	42
Figura 27. Medida y calculo mutuo del acoplamiento entre dos coax-fed antenas microstrip-----	43
Figura 28. Estructura planar de la Antena Log – periódica dentada [39]-----	44
Figura 29. Antena Log-Periódica planar y sus variables [9]-----	45
Figura 30. Antena dipolo Log-periódico [39]-----	46

Figura 31. Antena monopolo [5]	48
Figura 32. Geometría de antenas Biconicas: a) Geometría Biconica, b) Ondas esféricas [40]	50
Figura 33. Patrón de radiación típica de la antena Disconica [40]	50
Figura 34. Elementos de una antena Disconica [40]	51
Figura 35. Configuración de Antena disconica [40]	52
Figura 36. Oportunidades del espectro en espacio, tiempo y frecuencia. [21]	55
Figura 37. Ciclo Cognitivo por Mitola III [38]	60
Figura 38. Underlay vs Overlay [21]	61
Figura 39. Modelo de un sistema de radio cognitivo. [27]	63
Figura 40. Arquitectura de una CRN [33]	63
Figura 41. Topología WRAN [21]	65
Figura 42. Reconfigurabilidad	66
Figura 43. Esquema de un sistema de radiocomunicaciones.	67
Figura 44. Parche Rectangular y sus dimensiones	71
Figura 45. Antena log-periodica planar trapezoidal y la descripción de sus dimensiones	77
Figura 46. Ancho del haz de potencia media vs τ	78
Figura 47. Variables a calcular para el diseño de la antena Disconica	81
Figura 48. Interfaz del simulador HFSS [41]	83
Figura 49. Diagrama de flujo del proceso HFSS [41]	84
Figura 50. Proceso iterativo de creación de la malla [41]	84
Figura 51. Antena Patch Rectangular individual y sus variables	88
Figura 52. Resultados del valor de las variables a una frecuencia de 620MHz	89
Figura 53. Estructura de Antena Rectangular Planar montada en el simulador HFSS	90
Figura 54. Relación de onda estacionaria (ROE), para la antena Rectangular individual	91
Figura 55. Acople de impedancias y separación entre antenas [25]	93
Figura 56. Sintetizador y analizador de líneas de transmisión microstrip [42]	94
Figura 57. Calculadora virtual de líneas de transmisión para una impedancia de 50 ohm	94
Figura 58. Calculadora virtual de líneas de transmisión para una impedancia de 100 ohm	95
Figura 59. Calculadora virtual de líneas de transmisión para una impedancia de 70.7 ohm	95
Figura 60. Estructura del arreglo de antenas rectangulares de tipo 2x2 montada en el simulador HFSS	97
Figura 61. Relación de Onda Estacionaria para el Arreglo de antenas rectangulares	98
Figura 62. Variables que conforman el diseño de un dipolo planar	99
Figura 63. Cálculos arrojados por la herramienta matemática para dipolo planar	100
Figura 64. Estructura del dipolo sobre el sustrato planar montada en el simulador HFSS	101
Figura 65. Estructura del dipolo montada sobre el simulador HFSS y recubierta por una caja de aire y caja de radiación.	101

Figura 66. Relación de onda estacionaria (ROE) para el dipolo planar individual -----	102
Figura 67. Variables y constantes que conforman el diseño de una antena log-periodica-----	103
Figura 68. Cálculos arrojados por la herramienta matemática para la antena log-periódica-----	104
Figura 69. Estructura del arreglo de antenas de dipolos formando una antena log-periodica montada en el simulador HFSS-----	105
Figura 70. Relación de onda estacionaria (ROE) de antena log-periodica -----	106
Figura 71. Modelo de antena Disconica a diseñar y sus variables. -----	107
Figura 72. Cálculos arrojados por la herramienta matemática para el diseño de la antena Disconica -----	108
Figura 73. Antena Disconica montada en el simulador HFSS-----	109
Figura 74. Relación de onda estacionaria de la antena Disconica -----	111
Figura 75. Perdidas por retorno (S1,1) de la antena rectangular individual -----	113
Figura 76. Perdidas por retorno (S1,1) del arreglo de antenas rectangulares-----	114
Figura 77. Perdidas por retorno (S1,1) de la antena dipolo planar individual-----	115
Figura 78. Perdidas por retorno (S1,1) de la antena log-periodica -----	116
Figura 79. Perdidas por retorno de la antena Disconica-----	118
Figura 80. Patrón de radiación de la antena rectangular planarizada a una frecuencia de 650 MHz. Grafico polar en 3D -----	119
Figura 81. Patrón de radiación de la antena rectangular planarizada a una frecuencia de 650 MHz. Para 0 y 90 Phi -----	120
Figura 82. Ganancia de de la antena rectangular planarizada a una frecuencia de 650 MHz en 2D-----	120
Figura 83. Patrón de radiación del arreglo de antenas planarizada a una frecuencia de 650 MHz. Grafico polar en 3D-----	121
Figura 84. Patrón de radiación del arreglo planarizado a una frecuencia de 650 MHz. Para 0 y 90 Phi-----	121
Figura 85. Ganancia del arreglo planarizado a una frecuencia de 650MHz en dos dimensiones-----	122
Figura 86. Patrón de radiación de la antena Dipolo planar a una frecuencia 1 GHz. Grafico polar en 3D-----	123
Figura 87. Patrón de radiación de la antena Dipolo planar a una frecuencia de 1 GHz. Para 0 y 90 Phi-----	123
Figura 88. Ganancia de la antena Dipolo Planar en 2D. Para 0 y 90 Phi -----	124
Figura 89. Patrón de radiación de la Log-periodica planar a una frecuencia de 1GHz GHz. Grafico polar en 3D -----	124
Figura 90. Patrón de radiación de la antena Log-periodica planar a una frecuencia de 1 GHz. Para 0 y 90 Phi.-----	125
Figura 91. Ganancia de la antena Log-periodica planar a una frecuencia de 1 GHz en 2D. Para 0 y 90 Phi-----	125
Figura 92. Patrón de radiación de la Antena Disconica a una frecuencia de 500 MHz. Grafico polar en 3D-----	126

Figura 93. Patrón de radiación de la antena Disconica a una frecuencia de 500MHz. Para 0 y 90 Phi-----	126
Figura 94. Ganancia de la antena Disconica a una frecuencia de 500 MHz en 2D. Para 0 y 90 Phi-----	127

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	pag
Tabla. 1. Clasificación de las antenas [7]	9
Tabla. 2. Asignación de frecuencias y tipos de antenas [7].....	10
Tabla. 3. Designación estándar de la bandas de frecuencia [7]	10
Tabla 4. Dependencia de características en relación al espesor del sustrato.....	72
Tabla 5. Especificaciones basicas para el cálculo y diseño de la propuesta 1	73
Tabla 6. Especificaciones basicas para el cálculo y diseño de la propuesta 2	77
Tabla 7. Información que se especifica para el cálculo y diseño de la propuesta 2.....	78
Tabla 8. Dimensiones de las longitudes interiores y exteriores de la antena.....	80
Tabla 9. Consideraciones Técnicas del ROE	87
Tabla 10. Características para el diseño de antena rectangular planar	87
Tabla 11. Datos obtenidos del análisis matemático y datos complementarios.....	88
Tabla 12. Parámetros principales para el diseño de la antena rectangular.....	89
Tabla 13. Características para el diseño del arreglo rectangular	92
Tabla 14. Resumen de el ancho de cada uno de las lineas de transmision para las diferentes impedancias.....	96
Tabla 15. Parámetros básicos para el diseño del dipolo planar	100
Tabla 16. Parámetros básicos.....	102
Tabla 17. Datos obtenidos del análisis matemático y datos complementarios.	103
Tabla 18. Datos obtenidos del análisis matemático y datos complementarios.	108
Tabla 19. Resumen de las características de los patrones de radiación en la propuesta 1	122
Tabla 20. Resumen de las características de los patrones de radiación en la propuesta 2	125
Tabla 21. Resumen de las características de los patrones de radiación en la propuesta 3	127
Tabla 22. Comparación de los diagramas de radiación de las tres propuestas.....	131
Tabla 23. Resumen de los parámetros de radiación para el Arreglo Rectangular	131
Tabla 24. Resumen de los parámetros de radiación para la Antena Log-periódica....	132
Tabla 25. Resumen de los parámetros de radiación para la antena Discónica	132
Tabla 26. Resumen General de los parámetros de radiación para las tres propuestas radiante	132

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

BS	ESTACIÓN BASE.
BW	ANCHO DE BANDA
CDMA	ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO
CPE	EQUIPO TERMINAL DE ABONADO.
CR	COGNITIVE RADIO
CRN	RED DE RADIO COGNITIVA
DARPA	AGENCIA DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN AVANZADOS DE DEFENSA.
DNG V	DOUBLE NEGATIVE
DSA	ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO.
DSAN	REDES DE ACCESO DINÁMICO DEL ESPECTRO.
FA	FACTOR DE AGRUPACIÓN
FCC	FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION
FDMA	ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA
GPRS	GENERAL PACKAGE RADIO SYSTEM
GSM	SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES MÓVILES
IEEE	INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS.
IF	FRECUENCIA INTERMEDIA.
ITU	UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES.
LH	LEFT HANDED MATERIALS
MAC	CONTROL DE ACCESO AL MEDIO
MIMO	MULTI IMPUT MULTI OUPUT

NPRM	NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING
OFDM	MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES.
OSS	OPPORTUNISTIC SPECTRUM SHARING
Q	FACTOR DE CALIDAD
RF	RADIO FRECUENCIA
ROE	RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA
SDR	SOFTWARE DEFINIDO POR RADIO.
SNR	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO.
SR	SOFTWARE RADIO
TDMA	ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE TIEMPO
TEM	MODO TRANSVERSAL ELECTROMAGNÉTICO
UHF	FRECUENCIAS ULTRA ALTAS.
VHF	FRECUENCIAS MUY ALTAS
WCDMA	ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO DE BANDA ANCHA
WRAN	RED INALÁMBRICA DE ÁREA REGIONAL
SDR	SOFTWARE DEFINIDO POR RADIO

1. TEMA

**“DISEÑO VIRTUAL DE UN ARREGLO DE ANTENAS PARA SISTEMAS DE RADIO
COGNITIVA BASADOS EN EL ESTANDAR IEEE 802.22 WRAN”**

2. RESUMEN

La siguiente tesis contempla diferentes propuestas, diseños de arreglos y estructuras físicas radiantes para Radio Cognitiva (CR), que estén en la capacidad de operar en un gran ancho de banda (54 MHz – 964 MHz) incluyendo la banda de TV, además que se adapte al funcionamiento de los sistemas de Radio Cognitiva con el fin de obtener las mejores características radioeléctricas y de propagación de la información. De todas las propuestas se escogerá la más óptima, describiendo cuáles son sus características de transmisión, alcance, ancho de banda, etc. Para que pueda ser utilizada en los sistemas de Radio Cognitiva y así obtener un buen desempeño en los mismos.

Se comienza con un estudio de antenas en el Capítulo 4 apartado 1, donde se define y describe los parámetros de radiación, tipos de antenas, características de radiación, , arreglos de antenas, antenas de Ultra Banda Ancha (UBW), comportamiento de diagramas de radiación de antenas dispuestas en arreglo; geometrías y funcionamiento, estado del arte, entre otros. Además se describe diferentes tipos de arreglos tanto en antenas tipo parche, antenas independientes de la frecuencia, antenas de banda ancha, con sus diferentes comportamientos que sean adaptables a lo que se necesita en los sistemas de CR y puedan brindar una base de información para los diseños a presentar, con el fin de cumplir con los objetivos que se plantean.

Luego de que la FCC (Federal Communications Commission) propusiera, que las redes de comunicaciones se reformen para una mejor utilización del espectro y así proveer de frecuencias libres para diferentes aplicaciones, comenzaron a surgir alternativas de optimización espectral, como es el caso de Radio cognitiva, y con ello se abrió un nuevo campo de estudio para las antenas que puedan complementarse con los sistemas de CR (Radio Cognitiva) y que se adapten a su funcionamiento. En el Capítulo 4 apartado 2 se presenta la información reunida acerca de las tecnologías e investigaciones relacionadas acerca de esta tecnología, en donde se describen conceptos, estado del arte, aplicaciones, desarrollo a través de los últimos tiempos. Además se presenta el estándar que surgió a partir de esta investigación que es el 802.22 WRAN (Redes de área Amplia).

En el Capítulo 5, se presentan diferentes propuestas de diseños de arreglos de antenas; este diseño matemático, permitirá el análisis y comparación de sus mejoras en cuanto a características eléctricas, electromagnéticas y de propagación; adaptándolos a los requerimientos de los sistemas de radio cognitiva.

Finalmente, y después de haber obtenido los resultados arrojados por el simulador, y conociendo el arreglo más óptimo derivado del comportamiento y análisis de sus efectos paramétricos como el $S_{1,1}$ (Coeficiente de reflexión), relación de onda estacionaria (ROE), diagramas de radiación, entre otros, se discute en el Capítulo 6 la mejor opción a emplearse físicamente dentro de algún trabajo futuro, donde la optimización de las Redes de Radio Cognitiva sea el objeto de investigación y estudio.

ABSTRACT

The following thesis includes different proposals and designs, about arrangements and radiant physical structures for Cognitive Radio (CR), which are in the ability to operate in a high bandwidth (54 MHz – 964 MHz) including the TV band , It also must adapt to the operation of cognitive radio systems in order to obtain the best radio-electric features and propagation of the information. From all the proposals, the most optimal will be chosen, by describing what their transmission characteristics, range, bandwidth, etc., are. In order to be used in systems Cognitive Radio and in this way to get a good performance in them.

It begins with a study of antennas in Chapter 4, part 1, which defines and describes the parameters of radiation, types of antennas, radiation features, arrays of antennas, Ultra Wideband antennas (UWB), behavior of radiation diagrams of antennas in array; geometries and operation, state of the art, among others. In addition, it describes different types of arrays, for pad-type antennas, independent antennas of frequency, broadband antennas, with their different behaviors that are adaptable to what is needed in CR systems and which can provide an information base for the designs to be submitted in order to meet the objectives set.

After the FCC (Federal Communications Commission) proposed that communications networks are reformed to improve the use of the spectrum and in this way to provide free frequencies for several applications, it began to emerge some alternatives of spectral optimization, such as, Cognitive Radio and, thus a new field of study for antennas that can be complemented with systems CR (Cognitive Radio) and which can be adapted to its operation was opened. In Chapter 4, part 2, the work presents the information gathered about the technologies and related research about this technology, where the concepts, state of the art, applications last trended developments are described. Besides it presents the standard that emerged from this research work which is the 802.22 WRAN (Wide Area Networks).

In Chapter 5, different proposals of array designs of antennas are presented; This mathematical design will allow the analysis and comparison of its improvements about electrical, electromagnetic and propagation characteristics, which are adapted to the cognitive radio requirements.

Finally, after having the results obtained from the simulator, and knowing the optimal array derived from analysis of its behavior and its parametric effects such as $S_{1,1}$ (reflection coefficient), the relation of the standing wave (SWR), diagrams of radiation, among others, are discussed in Chapter 6 as the best option to be used physically in any future work, where optimization of Cognitive Radio Networks be the subject of research and study.

3. INTRODUCCIÓN

La demanda exponencial del espectro radioeléctrico con el paso del tiempo, ha llevado a su saturación y por ende a limitar el suministro a las personas naturales o empresas que así lo requieran, con el fin de implementar aplicaciones de difusión inalámbricas.

La escasez del espectro radioeléctrico y la mala utilización, ha llevado a realizar estudios sobre tecnologías alternativas, que permitan utilizar de una manera óptima el espectro subutilizado con fines de comunicación. La FCC (Federal Communications Commission), es la encargada de llevar un estricto control del espectro, y fue la que propuso previo a un estudio realizado donde se ha confirmado que gran parte del espectro licenciado asignado está infrautilizado, introducir reformas para mejorar su utilización y proveer un nuevo espectro disponible para nuevas aplicaciones.

La tecnología de Radio Cognitiva (CR) nace como una alternativa a la optimización espectral, la cual ayudaría a aprovechar la disponibilidad de los “huecos” en el espectro sin explotar, además de adaptarse a distintos medios. Pero el uso de radio cognitiva conlleva al diseño y caracterizaciones de diversos tipos de antenas, entre ellos arreglos que permitan el funcionamiento del sistema y la propagación de la información de manera óptima o basada en el estándar.

Esta tesis propone realizar el diseño virtual de varios arreglos de antenas para discernir y enfocarse al sistema radiante, que posea mejores características radioeléctricas y que se adapte a la forma de trabajo de la Radio Cognitiva. Por otro lado la idea de aportar a los diferentes estudios y campos que hagan posible su implementación también es parte del presente estudio. Para ello se van a diseñar algunas propuestas de antenas, compararlas, y luego evaluar los resultados y escoger el mejor diseño o el más óptimo; basados en sus diferentes parámetros que visualizan su rendimiento. El arreglo debe alcanzar intervalos de frecuencia muy amplios para poder utilizar los espacio subutilizados, además de lograr que se adapte al medio implementado, obteniendo una buena ganancia, óptimo ROE (Relación de onda estacionaria) y una velocidad promedio para transmitir información de diferentes aplicaciones.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. ANTENAS

4.1.1. Introducción

El ser humano siempre ha buscado formas de comunicarse con los demás. Desde esta naturaleza humana y hoy gracias a la tecnología, utilizando los medios que tiene a su alcance, surge la ambición por una comunicación a distancia en la que el emisor o receptor no tienen por qué estar en el mismo espacio físico o temporal. Pero lo que cambió la historia de las comunicaciones, fue el descubrimiento de la propagación de las *ondas electromagnéticas*¹ como medio de transmisión de datos eliminando así la necesidad de utilizar cables en los sistemas de comunicaciones. Por esta razón las antenas juegan un papel de vital importancia para la emisión de las ondas electromagnéticas que llevan la información.

Existen diversas aplicaciones de las antenas hoy en día, antenas en teléfonos móviles, ordenadores con conexión inalámbrica, tabletas, libros electrónicos, edificios inteligentes, aparatos médicos, cámaras, sensores etc, estos son algunos ejemplos de nuestra realidad “sin hilos”. Todas estas aplicaciones que hoy percibimos en la realidad le están otorgando a la antena un protagonismo y una responsabilidad muy importante. Por lo tanto es de suma importancia conocer su definición, parámetros, clasificación, propagación, diagrama de radiación, ganancia, etc., todos estos parámetros se verán más adelante.

En este apartado se estudiara uno de los elementos más importantes dentro de las *telecomunicaciones inalámbricas*² como son las antenas, así como también se revisara los diferentes tipos, y arreglos de antenas, para finalmente describir sus características de *propagación*³ y demás parámetros técnicos

4.1.2. Definición y funcionamiento de la antena

Existen diversas definiciones de antenas, pero la más concreta la da el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), el cual define una antena como “aquella parte

¹ Ondas electromagnéticas: Son aquellas ondas que no necesitan un medio material para propagarse.

² Telecomunicaciones inalámbricas: Es aquella en la que la comunicación encuentra unida por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio

³ Propagación: Conjunto de fenómenos físicos que conducen a las ondas del transmisor al receptor

de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [1]. Dicho de otro modo la antena es la transición entre un medio guiado y el espacio libre.

Una antena recibe potencia RF (Radio Frecuencia) de un transmisor y lo propaga hacia el espacio libre y también capta la energía de una onda de radio que pasa y la entrega al receptor.

La antena presenta un componente resistivo y es a esta resistencia a la que el transmisor envía la potencia. Si la antena no tiene pérdidas, toda la potencia entregada va a la resistencia de radiación y es emitida; si tiene pérdidas, una parte de esa potencia se convierte en calor en la resistencia de pérdidas de la antena. Se dice que una *antena isotrópica*⁴ ideal estaría libre de pérdidas y emitiría potencia en todas las direcciones con la misma intensidad, pero esto es pura ficción, como demuestran las *Ecuaciones de Maxwell*⁵, ya que la radiación electromagnética no permite tal diseño, sin embargo es un modelo útil como base del diseño de antenas reales. [2]

Algunas de las aplicaciones en las que se utilizan las antenas son:

- Comunicaciones móviles: aviones, barcos, vehículos, naves espaciales.
- Comunicaciones personales: teléfono celular.
- Sistemas de *radiodifusión*⁶: radio, televisión.
- Comunicaciones radio punto a punto: policía, bomberos.
- Aplicaciones de no comunicación:
 - Sensor remoto: radar, radiometría
 - Industria: microondas. [3]

4.1.3. Clasificación de las antenas

Con el pasar de los tiempos y con el nacimiento de nuevas tecnologías para aplicaciones, se ha ido creando la necesidad de diseñar antenas de diferentes tipos, para aplicarlas a requerimientos distintos, diferenciándose una de otras en las características y parámetros que presentan, como se verá más adelante. En el

⁴ Antena isotrópica: Es aquella que cuenta con un patrón de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria

⁵ Ecuaciones de Maxwell: Son un conjunto de cuatro ecuaciones que describen por completo los fenómenos electromagnéticos.

⁶ Radiodifusión: Es un término que designa el servicio de emisión de señales de **radio** y televisión para uso público generalizado o muy amplio

siguiente punto se describirá la clasificación de forma básica, pero de todos modos, es suficiente para describir los principales métodos de diseño de las antenas. [3] También se muestra tablas que tienen la descripción completa y resumida del uso más común de las antenas dependiendo de las necesidades por las que fueron creadas.

	TIPO DE ANTENAS	CARACTERÍSTICAS
SEGÚN SU FORMA DE RADIACIÓN	Antenas omnidireccionales	Dipolos eléctricos y magnéticos loops antenas de parche
	Antenas Direccionales	Yagi-uda, reflectores parabólicos, helicoidales, arreglos dipolares. A su vez pueden ser endfire o broadside; es decir, radiar en dirección perpendicular a ella.
	Antenas independientes de la frecuencia (de gran ancho de banda)	Logarítmicas, Espirales, espirales cónicas
	Antenas electromagnéticas direccionales y adaptativas	Arreglo de antenas de fase controlada (AAFC) y arreglo de antenas activas de fase controlada (AAAFC). Sus elementos pueden ser dipolos, antenas de parche, hélices, etc.
SEGÚN SU GEOMETRÍA Y CONSTRUCCIÓN	Antenas delgadas	Dipolos eléctricos y magnéticos, logarítmica, yagi-uda, helicoidal, arreglo de dipolos.
	Antenas de abertura	Guía de onda, corneta, reflectores parabólicos e hiperbólicos.
	Antenas autodefinidas	Logarítmicas, espirales, espirales cónicas.
	Antenas planares	Antenas de parche (diversas geometrías), espirales.
	Antenas cuasi-ópticas	Aberturas (slots), antenas de fresnel

Tabla. 1. Clasificación de las antenas [7]

Frecuencia muy bajas	Frecuencia baja	Frecuencia media	Frecuencia alta	Frecuencia muy alta	Frecuencia ultra alta	Micro-ondas	Ondas milimétricas
VLF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
(30Hz-30KHz)	(30-300 KHz)	(300 KHz-3MHz)	(3-30MHz)	(30-300 MHz)	(300 MHz-1GHz)	(1-30 GHz)	(30-300 GHz)
$\lambda=(10^4 - 10^5\text{m})$	$\lambda=(10^3 - 10^4\text{m})$	$\lambda=(10^2 - 10^3\text{m})$	$\lambda=(10^1 - 10^2\text{m})$	$\lambda=(10^3 - 10^4\text{m})$	$\lambda=(1\text{m}-1\text{cm})$	$\lambda=(1-10\text{cm})$	$\lambda=(0.1-1\text{cm})$
Antena monopolo						Cometa	
Logarítmicas							
Parabólicas							
Dipolos eléctricos, magnéticos y arreglos							
Microcintas							
Yagi-uda							
Espirales							
Helicoidales							
Usos							
Militar y marítimo	Militar y marítimo	Marítimos y radio fusión AM	Todos los servicios	Radiodifusión y telecomunicaciones móviles, enlaces punto a punto	Telecomunicaciones móviles, radio-enlaces, satélites	Radioenlaces de microondas de banda ancha	Sistema de guía de onda

Tabla. 2 Asignación de frecuencias y tipos de antenas [7]

DESIGNACION	RANGO DE FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
HF	3MHz-30MHz	100m-10m
VHF	30MHz-300MHz	10m-1m
UHF	300MHz-1GHz	1m-30cm
L	1GHz-2GHz	30cm-15cm
S	2GHz-4GHz	15cm-7.5cm
C	4GHz-8GHz	7.5cm-3.75cm
X	8GHz-12GHz	3.75cm-2.5cm
Ku	12GHz-18GHz	2.5cm-1.66cm
K	18GHz-27GHz	1.66cm-1.11cm
Ka	27GHz-40GHz	1.11cm-.75cm

Tabla. 3 Designación estándar de la bandas de frecuencia [7]

4.1.3.1. Antena de cable

Son hechas por cables conductores y son generalmente fáciles de construir y de bajo costo. Como, ejemplos, los dipolos, monopolos, espiras, helicoides (Figura 1). Las antenas de televisión que habitualmente encontramos en los edificios están formadas por un conjunto de dipolos, las antenas en los televisores de nuestros hogares, también son antenas de cable, así como muchas más aplicaciones. [21]

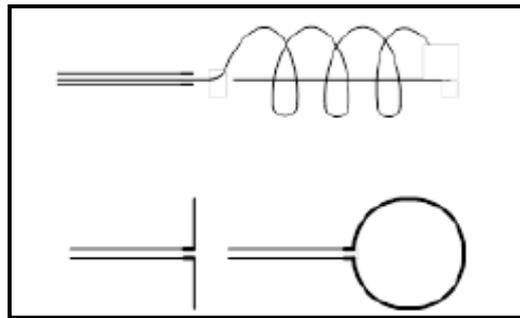


Figura 1. Antenas de cable (hilo). [21]

4.1.3.2. Antenas de apertura

Este tipo de antenas no están hechas de alambre de metal, pero está formada de placas para constituir ciertas configuraciones que irradian de una manera eficiente y deseada. A menudo se utilizan para aplicaciones de frecuencia más alta que las antenas tipo cable. [21] Ejemplo la bocina.

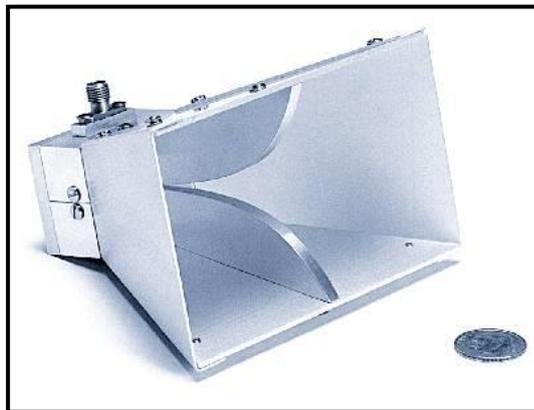


Figura 2. Antenas de apertura (bocinas). [21]

4.1.3.3. Reflectores

Las antenas tipo bocina pueden llegar a obtener ganancias de hasta 20 dBi⁷ con antenas normales, claro que se podría obtener más ganancia pero aumentaría su tamaño y peso. Para lo cual como alternativa están la tipo reflector que son antenas de alta *ganancia*⁸, fácil de construir y el manipulables. Estas son las antenas más ampliamente usadas para aplicaciones de alta frecuencia y alta ganancia para radioastronomía, radar y microondas. Las antenas están formadas por un reflector, generalmente con perfil parabólico, y la antena situada en el foco del reflector. Las grandes antenas de observación del espacio son también un ejemplo de ellas (Figura. 3). [21]

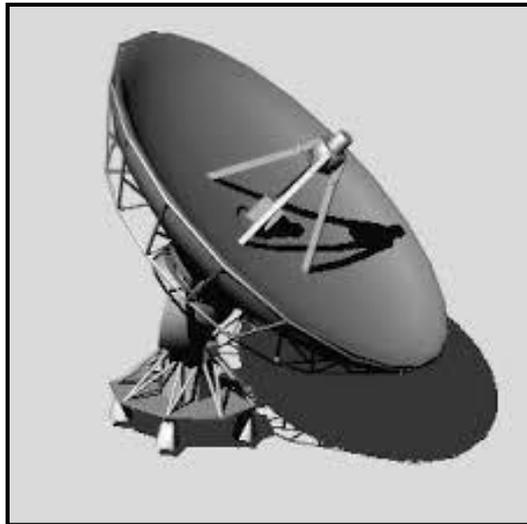


Figura 3. Reflector parabólico. [21]

4.1.3.4. Antenas *Microstrip*

Una antena Microstrip, se la conoce también como Antena patch, consiste en un patch metálico sobre un sustrato y sobre un plano de tierra. Como se muestra en la siguiente figura. (Figura. 4). El patch puede tomar diversas formas para cumplir con diferentes requisitos de diseño. Las formas típicas, son rectangulares, cuadradas, anillo circular. Se caracteriza por ser simple y barato fabricarlas. La antena es muy

⁷ dBi: Relación logarítmica entre la potencia de emisión de una antena en relación a un radiador isotrópico.

⁸ Ganancia: Se describe más adelante en los parámetros básicos

versátil en cuanto a la *frecuencia de resonancia*⁹, la impedancia de entrada, la polarización y el patrón de radiación. Todos estos factores han hecho que sea una antena moderna y muy popular para frecuencias superiores a 300 MHz de la banda UHF (Ultra alta Frecuencia), que es la banda también que cubre radio cognitiva. Tiene también desventajas, principalmente es la potencia; la potencia que puede entregar es muy baja actualmente, pero también tiene una ventaja y es la más importante, pueden abarcar un rango de frecuencias muy amplio y también son muy versátiles, donde se nota que si se hace un buen diseño con este tipo de antenas, claramente sirve para usarla en radio cognitiva, especial en el censado del espectro.

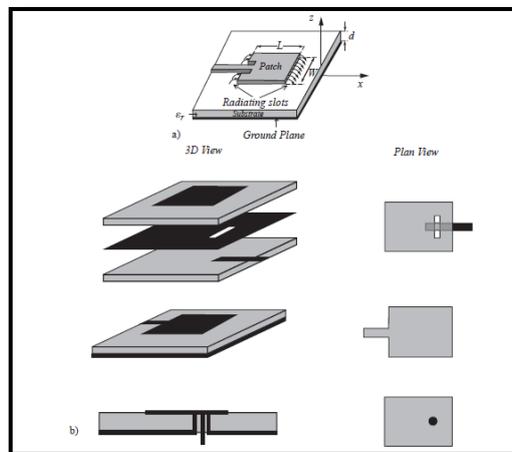


Figura 4. Antena microstrip y sus alimentaciones a) Antena Microstrip con sus coordenadas b) Tres configuraciones de alimentación: Alimentación de acoplamiento, Alimentación Microstrip y Alimentación coaxial. [21]

En las propuestas de diseño que se presentan en el capítulo de resultados, se brinda una solución con este tipo de antenas, porque basados en la investigación realizada se vislumbra buenas técnicas de funcionamiento y se acoplan a los requerimientos de Radio Cognitiva. En la figura 5, se puede ver una antena microstrip real, para tener una mejor perspectiva de su forma física. Este tipo de antenas son de perfil bajo, adaptables a cualquier superficie, simples y baratas de fabricar y mecánicamente robusta cuando se instalen sobre superficies rígidas.

⁹ Frecuencias de resonancia: Es aquella frecuencia característica de un cuerpo o un sistema que alcanza el grado máximo de oscilación.

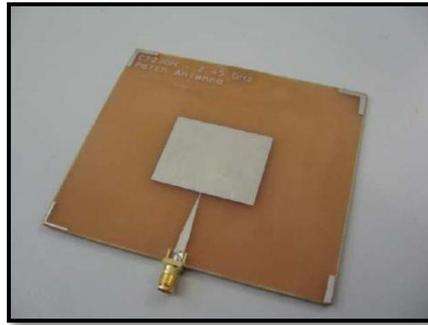


Figura 5. Antena rectangular sobre un sustrato.

4.1.3.5. Agrupaciones de antenas

Todos los tipos de antenas descritas anteriormente son antenas individuales, que cuando se diseñan y se da la frecuencia, todos los parámetros característicos son constantes, es decir carecen de flexibilidad. Con el arreglo de antenas lo que se pretende es aumentar la ganancia y poder manipular el patrón de radiación, es decir que sea más flexible; además que puedan abarcar un gran ancho de banda y que logren servir para diferentes aplicaciones inalámbricas. Para poder obtener estas ventajas, existen antenas dispuestas en arreglo de acuerdo a las características deseadas y estas se consiguen variando la amplitud y la fase. Por lo tanto cuando se junta más de una antena para conseguir determinadas características de radiación, se denomina agrupación de antenas o, en inglés, “*array*¹⁰” (Figura 6). El objetivo principal de esta tesis es disponer de un arreglo de antenas que sea optimizado para Radio Cognitiva, basándose en los diversos tipos de antenas individuales antes estudiados, y disponiéndolas con el fin de que adopten flexibilidad, abarquen un gran ancho de banda, que posean un ROE menor a 2 y que sean omnidireccionales, estas características son las principales para satisfacer el objetivo de esta tesis y de los requerimientos de antena para CR. [3]

¹⁰ Array de antenas: Antenas dispuesta en arreglo

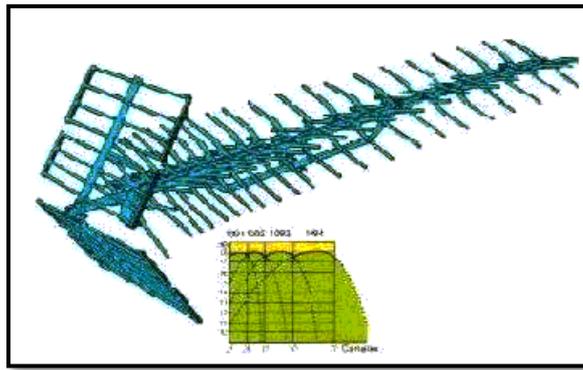


Figura 6. Agrupaciones de antenas [3]

4.1.4. Estado del arte de Antenas

Desde que se descubrió que era posible enviar información a través de ondas electromagnéticas, y que éstas eran capaces de propagarse por el espacio libre sin necesidad de cables, se comenzó a diseñar muchos tipos de antenas, de diferentes formas y características hasta nuestros días, por eso es muy interesante conocer cuál ha sido el desarrollo tecnológico de las antenas y cuál es su estado actual.

La evolución de los métodos numéricos, junto con computadores más rápidos permite analizar antenas en estructuras embarcadas como barcos, aviones, satélites, coches, y ver cómo se comporta la antena en un entorno diferente en el espacio libre como se muestra en la figura 7. [3]

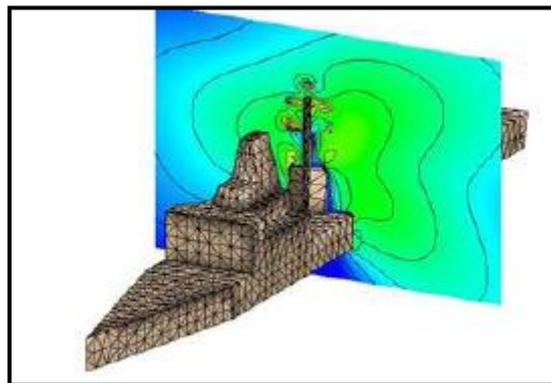


Figura 7. Radiación producida por una antena en un barco. El entorno complejo requiere herramientas numéricas de cálculo electromagnético para resolver el problema. [3]

- Miniaturización de las antenas: El aumento de dispositivos con antena ha sufrido un crecimiento continuo (teléfonos móviles, auriculares, ordenadoras, ratones, consolas de juego, etc.). Miniaturizar el elemento radiante es sumamente importante para facilitar la integración en el dispositivo. Otro ejemplo muy ligado a la electrónica es la posibilidad de integración de una antena en un chip, juntamente con toda la parte de radiofrecuencia, como filtros y amplificadores. Es lo que se llama *system-on-chip*.
- Antenas multifrecuencia: es decir, antenas que puedan operar en varios sistemas de comunicación con características similares de radiación.
- Antenas para aplicaciones militares: donde es interesante disponer, por ejemplo, de antenas de mucho ancho de banda en algunos casos y de miniatura, en otros.
- Antenas dieléctricas: Habitualmente pensamos que las antenas sólo son estructuras metálicas. Sin embargo, existe la posibilidad de diseñar antenas dieléctricas. Del mismo modo que un conductor fija unas condiciones determinadas de contorno (campo eléctrico tangencial nulo en su superficie), las dieléctricas fijan otras y, así, podemos encontrar bocinas construidas exclusivamente con dieléctrico
- Los sistemas de antena inteligente (smart antennas, MIMO -multiple Input Multiple Output) dotan de mayor capacidad, mejor calidad de servicio y más tiempo de vida de las baterías en las unidades móviles. Las antenas inteligentes están basadas en una **agrupación de antenas** y un algoritmo de formación de haz.
- Síntesis de antenas: es decir, cómo tiene que ser la antena para que radie de una forma especificada a *priori*. Esto se conoce como síntesis de diagramas.
- Con el ingente aumento de la telefonía móvil y la preocupación de la sociedad por cómo puede afectar la radiación de las antenas al cuerpo

humano, en los últimos años se ha estado estudiando cómo interactúa la radiación producida por antenas, especialmente de terminales móviles en el cuerpo humano. Las antenas se miden en condiciones de espacio libre y posteriormente se comparan con presencia de la cabeza humana para ver su efecto.

- Aplicación de la geometría fractal al diseño de antenas: La aplicación de dicha geometría es útil para el diseño de antenas eléctricamente pequeñas, multifrecuencia y de alta directividad.
- Metamateriales: Consiste básicamente en la síntesis de materiales no existentes en la naturaleza con propiedades negativas. Por esta razón estos materiales artificiales reciben también el nombre de DNG (Double Negative) o LH (Left Handed Materials). Entre algunas aplicaciones se encuentra la de la miniaturización de componentes microondas, los elementos muy directivos, la transparencia electromagnética y las lentes perfectas. [3]

4.1.5. Parámetros básicos de transmisión de las antenas

Conocer los parámetros básicos de una antena es muy importante, ya que tenemos la base para diseñar las antenas, y como es el caso poder disponer varias antenas en un arreglo e ir conociendo y calculando sus diferentes parámetros. Como ya se mencionó anteriormente, una antena puede ser definida como la estructura asociada con la región de transición entre una onda guiada y una onda en el espacio libre o viceversa. [4]

Independientemente del tipo de antena, todas ellas implican el mismo principio básico, donde la radiación de una carga es producida por su aceleración o desaceleración. La ecuación básica puede expresarse simplemente como.

$$IL = Qv \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

I = Intensidad de corriente en A/s

L = Longitud del elemento de corriente en metros

Q =Carga en coulomb (C)

v =Cambio de velocidad contra el tiempo, que es igual a la aceleración de la carga en m/s.

Por lo tanto, el tiempo de cambio de carga acelerada irradia y transmite. En los transitorios o pulsos, nos fijaremos en la carga. La radiación es perpendicular a la aceleración y la potencia radiada es proporcional al cuadrado de IL o Qv .

Una línea de transmisión de dos cables de la Figura. 8, está conectada a un generador de radiofrecuencia o transmisor. A lo largo de la parte uniforme de la línea, la energía se guía en un plano de onda en Modo Transversal Electromagnético (TEM, por sus siglas en inglés) con poca pérdida. El espaciado entre conductores es asumido por ser una pequeña fracción de una *longitud de onda*¹¹. Más adelante, la línea de transmisión se abre en una transición cónica. Como la separación se acerca a la longitud de onda o más, la onda tiende a ser radiada de modo que la línea abierta actúe como una antena que la “lanza” al espacio libre. Las corriente sobre las *líneas de transmisión*¹² salen de la antena, pero los campos asociados con ellos siguen adelante.

La transmisión de una antena de la (Figura 8 a) es una región de transición de una onda guiada en una línea de transmisión en el espacio libre. La recepción de una antena, en la (Figura 8 b), es una región es una región del espacio libre de la onda a una onda guiada a una línea de transmisión. [4]

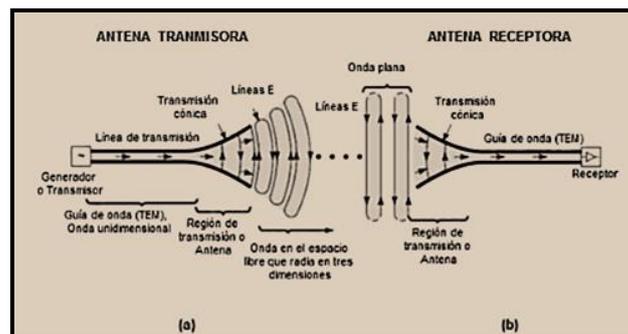


Figura 8. a) Enlace de radio llevando a cabo la comunicación con la antena transmisora y b) la antena receptora. [4]

¹¹ Longitud de onda: Es la distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo de tiempo.

¹² Líneas de Transmisión: Una línea de transmisión es una estructura material de geometría uniforme utilizada para transportar eficientemente la energía de radiofrecuencia desde un punto a otro.

Como se ve la antena receptora está alejada de la transmisora de manera que la onda radiada por la antena de transmisión llega como una onda plana en la antena receptora.

Desde el punto de vista del circuito, las antenas se encuentran en una línea de transmisión como una R_r , llamada resistencia de radiación. No está relacionada con ninguna resistencia en la misma, pero es una resistencia conectada desde el espacio para las terminales de la antena.

En el caso de transmisión, la potencia de radiación es absorbida por objetos en una distancia: árboles, construcciones, suelo, el cielo y otras antenas. En el caso de recepción, la radiación pasiva de objetos distantes o la radiación de otras antenas elevan la temperatura de R_r . En este sentido una antena de recepción puede ser considerada como un dispositivo de medición de teledetección de temperatura. [4]

4.1.5.1. Intensidad de radiación

Una de las características fundamentales de una antena es su capacidad para radiar con una cierta direccionalidad, es decir, para concentrar la energía radiada en ciertas direcciones del espacio. Por lo tanto, será conveniente cuantificar este comportamiento con algún parámetro que permita establecer una comparación entre diferentes antenas: intensidad de radiación [5].

La onda electromagnética radiada por una antena se compone de una intensidad de campo eléctrico E [v/m] y una intensidad de campo magnético H [H/m], ambas magnitudes vectoriales ligadas por las ecuaciones de Maxwell.

La potencia de radiación desde una antena por unidad de ángulo es llamada intensidad de radiación U (watts por radian). El patrón de potencia normalizado puede ser expresado de la siguiente manera.

$$P_n(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U(\theta, \phi)_{max}} = \frac{S(\theta, \phi)}{S(\theta, \phi)_{max}} \quad (\text{Ecuacion. 2})$$

Dónde:

$P_n(\theta, \phi)$ = Patrón de potencia normalizado

$U(\theta, \phi)$ = Radio de la intensidad de radiación

$U(\theta, \phi)_{max}$ = Radio de la intensidad de radiación a su máximo valor.

$S(\theta, \phi)$ = Vector de Poyting¹³

$S(\theta, \phi)_{max}$ = Vector de Poyting máximo.

Considerando que el vector de Poyting depende de la distancia de la antena (que varía inversamente con el cuadrado de la distancia), la intensidad de radiación U es independiente de la distancia a la que se encuentra la antena. [6].

4.1.5.2. Directividad D

La directividad de una antena se define como “la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena transmisora” [5].

$$D = \frac{P_{\theta, \phi \max}}{P_{\theta, \phi \text{av}}} = \text{Directividad de un patron de radiacion} \quad (\text{Ecuacion. 3})$$

Dónde:

D = Directividad

$P_{\theta, \phi \max}$ = Densidad de potencia máxima

$P_{\theta, \phi \text{av}}$ = Densidad de potencia promedio sobre una esfera

La directividad es una *relación adimensional*¹⁴ ≥ 1

La directividad también se refiere al área de la onda; cuando sea más pequeña el área de la onda producida por la antena, más grande es la directividad D .

Una antena isotrópica tiene una directividad $D=1$. Todas las antenas reales tienen una directividad mayor que 1. Un simple dipolo tiene una directividad $D=1.5$. [6]

¹³ Vector de Poyting: Puede definirse como el producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético, cuyo módulo es la intensidad de la onda

¹⁴ Relación adimensional: Las magnitudes adimensionales se definen a menudo como productos, razones o relaciones de cantidades que si tienen dimensiones, pero cuyas dimensiones se cancelan cuando sus potencias se multiplican.

4.1.5.3. Ganancia G

La ganancia de una antena es la relación que existe entre las potencias, de una antena de referencia que en muchos casos es la *omnidireccional*¹⁵ que irradia energía a todos partes por igual y la potencia de la antena “real”, si se hace referencia a una antena omnidireccional la ganancia se mide en dBi, y si es con respecto a una antena dipolo la ganancia se mide en dBd.

En la siguiente figura se muestra la relación de potencias para obtener la ganancia. (Figura 9).

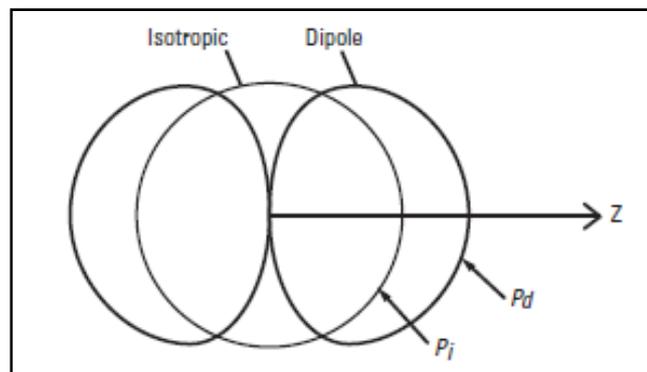


Figura 9. Patrón de radiación de una antena isotrópica con respecto a una antena dipolo. [4]

También es una cantidad real dado que es menor que la directividad D, debido a las pérdidas óhmicas de la antena. En transmisión estas pérdidas involucran a la potencia que proviene de la antena, el cual no se radia pero calienta la estructura.

El ratio de la ganancia a la directividad de la antena es el factor de eficiencia

$$G = kD \quad (\text{Ecuacion. 4})$$

Donde

G= Ganancia

k= Factor de eficiencia

D= Directividad

¹⁵ Antena Omnidireccional: tipo de antena, cuyo patrón de radiación no es directivo, sino que irradia por igual a todas partes.

En antenas bien diseñadas se puede lograr que k se acerque a uno. Pero en la práctica G siempre es menor a D .

La ganancia puede medirse mediante la comparación de la densidad de potencia máxima de la antena bajo prueba (AUT por sus siglas en inglés) con una antena de referencia de ganancia conocida, tal como un dipolo corto.

$$\text{Ganancia} = G = \frac{P_{max}(AUT)}{P_{maxref.}} * G(ref.) \quad (\text{Ecuacion. 5})$$

Donde

$P_{max}(AUT)$ = Densidad de potencia máxima de la antena bajo prueba

$P_{maxref.}$ = densidad de potencia máxima referenciado a la antena.

$G(ref.)$ = Ganancia referenciada a la antena [6]

4.1.5.4. Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada se define como “la polarización de la onda radiada cuando ésta se encuentra excitada”. La polarización generalmente se define en la dirección en la que la antena radia el máximo de potencia, ya que los enlaces se diseñan para que sean eficientes en la dirección de máxima radiación. La Polarización de la onda radiada varía con la dirección respecto al centro de la antena, por lo que diferentes partes del diagrama de radiación pueden tener diferentes Polarizaciones. [1]

La polarización de una onda es la figura geométrica descrita, con el paso del tiempo, por el extremo del vector de campo eléctrico en un punto del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

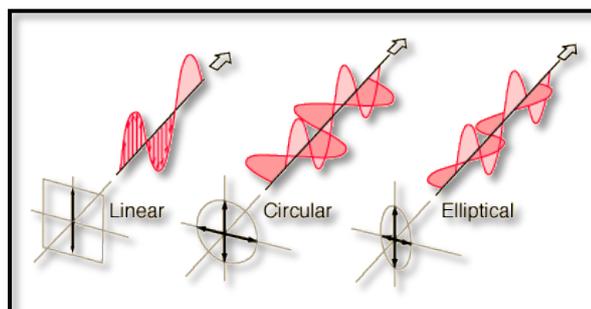


Figura 10. Tipos de polarización [1]

Existen tres tipos de polarización como se muestra en la Figura 10 lineal, circular y elíptica pero en si todas son casos de la polarización elíptica. La polarización en los enlaces de telecomunicaciones, es un parámetro fundamental en donde tanto el transmisor como el receptor deben estar polarizados—de la misma forma para que estos puedan establecer un enlace.

4.1.5.5. Ancho de banda

De una manera general podemos hablar de ancho de banda de impedancia o de diagrama. Respecto al primero, puede definirse ancho de banda como margen frecuencial al que la antena está adaptada con una relación de onda estacionaria (ROE)¹⁶ menor a un valor prefijado. En cuanto al segundo, podemos encontrar varias acepciones. La más habitual es la que se refiere a la ganancia de la antena; se define como aquel margen de frecuencias en el que la ganancia de la antena no decae de un cierto valor respecto el máximo.

La relación se puede expresar en forma de porcentaje.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (\text{Ecuacion. 6})$$

Donde

BW = Ancho de Banda

f_{max} = Frecuencia máxima

f_{min} = Frecuencia minima

f_o = Frecuencia de referencia

En antenas de banda ancha se suele especificar en la forma

$$BW = \frac{f_{max}}{f_{min}} : 1 \quad (\text{Ecuacion. 7})$$

El coeficiente de reflexión de la antena respecto a una línea de transmisión o generador es

$$\Gamma = (\mathbf{S1}, \mathbf{1}) = \frac{Z_a - Z_o}{Z_a + Z_o} \quad (\text{Ecuacion. 8})$$

¹⁶ ROE (Relación de onda estacionaria): es un número positivo sin dimensiones y siempre mayor o igual a uno.

Donde

Γ = Coeficiente de reflexión

Z_a = Impedancia de entrada

Z_o = Impedancia de salida

La relación de onda estacionara se puede calcular a partir del coeficiente de reflexión

$$ROE = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (\text{Ecuacion. 9})$$

Donde

ROE= Relacion de onda estacionaria

$\Gamma = S_{1,1}$ = Coeficiente de reflexión

Otro parámetro fundamental es Q (Factor de calidad), quien es el factor de calidad del circuito de la antena. [6]

$$BW = \frac{1}{Q} \quad (\text{Ecuacion. 10})$$

Donde

BW= Ancho de banda

Q= Factor de calidad

Entonces como conclusión el ancho de banda, en si depende del coeficiente de reflexión y de cual sea el valor permitido para el diseñador. Algunos a la mayor parte de referencias bibliográficas dicen que son valores a -10dB, pero otros dirán valores mayores a -6dB. Con respecto a esto y como se muestra en la siguiente Figura 11 existe un mayor ancho de banda de antenas con conductores más gruesos, y el ancho de banda disminuye cuando el conductor o hilo se hace más delgado. Esta descripción se refleja a continuación: [4]

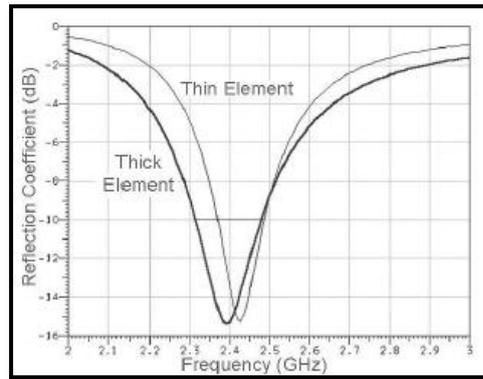


Figura 11. Ancho de banda con dos tipos de conductores. [4]

4.1.5.6. Eficiencia de radiación

La eficiencia de radiación, se refiere al porcentaje de potencia radiada actualmente por una antena. Es una relación, usualmente expresada en porcentaje, como se define en la siguiente ecuación: [4]

$$\eta = \frac{Prad}{Pin} \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} * 100\% \quad (\text{Ecuacion. 11})$$

Donde

η = Eficiencia de radiación

R_r = Resistencia de radiación

R_Ω = Resistencia de pérdidas

La eficiencia total de la antena se utiliza para tener en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena. Tales pérdidas pueden deberse a:

- Reflexiones debido a la falta de correspondencia entre la línea de transmisión y la antena.
- Pérdidas I^2R (conducción y *dieléctricos*¹⁷) [7]

¹⁷ Dieléctrico: Se denomina dieléctrico a un material con una baja conductividad eléctrica ($\sigma \ll 1$); es decir, un aislante.

Como en la transmisión en la recepción interesa una resistencia de radiación muy superior a la resistencia de pérdidas para obtener la máxima eficiencia posible. El fenómeno de pérdidas produce un calentamiento de los materiales que conforman la antena. [6]

En la siguiente figura se muestra una simulación de un dipolo con los cálculos de la eficiencia de radiación.

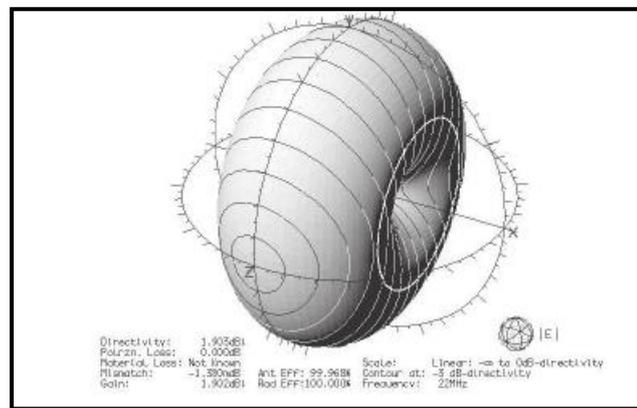


Figura 12. Resultado de la simulación de una antena dipolo, incluido el cálculo de la eficiencia de radiación. [4]

4.1.5.7. Impedancia de entrada

Para transferencia de energía eficiente, la impedancia característica de la línea, y la de transmisión a la que se conectan deben ser las mismas. Las antenas y sus líneas de transmisión generalmente están diseñadas para una impedancia de 50 Ω , hay un desacoplamiento, y se necesita un circuito de acoplamiento de impedancia. Cuando alguno de estos componentes no tiene la misma impedancia, la eficiencia de transmisión se ve afectada. Por otro lado si hay reflexión de energía cuando se trabaja a altas potencias, podría ser perjudicial para el transmisor, ya que puede dañar las etapas de amplificación. [1]

4.1.5.8. Patrones de Radiación

Los patrones de radiación describen la intensidad relativa del campo radiado en varias direcciones, desde la antena a una distancia constante. El patrón de radiación es también de recepción, porque describe las propiedades de recepción de la antena. El patrón de radiación es tridimensional, pero generalmente las mediciones de los

mismos son una porción bidimensional del patrón, en el plano horizontal o vertical. Estas mediciones son presentadas en coordenadas rectangulares o en coordenadas polares. [8]

Los sistemas de coordenadas pueden dividirse en dos clases: lineales y logarítmicos. En el sistema de coordenadas polares lineal, los circuitos concéntricos están uniformemente espaciados y graduados y en el sistema de coordenadas polares logarítmico, las líneas concéntricas de la retícula son espaciadas periódicamente de acuerdo con el logaritmo del voltaje de la señal.

El patrón de radiación en la región cercana a la antena no es el mismo que el patrón en el campo lejano. El término campo cercano se refiere al patrón del campo que existe cerca de la antena, mientras que el término campo lejano refiere a los diagramas de campo a largas distancias. El campo lejano es denominado campo de radiación y generalmente es el que más interesa. Normalmente el punto de interés es la potencia radiada, y por lo tanto los diagramas de la antena son medidos en la región del campo lejano. [8].

Del diagrama de radiación se puede sacar alguna de las definiciones importantes y relacionadas.

- Lóbulo principal: zona en la que la radiación es máxima.
- Lóbulos laterales: zona que rodea los máximos de menor amplitud.
- Lóbulo secundario: lóbulo lateral de mayor amplitud
- Lóbulo posterior: zona diametralmente opuesta al lóbulo principal.
- Ancho de haz a mitad de potencia ($\Delta\theta$ -3dB): separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo.
- Ancho de haz entre ceros ($\Delta\theta$ Z): separación angular en las direcciones del espacio en las cuales el lóbulo principal toma un valor nulo.
- Relación delante-detrás (D/D): cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior [dB].
- Relación lóbulo principal a secundario (NLPS): cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario, que suele ser adyacente al lóbulo principal [dB]. Generalmente se encuentra el acrónimo NLPS como SLL del inglés Side Lobe Level.[3]

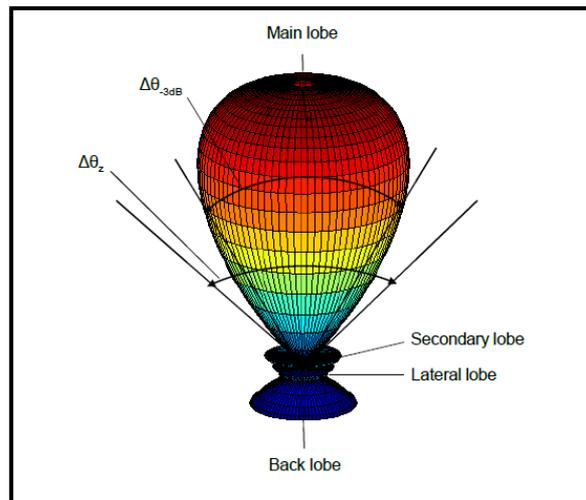


Figura 13. Parámetros del diagrama de radiación [3]

4.1.6. Agrupación de antenas

Se define una agrupación como un conjunto de N antenas iguales que radian o reciben simultáneamente.

Las principales ventajas de un arreglo son:

- La flexibilidad para formar un patrón de radiación deseado
- La alta directividad y la ganancia.
- La habilidad para proporcionar un haz de escaneado.

Los principales inconvenientes son:

- La complejidad de la red de alimentación que requiere
- La baja potencia.

Entonces, si queremos aumentar la directividad de una antena es necesario agruparlas en lo que denominamos agrupación o “array” de antenas, pero además se puede conseguir sintetizar la forma del diagrama de radiación. Es decir, dado un diagrama de radiación con excitación se puede obtener el diagrama de radiación deseado. Además con agrupaciones se podrá barrer el máximo de radiación en cualquier dirección del espacio. [4]

En este apartado se demostrara que es posible sintetizar diagramas arbitrarios de radiación con ayuda de una agrupación de antenas: puede obtenerse una distribución

de corrientes discreta que corresponde a muestras de una cierta distribución de corriente continua.

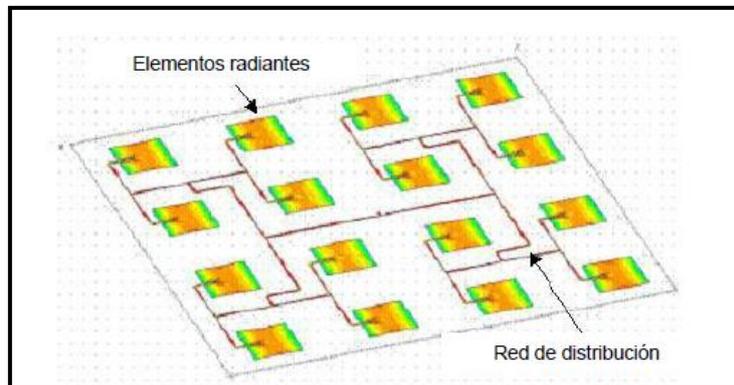


Figura 14. Ejemplo de un arreglo de antenas bidimensional formado con radiadores microstrip. [10]

4.1.6.1. Diagrama de radiación de una agrupación

En una agrupación de antenas el campo total es el resultado de la suma vectorial de los campos de cada elemento de la agrupación. Puesto que en muchas ocasiones se pretende conseguir una alta directividad es necesario que los campos interfieran constructivamente en la dirección de interés y destructivamente en el resto del espacio.

Los parámetros que permiten controlar el diagrama de radiación del sistema son los siguientes: El número de elementos que componen la agrupación. La configuración geométrica de los elementos que conforman el sistema. Es decir, la disposición en que están colocados (lineal, triangular...) y la separación entre los elementos. El diagrama de radiación de cada elemento, diferente según el tipo de antena: dipolo, yagi, apertura, la alimentación de cada elemento: la distribución de amplitudes y fases. [6]

Por simplicidad se realizara los cálculos para una agrupación lineal de antenas Figura 15, pero los resultados son extensibles a agrupaciones de cualquier geometría.

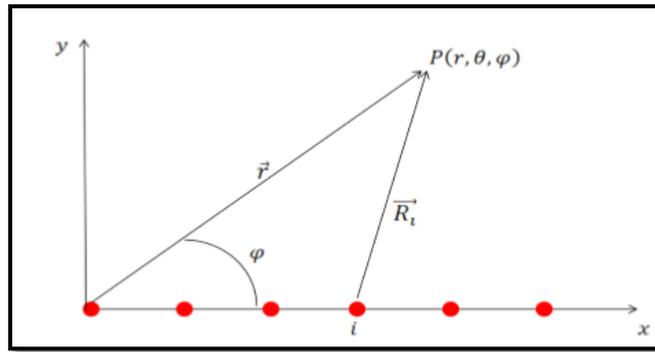


Figura 15 Agrupación lineal de antenas [6]

Como la agrupación de un conjunto de antenas idénticas los diagramas de radiación son iguales. Por lo tanto, el campo total será la suma vectorial de los campos producidos por cada elemento.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} E_t = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{M_i D(\theta, \phi)}{R_i} e^{-j(\beta R_i - \epsilon_i)} u_i \quad (\text{Ecuacion. 12})$$

Dónde:

β =numero de ondas

M_i =Factor que determina la amplitud relativa del elemento.

D = diagrama de radiación normalizado del elemento i (su valor máximo es la unidad)

ϵ_i = fase de alimentación del elemento i

u_i = polarización del campo radiado por el elemento i (vector unitario complejo)

Si estamos suficientemente alejados de la agrupación (campo lejano) se cumple que $R_i = r$. Esta aproximación es válida para el denominador, pero no para el término de la exponencial, en donde debe usarse una aproximación más fina:

$$R_i = r - X_i \sin\theta \cos\phi \quad (\text{Ecuacion. 13})$$

Por otro lado, a una distancia de la agrupación suficientemente grande, las polarizaciones de las antenas pueden considerarse idénticas. Podemos escribir finalmente:

$$E = \frac{D(\theta, \phi)}{r} e^{-j\beta r} u \cdot \sum_{i=0}^{N-1} M_i e^{-j(\beta x_i \sin\theta \cos\phi - \epsilon_i)} u_i \quad (\text{Ecuacion. 14})$$

Factor de Arreglo

El primer término sólo es dependiente del diagrama de radiación de la antena básica y de la distancia del origen de coordenadas al punto. El segundo término tiene en cuenta la interferencia de las N ondas generadas por las N antenas. Este factor depende únicamente de la separación entre los elementos de la agrupación, de la alimentación (amplitud y fase) y de la frecuencia de trabajo, y se denomina factor de la agrupación (FA). A la posibilidad de expresar el campo eléctrico radiado por una agrupación como producto de estos dos factores se lo conoce como principio de multiplicación de diagrama. [6]

4.1.6.2. Síntesis de agrupaciones

La flexibilidad de las agrupaciones para proporcionar diagramas de radiación muy variados puede aprovecharse para sintetizar un diagrama de radiación que cumpla unas determinadas características. Para ello deben determinarse las amplitudes y fases con las que se alimentarán a los elementos de la agrupación de forma que la interferencia de los campos radiados se aproxime al diagrama deseado.

La sistematización de los procedimientos de síntesis de agrupaciones ha llevado al desarrollo de multitud de métodos. Vamos a describir brevemente alguno de ellos. [10]

- Método de Schelkunoff: Parte de la especificación de la dirección de los ceros en el plano Z o los nulos en el espacio real.
- Métodos de modelado del haz (*beam-shaping*), en los que se especifica la forma del diagrama en el espacio real. Suelen utilizarse dos métodos:
 - Síntesis de Fourier, que permite obtener el diagrama de error cuadrático medio mínimo respecto a las especificaciones. Se aplica cuando se conoce una expresión matemática del factor de la agrupación deseado.
 - Síntesis de Woodward, que permite obtener un diagrama que coincide con las especificaciones en un número finito de puntos. Es útil cuando el diagrama especificado no puede expresarse matemáticamente, pero sí puede muestrearse.

Para diagramas de haz principal estrecho y bajos lóbulos secundarios, suelen especificarse el nivel de lóbulo principal a secundario y el número de elementos de la agrupación. Para realizar el diseño existen varios métodos: [4]

- Síntesis de Chebychev, que obtiene el diagrama con mínimo ancho de haz principal para el nivel de lóbulo principal a secundario especificado.
- Síntesis de Taylor, basada en los mismos principios que la de Chebychev pero con menor radiación en direcciones alejadas del haz principal a costa de empeorar ligeramente el ancho de haz y la directividad. Por sus ventajosas características, es muy utilizada en la práctica
- Agrupaciones súper directivas: Existen una serie de métodos para sintetizar agrupaciones con una directividad en teoría tan elevada como se desee, a costa de enormes problemas en su realización práctica, que las hacen inviables.

Es posible, aunque no en todos los casos, calcular analíticamente las amplitudes y fases con las que deben alimentarse a las antenas de una agrupación para conseguir el diagrama de radiación deseado. Pero estos métodos, debido a la complejidad del cálculo y a que no siempre es posible llegar a la solución, sólo son útiles en agrupaciones “estáticas”.

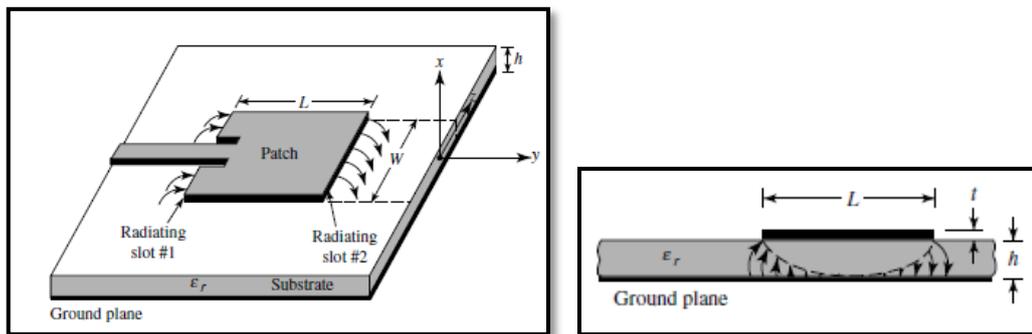
Nuestro propósito es conseguir diseñar una agrupación adaptativa, y los métodos de síntesis no aportan resultados satisfactorios en este caso. Por ello se debe afrontar el problema desde otro ángulo: En los últimos años, el desarrollo de la informática ha revolucionado los métodos de síntesis. Gracias a la elevada capacidad de cálculo que ofrecen los ordenadores actuales es más eficiente resolver el problema numéricamente mediante el uso de los algoritmos apropiados para tal fin. [5].

4.1.7. Antenas Microstrip

Las antenas microstrip o antenas de parche son muy utilizadas en muchos dispositivos, por ser manejables, pequeñas, se adaptan a cualquier equipo, fáciles de construir y de bajo costo. Además de las ventajas descritas tiene mejoras en cuanto a eficiencia y desempeño, para sus diferentes campos de aplicaciones tal como radios móviles y comunicaciones móviles, tal es el caso de la telefonía celular y los sistemas de radio cognitiva. [6]

4.1.7.1. Características básicas

Una muestra de antena microstrip se muestra en la figura siguiente, la cual consiste de un muy delgado patch metálico ($t \ll \lambda_0$, donde λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre) ubicado en una pequeña fracción de longitud de onda ($h \ll \lambda_0$, usualmente $0.003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$), arriba de un plano de tierra. La antena es diseñada para obtener el patrón máximo que es normal al patch (radiador broadside).



(a) Antena Microstrip

(b). Vista de lado

Figura 16. Antena Mocrostrip tipo rectangular [6]

Para un patch rectangular, la longitud L del elemento es usualmente $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ donde λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre. El patch y la tierra son separados para una hoja de dieléctrico, como se muestra en la figura 20(a). Hay muchos substratos que pueden utilizar, para el diseño de antenas microstrip y estas constantes dieléctricas están usualmente en el rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Los más deseados para el rendimiento de una buena antena son substratos delgados, donde la constante dieléctrica la más baja del rango, porque ellas proveen mejor eficiencia, mayor ancho de banda, los campos débilmente ligados para la radiación en el espacio, pero a costa de mayor tamaño del elemento. Los substratos con constantes dieléctricas más altas son deseables para circuitos de microonda. [6]

El patch de radiación puede ser rectangular, cuadrado, dipolo, circular, elíptico, triangular y algunas otras configuraciones. Todas estas formas se ilustran en la figura 17.

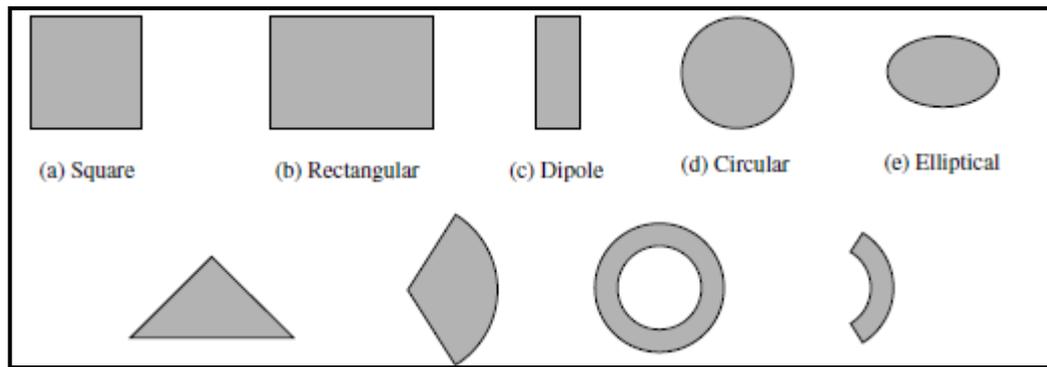


Figura 17. Formas representativas de elementos microstrip [6]

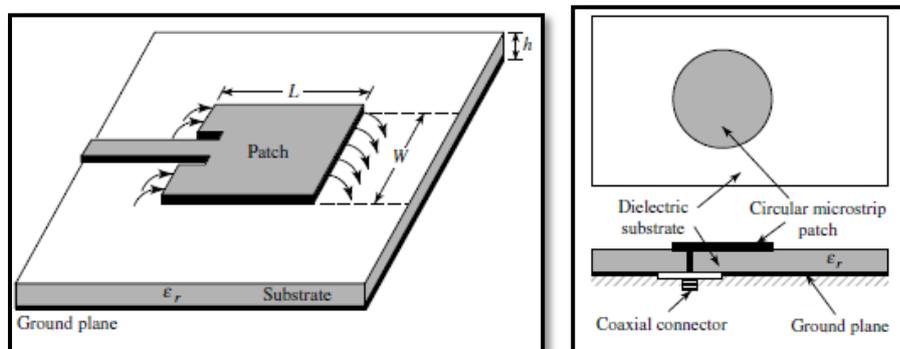
Cuadrada, rectangular, dipolo y circular son las usadas más comúnmente por su fácil fabricación y análisis, también por sus atractivas características de radiación. Los dipolos son atractivos porque ellos poseen un inherente gran ancho de banda y ocupan menos espacio, las cuales se los puede utilizar para arreglos.

4.1.7.2. Métodos de alimentación

Hay muchas configuraciones que pueden ser utilizadas para alimentar las antenas microstrip. Las cuatro más populares son:

- Microstrip line
- Coaxial probe
- Apertura coupling
- Proximity coupling

Las configuraciones de alimentación más comunes y usadas se muestran en la figura 18 (a) y (b).



(a) Alimentación de línea microstrip

(b) Alimentación tipo probe

Figura 18. Alimentaciones típicas de antenas microstrip [6]

Arreglos y redes de alimentación en antenas microstrip.

Las antenas microstrip no son solamente utilizadas como elementos individuales, son también muy populares en arreglo. Los arreglos son muy versátiles y son usados, entre otras cosas, para sintetizar un patrón requerido que no puede ser conseguido con elementos individuales. En adición los están usados para escanear el haz de un sistema de antena, incrementado la directividad, y el rendimiento de varias otras funciones que pueden ser difíciles con un solo elemento. Los elementos pueden ser alimentados por líneas simples, como se muestra en la figura 19 (a), o por múltiples líneas como se muestra en la figura 19 (b). La primera es referida como series-feed network (red de alimentación serie), y el segundo es referido corporate-feed network (red alimentación compuesta). [6]

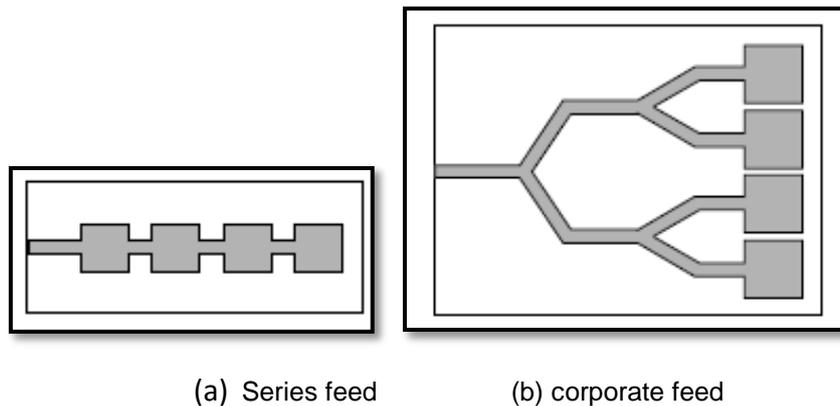
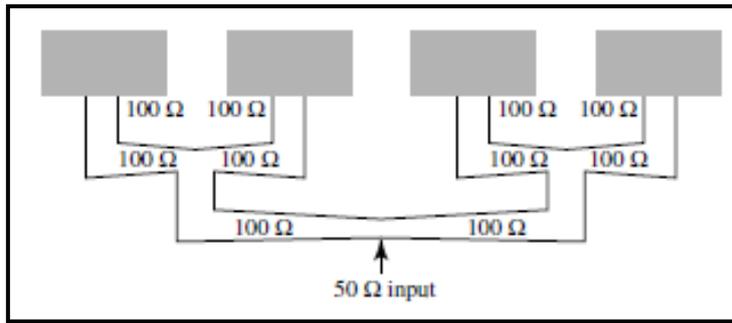
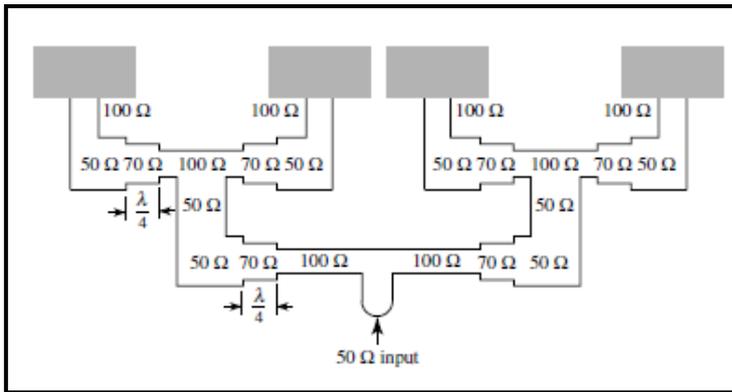


Figura. 19 Disposiciones de alimentación para arreglos de antenas microstrip. [6]

La “corporate-feed network” es usada para proveer potencia dividida de 2^n (es decir $n=2, 4, 6, 8, 16, 32, \text{etc.}$). Esto es logrado usando ya sea líneas cónicas, como se muestra en la figura 20 (a), para que coincida con elementos patch de 100ohm a 50ohm de entrada o usando una transformación de impedancia a cuarto de longitud de onda, como se muestra en la figura 20 (b).



(a) Líneas de arreglo



(b) Transformada $\lambda/4$

Figura 20. Impedancias de alimentación par un arreglo [6]

Un arreglo "Series-feed" puede ser convenientemente fabricada usando fotolitografía para ambos, los elementos radiantes y la red de alimentación. Sin embargo, esta técnica es limitada para arreglos con fijo haz, o lo que se explora mediante la variación de frecuencia, pero aplicado a arreglos lineales y planares con una simple o dual polarización. En un diseño es importante estar apto para tomar en cuenta este y otros efectos, tal que haya un acoplamiento mutuo, reflexión interna.

Arreglo "Corporate-fed" son generales y versátiles. Con este método el diseñador tiene más control de la alimentación de cada elemento (amplitud y fase), y este es ideal para arreglo de fase escaneado, arreglos multihaz, o arreglos forma de haz. La fase de cada elemento puede ser controlada usando deslizadores de fase mientras la amplitud puede ser ajustada usando ya sea amplificador o atenuador.[6]

Lo que ha sido el diseño y prueba de antenas microstrip, indican que la radiación de la línea de alimentación, usa ya sea una serie o corporate feed network. Tanto la polarización cruzada y los lóbulos laterales se pueden mejorar por aislamiento de la

red de alimentación desde la cara de radiación del arreglo. Este puede ser logrado ya sea usando una sonda de alimentación o un acoplamiento de apertura. En la figura 21 (a) y (b) se muestra un arreglo de parches circular respaldados por ya sea cavidades rectangulares o circulares.

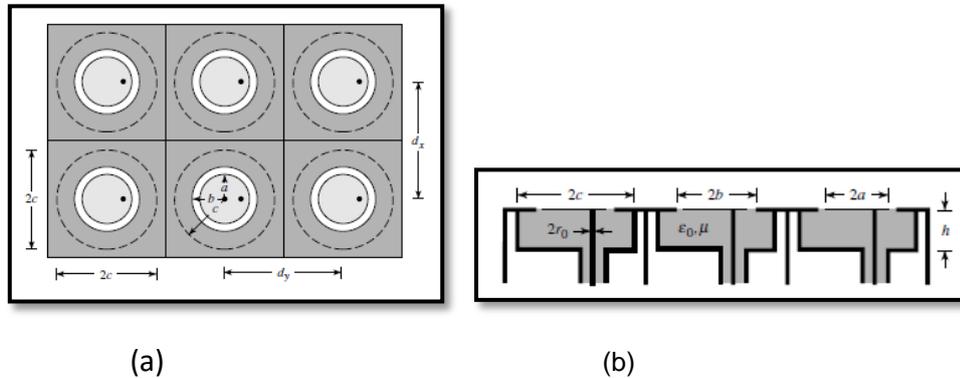


Figura 21. Array de parches circulares respaldado por cavidades circulares[6]

El coeficiente de reflexión es definido como:

$$\Gamma(\theta, \varphi) = \frac{Z_{in}(\theta, \varphi) - Z_{in}(0, 0)}{Z_{in}(\theta, \varphi) + Z_{in}^*(0, 0)} \quad (\text{Ecuacion . 15})$$

Donde,

$Z_{in}(\theta, \varphi)$ Impedancia de entrada

4.1.7.3. Método de análisis

Hay muchos métodos de análisis para antenas microstrip. Los modelos más populares son las líneas de transmisión (transmission-line), cavidades y ondas completas. El modelo de línea de transmisión es el más fácil de todos, da una buena percepción física, pero es menos preciso y más difícil el modelo de acoplamiento, y es el que se utilizara. [6]

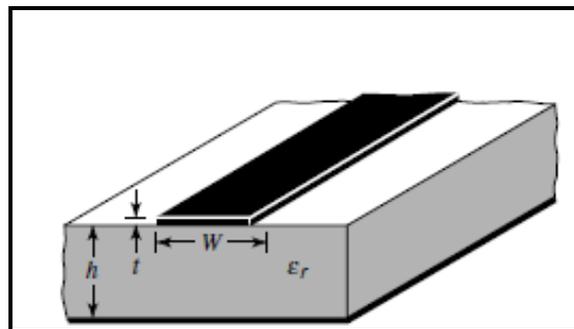
4.1.7.4. Patch rectangular

El patch rectangular es la configuración más extensamente utilizada. Es muy fácil para analizar usando el modelo de línea de transmisión, que son más precisos para substratos delgados.

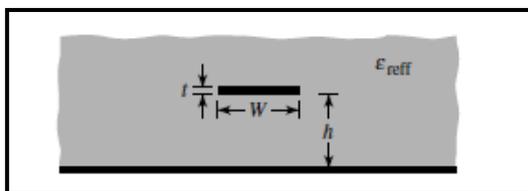
Básicamente el modelo de línea de transmisión representa la antena microstrip por dos ranuras, separados Z_c por una línea de transmisión de baja impedancia de longitud L .

Para la línea microstrip mostrada en la figura 22(a), normalmente las líneas de campo eléctrico son como se muestran en la figura 22(c). Esta es una línea no homogénea de dos dieléctricos; típicamente el substrato y el aire. Como puede notarse en la figura 22 c) una parte del campo eléctrico están en el substrato y otras en el aire. Como $W/h \gg 1$ y $\epsilon_r \gg 1$, las líneas de campo eléctrico se concentran en el substrato.

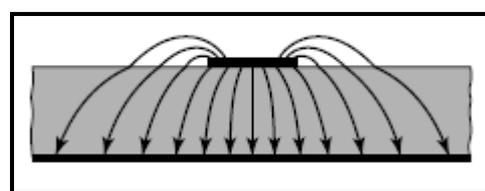
Se introduce la constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} , donde se asume que el centro del conductor de la línea microstrip esta con sus dimensiones originales y altura sobre el plano de tierra es incrustado dentro de un dieléctrico, como se muestra en la figura 22 (b), para una línea con aire arriba del substrato. La constante dieléctrica efectiva tiene valores en el rango de $1 < \epsilon_{reff} < \epsilon_r$. [6]



(a) Línea microstrip



b) Constante dieléctrica efectiva



c) Líneas de campo eléctrico

Figura 22. Líneas Microstrip, constante dieléctrica efectiva y líneas de campo eléctrico [6]

Para más aplicaciones donde la constante dieléctrica del substrato es más grande que la unidad $\epsilon_r \gg 1$, el valor de ϵ_{reff} puede cerrar con el valor del actual dieléctrico

constante ϵ_r del substrato, con esto hace que sea un sistema *homogéneo*¹⁸. Para bajas frecuencias la constante dieléctrica efectiva es esencialmente constante. Los valores iniciales de la constante dieléctrica efectiva están referidos como valores estáticos, y están dados por:

$$W/h > 1$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (\text{Ecuacion. 16})$$

Por otro lado para el principal E-plane (xy-plane), como se muestra en la figura 23 a), donde las dimensiones del patch a lo largo de la longitud, tienen que ser extendidas a cada lado una distancia ΔL , como esta en función de la constante dieléctrica efectiva y la razón del ancho a el alto (W/h). [6]

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{Ecuacion 17})$$

Las dimensiones de la longitud del patch, puede ser extendida por ΔL en cada lado, la longitud efectiva del patch es ahora: ($L = \lambda/2$ para el modo dominante TM_{010})

$$L_{eff} = L + 2 \Delta L \quad (\text{Ecuacion. 18})$$

Donde

$$L = \frac{1}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}\sqrt{u_0\epsilon_0}}} - 2 \Delta L \quad (\text{Ecuacion . 19})$$

Para el modo dominante TM_{010} , la frecuencia resonante de la antena microstrip es una función de su longitud y está dada por:

$$fr = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Ecuacion. 20})$$

¹⁸ Homogéneo: Que está formado por elementos con características comunes referidas a su clase o naturaleza, lo que permite establecer entre ellos una relación de semejanza y uniformidad.

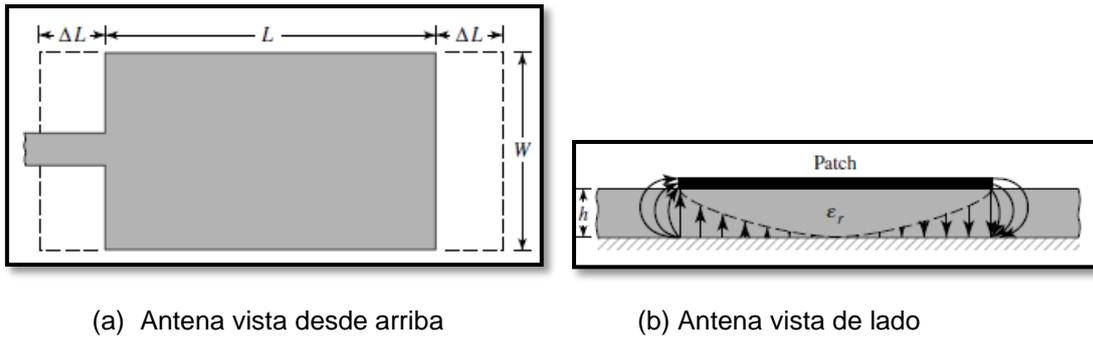


Figura 23. Longitud física y efectiva de la antena patch rectangular

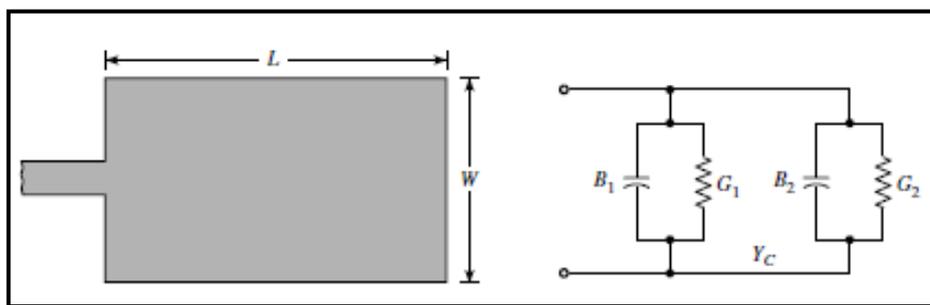
Para un eficiente radiador, hay que considerar un ancho del patch que pueda obtener una buena eficiencia, la fórmula para determinar el ancho del patch es,

$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{Ecuacion. 21})$$

Donde c = velocidad de la luz en el espacio libre

Además de todos estos parámetros de diseño, también es importante la conductancia, donde cada espacio radiante es representada por una admitancia equivalente Y (con conductancia G y susceptancia B), como se muestra en la figura 24. Donde a partir del modelo equivalente se tiene:

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (\text{Ecuacion. 22})$$



(a) Patch rectangular (b) modelo equivalente de transmisión

Figura 24. Patch Rectangular Microstrip y su equivalente circuito del modelo de líneas de transmisión.[6]

Donde para un espacio de ancho finito W

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (koh^2) \right] \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (\text{Ecuacion. 23})$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(koh)] \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (\text{Ecuacion. 24})$$

La admitancia equivalente es

$$Y_2 = Y_1, \quad G_2 = G_1, \quad B_2 = B_1$$

La conductancia de un espacio individual puede ser obtenida usando la expresión de campo derivada del modelo de cavidad. En general, la *conductancia*¹⁹ es definida como

$$G_1 = \frac{2Prad}{|V_0|^2} \quad (\text{Ecuacion. 25})$$

La potencia de radiación es escrita como

$$Prad = \frac{|V_0|^2}{2\pi\eta_0} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (\text{Ecuacion. 26})$$

Puede ser expresada la conductancia como

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (\text{Ecuacion. 27})$$

Donde

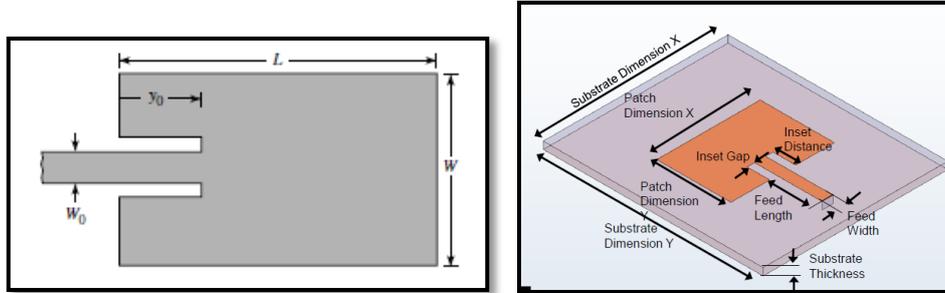
$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (\text{Ecuacion. 28})$$

$$I_1 = -2 + \cos(X) + X \text{si}(Y) + \frac{\text{si}(X)}{X} \quad (\text{Ecuacion. 29})$$

¹⁹ Conductancia: Se denomina conductancia eléctrica (G) a la facilidad que ofrece un material al paso de la corriente eléctrica

$$X = koW \quad (\text{Ecuacion. 30})$$

La resistencia de entrada resonante, esta tiene que ser mostrada tal que la resistencia de entrada resonante pueda ser cambiada pero usando un 'inset feed' denominada y_0 en este caso, en el caso del software HFSS se la denomina inset distance como se muestra en las siguientes figuras.

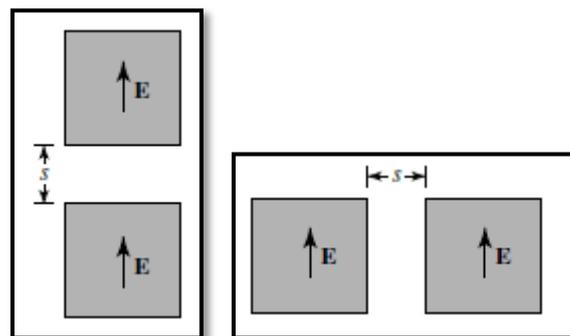


a). Alimentación del patch (y_0) b) Alimentación del patch (inset distance)

Figura 25. Alimentación de la antena [6],[9]

4.1.7.5. Acoplamiento

El acoplamiento entre dos o más elementos de antenas microstrip puede ser tomado en cuenta fácilmente usando el análisis de onda completa. Para dos antenas patch, el acoplamiento por dos elementos de lado a lado son una función de la alineación relativa. Cuando los elementos son posicionados colonialmente a lo largo del plano E, esta disposición es referida como el *plano-E*, como se muestra en la figura 26(a), donde los elementos son posicionados colonialmente a lo largo del plano H, este arreglo es referido como el *plano-H*, como se muestra en la figura 26(b). [6]



a). Plano-E b) plano H

Figura 26. Disposiciones de arreglos tanto en el Plano E y H [6]

Para una separación borde a borde de s , el plano-E exhibe el más pequeño acoplamiento aislado para muy pequeño espacio (típicamente $s < 0.10 \lambda_0$), donde el plano-H exhibe el acoplamiento más pequeño para espaciamientos largos (típicamente $s < 0.10 \lambda_0$). El espaciamiento de una u otro depende de las propiedades y dimensiones geométricas de la antena microstrip. Típicamente las variaciones son mostradas en la siguiente figura:

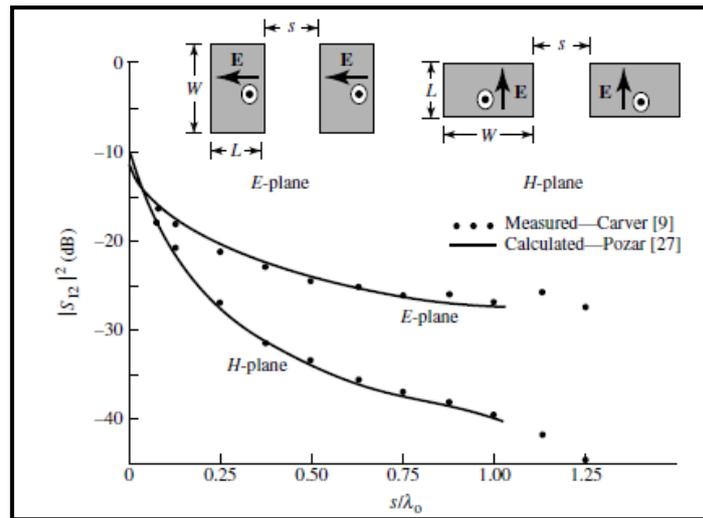


Figura 27. Medida y calculo mutuo del acoplamiento entre dos coax-fed antenas microstrip

En general, el acoplamiento mutuo es atribuido principalmente a los campos que existen a lo largo de la interface aire-dieléctrico. [6]

4.1.8. Antenas logarítmico-periódicas

“Si una estructura se hace igual a si misma por un valor particular del factor de escala τ , tendrá las misma propiedades para las frecuencias $f_0, f_1 = \frac{f_0}{\tau}, f_2 = \frac{f_0}{\tau^2}, \dots \dots f_n = \frac{f_0}{\tau^n}$ ”.

Sus parámetros expresados en función del logaritmo de la frecuencia,[39]

$$\log f_n = \log f_0 - n \log \tau \quad (\text{Ecuacion 31})$$

Serán así funciones periódicas, lo que justifica su nombre. Además, si τ es próximo a la unidad, el periodo será pequeño y cabe esperar que los parámetros varíen poco dentro del mismo, obteniéndose así antenas que son prácticamente independientes de la frecuencia dentro de los límites.

Las antenas log – periódicas se clasifican en:

- Superficies planares y de cable
- Arreglo de dipolos
- Loop antena
- Antena periódica no planar

A continuación se muestra un ejemplo de antena de este tipo.

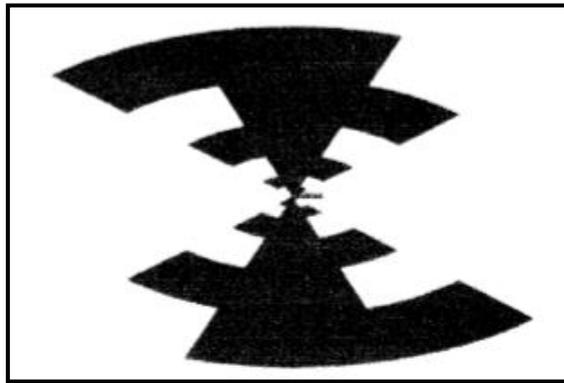


Figura 28. Estructura planar de la Antena Log – periódica dentada [39]

4.1.8.1. Estructuras dentadas y quebradas

La primera estructura de este tipo es la de la figura adjunta: Una lámina metálica plana dentada, definida por los ángulos α y β , en las que las posiciones radiales de los dientes cumplen,

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} > 1 \quad (\text{Ecuacion 32})$$

Si se toma $\alpha=90$ grados y $\beta=45$ la estructura es además complementaria, asegurando una impedancia de entrada $Z_{in} = 188$. Estas antenas radian campos linealmente polarizados, bidireccionalmente con sendos máximos perpendiculares a la lámina.

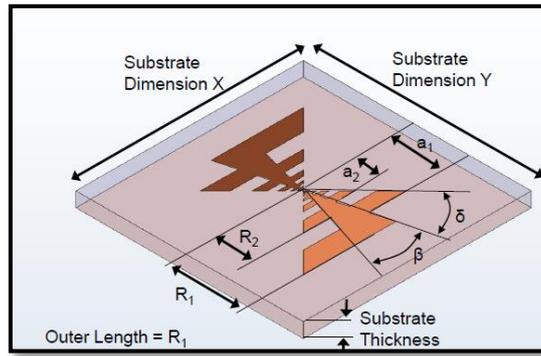


Figura 29. Antena Log-Periódica planar y sus variables [9]

La radiación aparece asociada a las acumulaciones de carga que se producen en las discontinuidades de los contornos exteriores de las láminas, al girar la corriente que tiende a acumularse sobre dichos contornos. Esto permite construir estructuras equivalentes a base de hilos sencillos. La radiación se produce fundamentalmente sobre los dientes resonantes.

4.1.8.2. Arreglo log - periódico de dipolos

El diseño de una antena log- periódica procede de dos partes. Primera, para las características del patrón deseado, determinar el número de elementos en la región activa y el espaciamiento entre los elementos. Segundo, se determinara los puntos de truncamiento de los niveles actuales sobre la antena para establecer el número de elementos requeridos para un rango de frecuencias dado.

En la siguiente figura se muestra la antena log-periódica con su alimentación. Aquí se indica la longitud del dipolo par L_1 . La distancia desde el virtual ápex al dipolo se da por R_n . La distancia entre los elementos es d_n . Se empieza con las dimensiones iniciales $L_1, R_1, y d_1$ y las otras dimensiones se las obtiene con el factor de escalamiento (τ).

$$L_2 = \tau L_1 \quad (\text{Ecuacion 33})$$

$$R_2 = \tau R_1 \quad (\text{Ecuacion 34})$$

$$d_2 = \tau d_1 \quad (\text{Ecuacion 35})$$

$$L_3 = \tau L_2 = \tau^2 L_1 \quad (\text{Ecuacion 36})$$

En general:

$$L_n = \tau^{n-1} L_1 \quad (\text{Ecuacion 37})$$

$$R_n = \tau^{n-1} R_1 \quad (\text{Ecuacion 38})$$

$$d_n = \tau^{n-1} d_1 \quad (\text{Ecuacion 39})$$

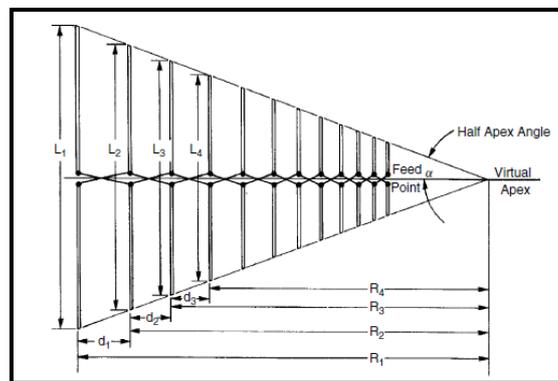


Figura 30. Antena dipolo Log-periódico [39]

El ángulo entre los puntos extremos del dipolo y la línea central α , el ángulo half ápex es dado por

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L_n}{2R_n} \quad (\text{Ecuacion 40})$$

También se introdujo un constante espaciado (σ) como segunda constante para describir la antena

$$\sigma = \frac{d_n}{2L_n} \quad (\text{Ecuacion 41})$$

También se puede calcular α a partir de σ como se muestra

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{1 - \tau}{4\sigma} \quad (\text{Ecuacion 42})$$

Se combina el rango de operación de frecuencia deseado con el truncamiento superior e inferior determinadas por la constante τ y σ para calcular la longitud del elemento más largo y donde λL es la longitud de onda de operación y k_1 es la constante de truncamiento baja.

Se determinar k_1 desde la ecuación empírica

$$k_1 = 1.01 - 0.519\tau \quad (\text{Ecuacion 43})$$

Para el cálculo del truncamiento superior se calcula de la siguiente manera

$$k_2 = 7.08\tau^3 - 21.98\tau^2 + 21.98\tau + \sigma(21.82 - 66\tau + 62.12\tau^2 - 18.29\tau^3) \quad (\text{Ecuacion 44})$$

La longitud del elemento pequeño es $L_u = k_2\lambda U$, donde λU es la longitud de onda de operación más pequeña.

Para calcular el número de dipolos de la antena se lo realiza con la siguiente formula.

$$N = 1 + \frac{\log \frac{k_2}{k_1} + \log \frac{fL}{fU}}{\log \tau} \quad (\text{Ecuacion 45})$$

Dadas la frecuencia $fL = fU = f$, se puede calcular el numero de elementos de la región activa desde.

$$N_a = 1 + \frac{\log \frac{k_2}{k_1}}{\log \tau} \quad (\text{Ecuacion 46})$$

Si se incrementa el número de elementos en la región activa se incrementa la ganancia. Para determinar la ganancia desde el virtual ápex como se mostró en la figura anterior se da por,

$$R_n = \frac{2 \ln \sigma}{1 - \tau} \quad (\text{Ecuacion 47})$$

4.1.9. Antenas monopolo y Antenas Discónicas

Se puede sustituir un plano conductor perfecto por unas corrientes equivalentes. Este efecto se aprovecha en las denominadas antenas monopolo. Estas se usan sobre todo a bajas frecuencias, donde es difícil construir dipolos debido a su gran tamaño. Son antenas de hilo situadas verticalmente sobre la tierra y conectadas en su base a un generador, que tiene el otro terminal conectado a tierra. La configuración se presenta en la figura 31. [5]

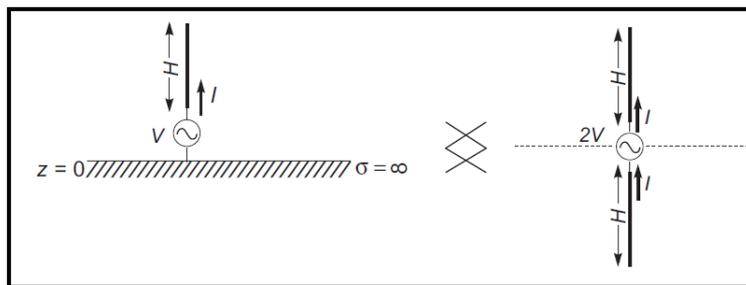


Figura 31. Antena monopolo [5]

Al analizar el modelo equivalente formado por el monopolo y su imagen el resultado es una antena dipolo. En el semiespacio superior los campos serán los producidos por el monopolo y su imagen, que serán los de un dipolo de brazo igual a la longitud del monopolo. A continuación se hace la comparación del monopolo y el dipolo.

$$I(0)_{monopolo} = I(0)_{dipolo} \quad (\text{Ecuacion 48})$$

$$P_{r\ monopolo} = \frac{1}{2R_{r\ dipolo}} \quad (\text{Ecuacion 49})$$

ya que solo radia en medio del espacio

$$R_{r\ monopolo} = \frac{P_r}{I(0)^2} = 1/2R_{r\ dipolo} \quad (\text{Ecuacion 50})$$

$$V_{monopolo} = 1/2V_{dipolo} \quad (\text{Ecuacion 51})$$

$$D_{monopolo} = 2D_{dipolo} \quad (\text{Ecuacion 52})$$

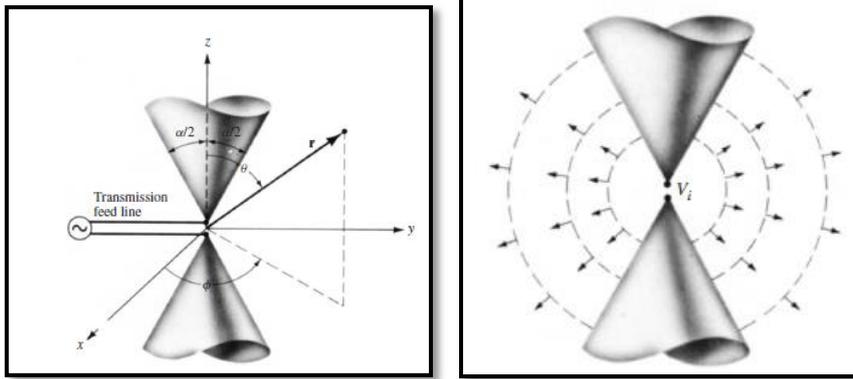
Los campos en el semiespacio superior son los mismos para el monopolo que para el dipolo, pero dado que el primero solo radia en el semiespacio, su directividad será el doble que la del dipolo equivalente. También resulta que la potencia entregada por el monopolo a una carga adaptada será la mitad de la del dipolo. [5]

Por lo tanto para la longitud que debe tener un dipolo infinitesimal es $l \ll \lambda$, el cual es posicionado simétricamente en el origen de sistemas de coordenadas y orientado a lo largo del eje z.

4.1.9.1. Antenas Bicónicas

Las antenas Bicónicas es una modificación de una antena dipolo, donde el espesor del conductor incrementa linealmente con la distancia del origen de la antena. Matemáticamente cada brazo es un cono conductor infinito, y la geometría es una estructura simétrica rotacional. En una antena simétrica Bicónicas los ángulos de los conos de los dos brazos son iguales, como se muestra en la figura 32. Sin embargo, esto no es una necesidad y cada brazo puede tener un ángulo de separación diferente. En último caso, cuando el ángulo del cono para el brazo inferior incrementa a 180 grados, la geometría se modifica a una antena monopolo cónica. Una propiedad interesante de esta antena es definida y gobernada por ángulos. Así esta satisface el principal requerimiento de antenas independientes de la frecuencia. [40]

El ancho de banda de la antena se convierte en una función de la relación de longitud del brazo, entre la máxima y mínima longitud. Así en diseños prácticos esta relación puede ser muy grande, una antena Bicónicas truncada puede ser una antena de ancho de banda significativamente grande.



a) Geometría Bicónicas

b) Ondas Esféricas

Figura 32. Geometría de antenas Bicónica: a) Geometría Bicónica, b) Ondas esféricas [40]

4.1.9.1.1. Antena Discónica

Una antena Discónica es en realidad una antena Bicónica donde uno de los conos es remplazado por un plano de tierra en forma de disco, formando en si un arreglo entre un cono y un disco para formar la antena Discónica. El disco es montado en la parte superior del cono como se muestra en la figura a continuación.

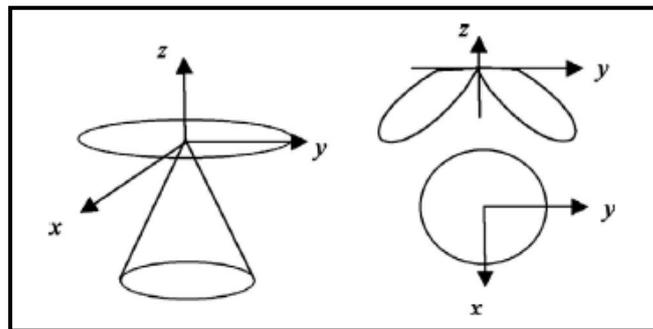


Figura 33. Patrón de radiación típica de la antena Discónica [40]

La antena Discónica tiene patrón de radiación con polarización lineal como un monopolo. El patrón de radiación es cercano a ser omnidireccional. En el plano de elevación el patrón de radiación tiene la forma de rosquilla con un ancho de banda típico entre 20 y 80 grados.

La antena discónica tiene tres componentes: el disco, el cono y el aislante, como se muestra en la figura 34.

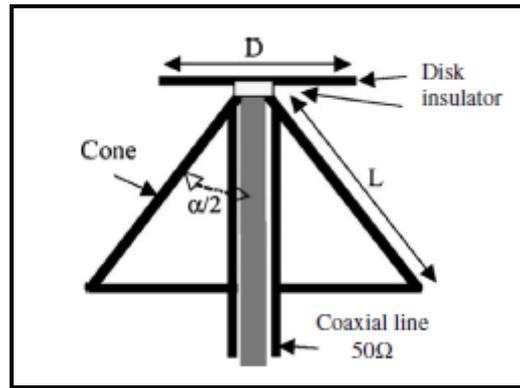


Figura 34. Elementos de una antena Discónica [40]

Como se nota en la figura esta se alimenta con un cable coaxial en el cual la parte externa del conductor es conectado al cono y la parte interna es conectada al disco de tierra. El insulador mantiene el disco y el cono separados. La impedancia de entrada de la antena depende en el ángulo del cono y el espacio del disco al como como se nota en la figura 34.

La longitud L del elemento del cono debe ser,

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuacion 53})$$

$L = \text{longitud del cono}$

El diámetro de la parte superior del cono depende del diámetro del cable coaxial y determina el límite de frecuencia alta de la antena, cuando menor es el diámetro mayor es la frecuencia. [40]

Los elementos de disco deben tener una longitud D global de 0,7 veces de un cuarto de longitud de onda a la frecuencia mínima.

$$D(\text{disco}) = 70\% * \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecaucion 54})$$

La altura inclinada del cono es igual a un espacio libre de un cuarto de longitud de onda completa en la frecuencia más baja de interés.

$$D_{\text{cono}} = \frac{\lambda}{4} > L \quad (\text{Ecuacion 55})$$

Diferentes variaciones de antenas discónicas son propuestas para incrementar el ancho de banda. Entre estas tenemos:

Un parámetro limitante de disco es el punto de alimentación. Dado que el cono es alimentado por un cable coaxial, el tipo de cono tiene que ser truncado al diámetro del cable coaxial. El ancho de banda de frecuencia es inversamente proporcional al tamaño de truncado. Para superar este problema y aumentar el ancho de banda fijarse en la configuración de la siguiente figura.

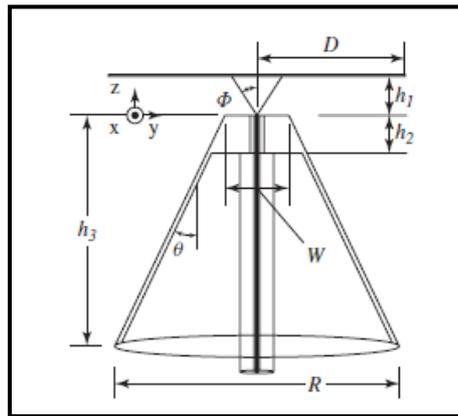


Figura 35. Configuración de Antena discónica [40]

4.2. Radio Cognitiva (CR)

4.2.1. Introducción

El *espectro*²⁰ es regulado por el Estado, que administra y asigna la utilización de las diferentes bandas de frecuencia a distintas empresas, usuarios y servicios mediante una autorización, permiso o *licencia*²¹ a largo plazo en amplias regiones geográficas.

Cada país tiene un cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias, conforme lo acordado en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [11].

El espectro es un recurso escaso donde cada vez es más difícil encontrar bandas libres para el despliegue de nuevos sistemas, especialmente en las bandas por debajo de los 3 GHz, particularmente valiosas para los sistemas inalámbricos debido a sus favorables características de propagación.

Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo por la FCC (Federal Communications Commission) han demostrado que gran parte del espectro licenciado asignado está infrautilizado, observándose grandes variaciones temporales y geográficas en su uso, con rangos de utilización desde el 15% al 85%. [12]. Además, medidas recientes de utilización de espectro [13, 14] muestran que, mientras que ciertas partes son altamente utilizadas, otras permanecen prácticamente sin usar.

Desde esta perspectiva, que muestra la ineficiencia de las actuales políticas de asignación de espectro, diferentes organismos empezaron a considerar la necesidad de introducir reformas, no sólo para mejorar su utilización sino también para intentar proveer un nuevo espectro disponible para nuevas aplicaciones.

En el 2003, la FCC emitió una NPRM (Notice of Proposed Rulemaking), donde apremia por el replanteamiento de las actuales arquitecturas de redes inalámbricas. El principio básico para el diseño de estas nuevas redes propuesto por la FCC es Radio Cognitiva (Radio Cognitiva,). [15]

²⁰ Espectro electromagnético: es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas

²¹ Licencia: Permiso que ha sido atribuido por el ente encargado, para hacer uso de una banda de radiofrecuencia

Radio Cognitiva es un radio inteligente que puede aprender los servicios disponibles en redes inalámbricas computacionales localmente accesibles, por lo que no tendría ninguna confusión para encontrar la red inalámbrica correcta para descargar un video, programa, etc.

Con el objetivo de aumentar la eficiencia en la utilización del espectro disponible, la FCC propuso la apertura de ciertas bandas asignadas a televisión para su uso por usuarios no licenciados, denominados *Usuarios Secundarios*²², mediante técnicas de compartición del espectro basado en la oportunidad (*OSS por Opportunistic Spectrum Sharing*). En la Figura 36 se muestra las oportunidades del espectro, tanto en espacio, tiempo y frecuencia.

Sin embargo, dado que actualmente la mayor parte del espectro está asignado, se debe tener como premisa fundamental la no interferencia con los usuarios licenciados o *Usuarios Primarios*²³, por lo que resulta evidente que para el desarrollo de futuros dispositivos, aplicaciones o sistemas basados en Radio Cognitiva es necesaria la detección de todo tipo de señales.

Pues bien la Radio Cognitiva es la convergencia de muchos equipos que tienen acceso a redes computacionales locales e inalámbricas. La Radio Cognitiva ofrece beneficios a los usuarios ya que es un radio inteligente capaz de utilizar su capacidad de Radio Cognitiva de manera óptima para interactuar con el medio ambiente que la rodea, empleando el aprendizaje sobre el medio ambiente y utilizando el conocimiento aprendido para mejorar la comunicación, de esta forma ofrece diversas aplicaciones en diferentes sectores para ayudarnos a realizar diferentes tareas, facilitando nuestra vida diaria. [38]

Así pues, el primer paso para la creación de un dispositivo CR es el desarrollo de técnicas que permitan la detección fiable de las partes inutilizadas del espectro, lo que se conoce como Spectrum Sensing. Así, un dispositivo CR debe escanear periódicamente su entorno de radiofrecuencia para detectar las partes del espectro que no están siendo utilizadas temporalmente por sus usuarios primarios. Estas

²² Usuarios Secundarios: Son usuarios no licenciados, pero que con la tecnología de CR puede transmitir información por las bandas licenciadas, sin interferir.

²³ Usuarios primarios: Son los usuarios a los que le pertenece el espectro.

bandas sin utilizar se denominan espacios en blanco o bandas blancas (²⁴White Bands) [17].

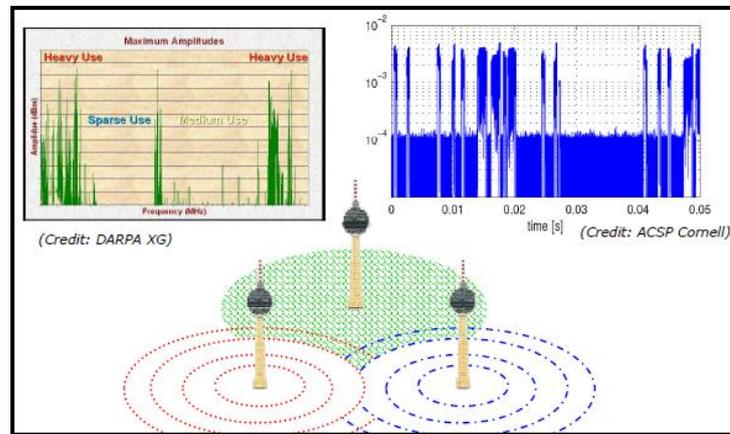


Figura 36. Oportunidades del espectro en espacio, tiempo y frecuencia. [21]

4.2.2. Antecedentes de radio cognitiva.

Uno de los impulsores que genera la constante evolución de las comunicaciones móviles, es el surgimiento de un gran número de estándares (GSM, WCDMA, TD-SCDMA, GSM-GPRS, CDMA200) y técnicas de acceso al medio (FDMA, TDMA, CDMA, WCDMA), que facilitan el uso eficiente del espectro, pero que necesitan ser soportados por distintas industrias de terminales y de estaciones base. Además, se ha generado una gran demanda en la conectividad inalámbrica de Internet pero con múltiples servicios [24].

El término ²⁵SR (*Software Radio*) fue acuñado por Joseph Mitola III, en 1991, para referirse a un tipo de radios reprogramables o reconfigurables [19], equipos donde un mismo elemento de hardware es capaz de realizar diferentes funciones, en distintos instantes de tiempo, con la introducción de cambios en su configuración mediante software.

A continuación la definición de SR dada por Joseph Mitola III:

A Software Radio is a radio whose channel modulations waveforms are defined in software. That is, waveforms are generated as sampled digital signals, converted from

²⁴ White Bands: Son los espacios en blanco o infrautilizados, que se encuentran dentro de las bandas de frecuencia asignadas.

²⁵ Software Radio: Es un radio reprogramable, que se adapta a las características de su entorno

digital to analog via wideband DAC (Digital to Analog Converter) and the possibly unconverted from IF (Intermediate Frequency) to RF (Radio Frequency). The receiver, similarly, employs a wideband ADC (Analog to Digital Converter) that captures all the channels of the software radio node. The receiver then extracts, down converts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor [20].

En un sistema SR la digitalización de la señal se realiza en la antena. Sin embargo, el estado actual de la tecnología hace que un sistema SR ideal no se pueda implementar. Por eso se considera que un SDR (Software-Defined Radio) es una versión de un SR implementable con la tecnología disponible, donde la conversión se realiza en la etapa de Frecuencia Intermedia (IF), tras un filtrado selectivo.

La primera implementación conocida del concepto SDR fue el proyecto militar estadounidense "SpeakEasy", cuyo objetivo principal era establecer más de diez tipos de tecnologías de telecomunicaciones inalámbricas (las más usadas por el ejército americano) en un solo equipo programable, que operaría en un rango de frecuencias desde los 2 MHz hasta los 200 MHz. Un objetivo adicional del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para así tener en cuenta posibles futuros estándares. Dicho proyecto empezó en 1991 y sólo en 1995 fue posible lograr todos los objetivos planteados. Sin embargo, en el proyecto inicial sólo se podía mantener una comunicación a la vez, por lo cual se modificó y se planteó una segunda fase del mismo, en la que se trabajaron aspectos como la disminución de peso y coste, el incremento de la capacidad de procesamiento, la simultaneidad de comunicaciones y el diseño basado en software libre. [21]

El Joint Tactical Radio Systems (*JTRS*, pronunciado "Jitters" en círculos militares) es un programa del departamento de defensa estadounidense, cuyo objetivo es desarrollar sistemas de radiocomunicaciones reconfigurables vía software para el ejército americano, desde terminales de bajo costo con modulaciones concretas de banda estrecha, hasta sistemas multi-modo, multi-banda y multi-canal, capaces de soportar un gran número de modulaciones, tanto de banda estrecha como de banda ancha. [22]

Este proyecto surgió a raíz de los problemas en las comunicaciones que surgieron durante las operaciones Furia Urgente (*Granada*) y Tormenta del Desierto (Irak), debido a las insuficiencias en cuanto a interoperabilidad y ancho de banda de los

equipos existentes en aquel momento. En el desarrollo del proyecto se ha creado toda una familia de sistemas de radiocomunicaciones para transmisión de datos, voz y vídeo en el rango de 2 MHz a 2000 MHz, sustituyéndose un total de 750.000 equipos por 180.000 SDR. [27]

La iniciativa más popular desarrollada con tecnología SDR es la plataforma GNU Radio. Es un conjunto de herramientas para el procesamiento de señal y el control del hardware. Está programado en Python y C++, software libre, para el desarrollo de sistemas SDR, creado en 1998 por Eric Blossom. [25, 26]

En la actualidad, el SDR Forum (*Software Defined Radio Forum*), grupo independiente formado por la industria, científicos, ingenieros y organismos reguladores, es el encargado de dirigir el desarrollo de la tecnología SDR. Desde el punto de vista técnico, se considera que SDR es una buena alternativa para la integración y convergencia de tecnologías inalámbricas, pero su implementación comercial aún impone ciertos retos, sobre todo de tipo económico, por los costos de los equipos necesarios. Sin embargo, se espera que a corto plazo la tecnología evolucione lo suficiente, sobretodo en el campo de la microelectrónica, como para que los estándares puedan adoptarlo y crear así un verdadero soporte de capa física para la convergencia y la interoperabilidad, lo cual permite una evolución en los últimos años del concepto de SDR hacia un nivel superior como es Radio Cognitiva. [23]

4.2.3. Definición de radio cognitiva.

Radio cognitiva es un sistema SDR inteligente o cognitivo. El término fue acuñado por Joseph Mitola III en su tesis doctoral. Nombraba un dispositivo de CR como una pequeña parte del mundo físico, capaz de detectar las necesidades de comunicación de su usuario y, mediante la adquisición de conocimiento de su entorno, disponer los mecanismos para satisfacer dichas necesidades: [28]

Aquí la Definición: “Cognitive Radio is a radio that employs model based reasoning to achieve a specified level of competence in radio-related domains” [28].

“Radio Cognitiva es un radio que emplea el razonamiento basado en modelos para alcanzar un determinado nivel de competencia en los ámbitos relacionados con la radio”

En cambio según la FCC [16], un dispositivo de CR es un sistema de radiofrecuencia capaz de variar sus parámetros de transmisión basándose en su interacción con el entorno en el que opera.

Dada estas definiciones, las dos características principales de un dispositivo de este tipo son:

- Capacidad cognitiva: Tecnología necesaria para capturar la información de su entorno de radiofrecuencia e identifica las partes del espectro que no estén siendo utilizadas.
- Auto-reconfiguración: Tecnología necesaria para que el dispositivo pueda variar, de manera dinámica, distintos parámetros relacionados con la transmisión o recepción (frecuencia, potencia, modulación, etc.), de acuerdo con su entorno.

Existen varios tipos de radio cognitiva, las cuales dependen del conjunto de parámetros que se tienen en consideración a la hora de tomar decisiones sobre la alteración de la transmisión y recepción o bien de razones históricas.[29]

Las dos principales son:

- Radio Cognitiva completa o “Radio de Mitola”.- cualquier parámetro observado en un nodo inalámbrico y/o una red se tiene en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre el cambio de parámetros de transmisión y/o recepción.
- Radio Cognitiva detectora del espectro.- es un caso especial de la radio completamente cognitiva en el cual solo se observa el espectro de radio frecuencia. [38]

Dependiendo de las partes del espectro disponibles para la Radio Cognitiva es posible distinguir:

- Radio cognitiva de banda bajo licencia.- Cuando la Radio Cognitiva es capaz de usar bandas asignadas a usuarios bajo licencia, además de la utilización de bandas de libre uso como la banda UNII o la banda ISM.
- Radio cognitiva de banda libre de acceso.- Cuando la Radio Cognitiva sólo puede utilizar las partes de libre acceso del espectro de radiofrecuencia

De acuerdo al tipo de radios, el proyecto de tesis está enfocado en la Radio Cognitiva detectora del espectro particularmente la utilización de bandas de TV para la comunicación.

4.2.4. Características de radio cognitiva.

La Radio Cognitiva surgió gracias al Radio Definido por Software, ya que ésta emplea un comportamiento similar al SDR, es decir una red inalámbrica totalmente reconfigurable que cambia sus funciones de comunicación dependiendo de las demandas de la red y los usuarios, así mismo la Radio Cognitiva tiene la capacidad de tomar decisiones.[38]

Las características básicas que debería poseer un sistema CR son:

- Percibir el entorno en el que opera, mediante técnicas de *spectrum sensing* (censado del espectro).
- Poseer conciencia de dicho entorno, así como de sus propias capacidades y recursos.
- Variar y adaptar, de forma inteligente, sus parámetros de transmisión/recepción.
- Poder actuar tanto de transmisor como de receptor, de forma autónoma.

Según la FCC [31], un dispositivo de radio cognitiva debería poder reconfigurar los siguientes parámetros:

- Sistemas de comunicación: operar a través de distintos sistemas de comunicación.
- Modulación: Seleccionar el tipo de modulación adecuado en función de las características de canal y los requerimientos del usuario.
- Frecuencia Portadora: Con Base en la información sobre el espectro radioeléctrico disponible y del tipo de transmisión a realizar, debería ser capaz de seleccionar la frecuencia portadora más adecuada.
- Potencia transmitida: Si las características del medio permiten reducción en la potencia transmitida, el CR debería reducirla hasta un cierto nivel de manera que continuara manteniendo la calidad de la transmisión pero, a la vez, permitiera aumentar el número de usuarios que comparten esa porción de espectro, reduciendo la interferencia entre ellos.

Las bandas de la telefonía celular están sobrecargadas en la mayor parte del mundo, pero la banda de los radioaficionados no había confirmado tal observación, esto ha sido determinado por estudios independientes realizados en algunos países y que concluyen que la utilización del espectro depende fuertemente del tiempo, lugar, densidad poblacional y el nivel socioeconómico.[31]

4.2.5. Ciclo Cognitivo

Para que un dispositivo de CR pueda obtener todas las características antes mencionadas, su función se basa según Mitola en diferentes niveles de funcionalidad. Son nueve los niveles que son parte del ciclo cognitivo, donde cada uno como se muestra en la figura siguiente tiene una función, que es la de ir aprendiendo de acuerdo a la experiencia, tomando decisiones, realizando planes, con el fin de poder transmitir información de la mejor manera hacia el usuario final. Los niveles de funcionalidad para radio cognitiva, que van desde el 0 hasta el ocho, donde se llega hasta una compleja radio *autoconsciente*²⁶. En la Figura 37 se pueden observar los niveles del ciclo cognitivo. [38]

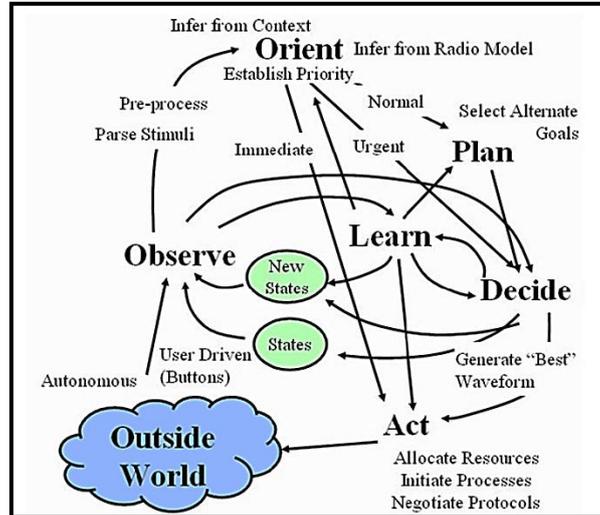


Figura 37. Ciclo Cognitivo por Mitola III [38]

En cuanto al censado del espectro, dentro del ciclo cognitivo se desarrolla en cuatro fases. [38]

²⁶ Radio Autoconsciente: Es un radio que está en la capacidad de aprender de la experiencia y también que se adapte a las características del canal y medio de transmisión.

- **Observación**

En esta fase se verifica el ambiente de radio, es decir constituye la etapa de la detección, con lo que se pueden localizar aquellas bandas del espectro propiedad de los usuarios primarios que no se estén utilizando en un determinado instante de tiempo. La fase de operación en base a la figura está en la capacidad de orientar, aprender y tomar decisiones en base a la información experimentada.

- **Orientación**

En esta fase se analizan las bandas libres que se han detectado, las cuales constituyen los espacios en blanco (white spaces) que serán utilizados para las transmisiones por parte de los usuarios secundarios. Además en esta fase se pueden extraer los parámetros de transmisión de las bandas detectadas.

Esta toma como fuente la información de la fase anterior que es la de observación, y establece prioridades dependiendo del tipo de información, y con ello la lleva a tomar decisiones, ya sea para actuar inmediatamente, ya sea para armar un plan.

Hay dos formas de acceder al espectro con la técnica llamada Underlay y la técnica llamada Overlay como se muestra a continuación. La técnica Underlay es la más usada, ya que el usuario secundario puede transmitir en todo momento, pero con una potencia muy baja en relación a la potencia de los usuarios secundarios. La técnica de Overlay es la más óptima porque se transmite a la misma potencia que el primario pero sin interferir, con la diferencia de que el sistema es más complejo.

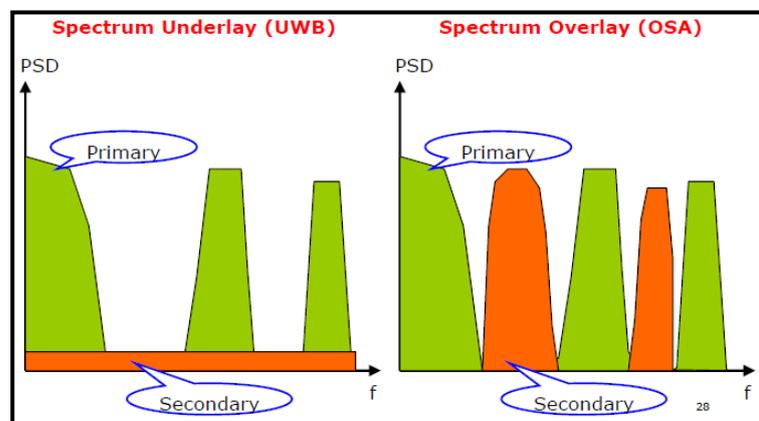


Figura 38. Underlay vs Overlay [21]

- **Decisión**

Luego de obtener los resultados de las dos fases anteriores se tendrá que hacer una comparación de todas las bandas disponibles y decidir cuál de ellas es la más apropiada para la transmisión que se debe realizar.

La decisión puede depender directamente de la fase de observación como de la Orientación, donde se decide a actuar y también contribuye en el aprendizaje de la red.

- **Actuación**

En esta fase se lleva a cabo la transmisión; pero como se sabe el ambiente de radio es cambiante, es decir que por la naturaleza misma de radio cognitiva puede aparecer en cualquier momento un usuario primario, el cual tiene preferencia sobre el usuario de CR, por lo tanto se debe estar preparado para actuar en cualquier momento, conformándose así un ciclo.

4.2.6. Arquitectura de radio cognitivo (CRN)

La arquitectura del sistema de radio cognitiva es una plataforma independiente, definida por un paquete de algoritmos mediante software, llamado motor cognitivo, con una interfaz general de radio. Dentro del motor cognitivo los módulos funcionales son diferentes y están definidos para tener en cuenta las capacidades cognitivas como conciencia, razonamiento, creación de soluciones óptimas y control adaptable del radio. [27]

Una solución general del radio cognitivo está definida en la forma del paquete del software que pueda trabajar con plataformas de radio reconfigurable para proveer funcionalidad cognitiva. Este paquete de software, llamado motor cognitivo, consta de un conjunto de mecanismos generales de aprendizaje y algoritmos de aplicaciones específicas, que puede ser aplicado para plataformas de radio con implementación de hardware. Como se muestra en el bloque de la arquitectura del sistema del radio cognitivo representado en forma de diagrama en la Figura 39, el motor cognitivo maneja recursos y adapta la operación del radio para optimizar su función. [33]



Figura 39. Modelo de un sistema de radio cognitivo. [27]

Un paquete de software de algoritmos, llamado el motor cognitivo (CE, Cognitive Engine), se diseña y superpone sobre la plataforma de hardware de radio. El CE maneja los recursos de la radio para llevar a cabo funciones cognitivas, de tal manera que adapta su operación para un óptimo rendimiento. Como ilustra la Figura 39, el CE le da a la radio funcionalidades cognitivas combinando los procesos de aprendizaje de maquina con la radio operación [33].

En la Figura 40 se muestra una arquitectura de una CRN, en donde se muestra su funcionamiento.

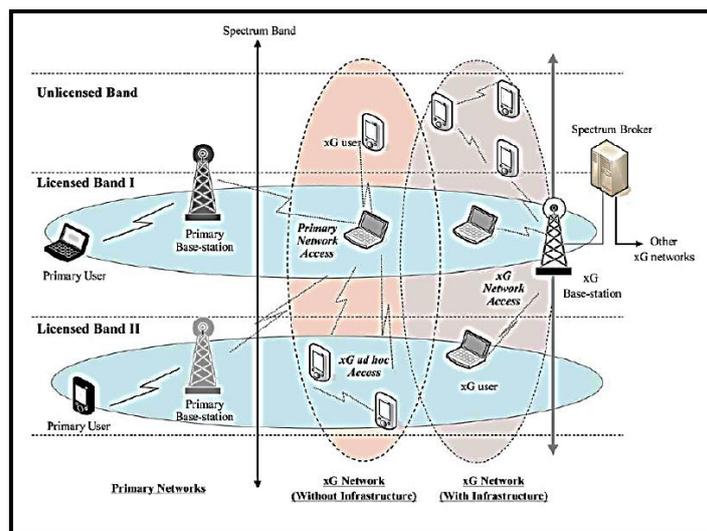


Figura 40. Arquitectura de una CRN [33]

4.2.6.1. Red primaria

Es aquella red que cuenta con usuarios licenciados para poder trabajar en una determinada banda de frecuencia otorgada para su funcionamiento. La red primaria así como se muestra en la Figura 42 consta de los siguientes componentes.

- Usuario primario (Primary User): es aquel que cuenta con una licencia, para poder operar con derechos exclusivos sobre dicha banda de frecuencia, esta licencia ha sido otorgada por alguna entidad encargada de la asignación y administración del espectro. En este caso el usuario cuenta con todas las garantías y por ende debe estar libre de interferencias.
- Estación base primarias: (Primary Base-station): es el componente de la infraestructura al que le corresponde una banda de frecuencia de trabajo, por el hecho de que posee una licencia. La estación base no posee capacidades cognitivas.

4.2.6.2. Red secundaria

La red secundaria está formada por usuarios no licenciados, es decir a los que no ha sido otorgado alguna licencian para su funcionamiento en alguna banda específica. Estos deben acceder al espectro utilizado por los usuarios primarios sin interferir, y de manera “oportunista”. La red secundaria esta formada por los siguientes componentes como se aprecia en la Figura 42.

- Usuarios secundarios CR: Son los usuarios secundarios, los cuales no poseen licencia para operar en una determinada banda de frecuencias; por lo tanto a diferencia de los primarios requieren de “funcionalidades adicionales” para acceder a una banda del espectro en la que se necesita operar.
- Estación base CR (xG Base-station): Es la estación base secundaria, sin licencia que únicamente establece conexión con los usuarios secundarios, los cuales tampoco poseen licencia.
- Agente del espectro: el agente del espectro permite que exista una coexistencia entre múltiples CRN's.

4.2.7. Estandarización y regulación de la radio cognitiva (WRAN).

Debido a la NPRM emitida por la FCC, el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) empezó a desarrollar el primer estándar en utilizar tecnología CR, denominado IEEE 802.22 WRAN (Redes Inalámbricas de Área Amplia), que tiene como principal objetivo proporcionar acceso a Internet utilizando el espectro asignado a sistemas de televisión (entre 54 MHz y 862 MHz), centrándose en la construcción de redes WRAN punto-multipunto fijas. [34, 35].

En IEEE 802.22 se propone el uso tanto de los canales de televisión como de las bandas de guarda. En el proyecto se especifica una interfaz inalámbrica fija punto-multipunto, donde una estación base controla su celda y los usuarios presentes en la misma, a los que se denomina CPE (Consumer Premise Equipments). Esta estación base se ocupa de realizar el spectrum sensing, dando instrucciones a los distintos CPE para que tomen las medidas necesarias. A continuación se muestra gráficamente lo descrito.

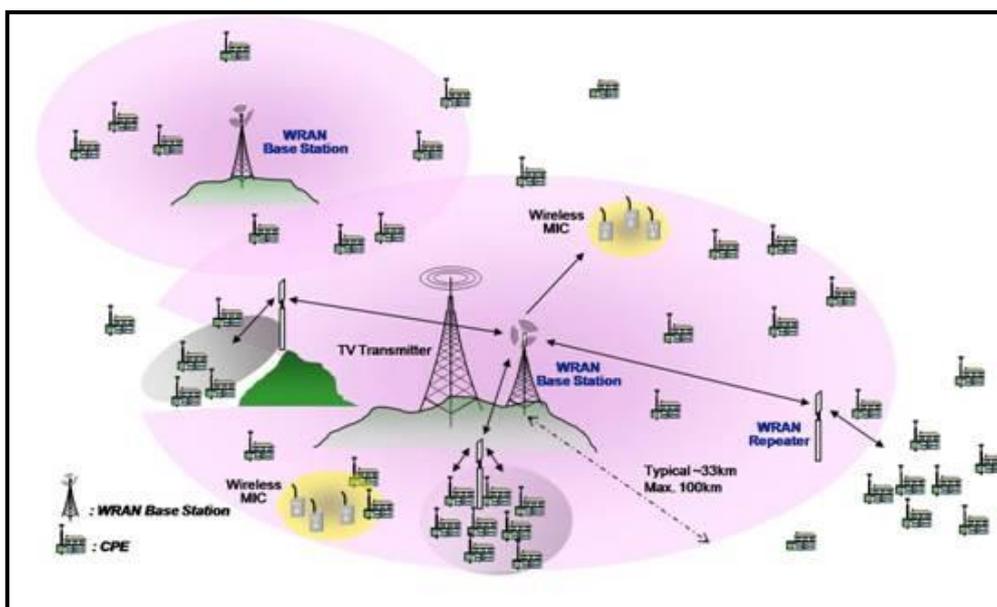


Figura 41. Topología WRAN [21]

El grupo de trabajo IEEE 802.22 se formó en 2004. La principal diferencia entre el 802.22 y los anteriores estándares IEEE 802 es el radio de cobertura de las estaciones base. Actualmente, se continúa trabajando en el proceso de estandarización.

4.2.8. Servicios de radio cognitiva para el usuario.

Las mejoras de servicios que se han activado por radio cognitiva están motivadas por un conjunto de casos de uso [36], que requieren que la radio cognitiva tenga un grado avanzado de “entendimiento” de los temas ilustrados en la Figura 42.

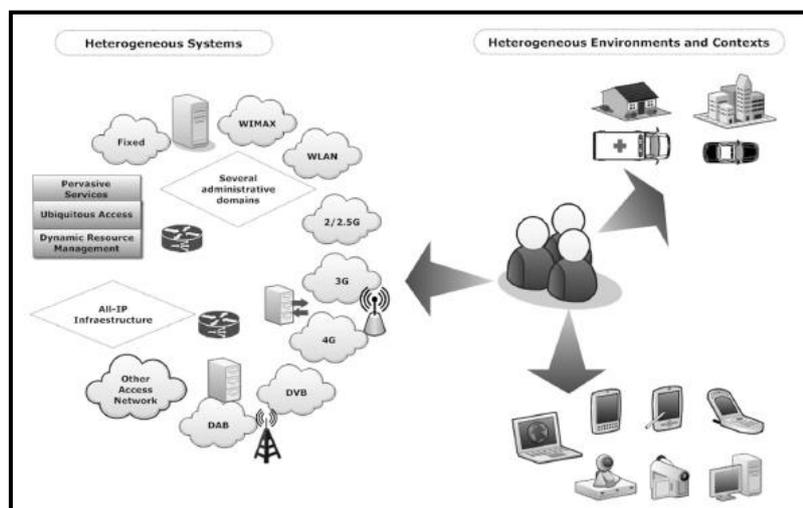


Figura 42. Reconfigurabilidad

Así, por ejemplo, una radio cognitiva puede inferir las implicaciones relacionadas con la radio de una solicitud de un taxi a una dirección específica. A continuación, puede indicarle a la red de su plan para moverse de su ubicación actual a *Grev Turgatan* [16]. La red, entonces sabe que este usuario (con alta probabilidad) se moverá a través de tres sitios de la célula en un cuarto dentro de los próximos diez minutos. Si este usuario se dirige a un centro de conferencias equipado con una mordaza móvil local, es poco probable que ofrezca la carga habitual de la red después del viaje en taxi. Estos intercambios podrían reducir la incertidumbre sobre la carga ofrecida a una red, lo que podría mejorar la eficiencia del uso de los recursos de radio. [37]

4.2.9. Aplicaciones de radio cognitiva.

Existen muchas oportunidades en el ámbito comercial para operar nuevos regímenes de administración del espectro, brindar así varios servicios inalámbricos y mejorar los actuales sistemas de radio, al acceder a más frecuencias [27]. De manera general algunas de las aplicaciones de la Radio Cognitiva detectora de espectro incluyen las redes de emergencia y el aumento de la capacidad de las redes WLAN así como la ampliación de la distancia de la transmisión.

- **Uso militar:** La mayoría de los sistemas de comunicación de los ejércitos deben desplegarse en entornos desconocidos y hostiles, rápidamente, enfrentando problemas de interferencias, conectividad y variaciones impredecibles de éstas. CR puede ser una solución para este entorno, pues facilita la configuración autónoma de los equipos y garantiza la coexistencia, al utilizar frecuencias desocupadas.
- **Seguridad pública:** Cuestiones como el despliegue rápido, disponibilidad inmediata y uso eficiente del espectro disponible, interoperabilidad entre sistemas (bomberos, paramédicos, policía), entre otros, son aplicables en esta área.
- **Emergencias.** CR permitirá que las frecuencias no utilizadas se ocupen en la atención de emergencias, para facilitar la comunicación con los servicios de salud y ayuda implicados en la toma de decisiones para la salvaguarda de vidas.
- Las organizaciones locales y regionales de los principales organismos que efectúan las operaciones de respuesta y socorro en el país (cuerpo de bomberos, defensa civil cruz roja) utilizan sistemas de radiocomunicaciones en los modos de operación simplex y semiduplex, mediante equipos fijos, móviles y portátiles, para desplegar sus actividades de ayuda y coordinación conjuntas. La Figura 43 muestra un diagrama esquemático general de un sistema de radiocomunicaciones que define su operación.

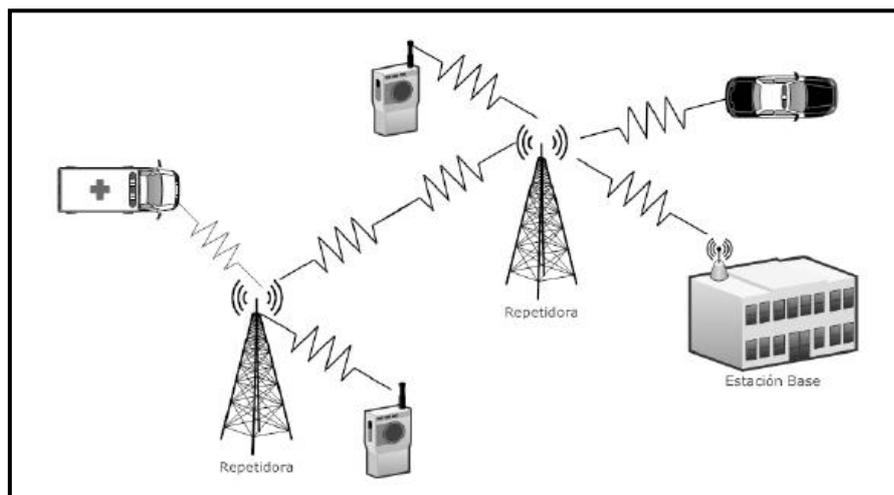


Figura 43. Esquema de un sistema de radiocomunicaciones.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Metodología

El objetivo de esta tesis, es realizar el diseño y simulación de un arreglo de antenas optimizado, que se acoja a las características requeridas por los sistemas de radio cognitiva. Se realizara el diseño de tres arreglos radiantes con antenas previamente estudiadas, con el fin de contrastar el desempeño de sus parámetros técnicos como ancho de banda, perdidas por retorno, acople de impedancias, relación de onda estacionaria, patrón de radiación y ganancia. El principal enfoque es realizar diseños versátiles, optimizados y manipulables pero que primordialmente cubran el ancho de banda de televisión, propuesto en el estándar IEEE 802.22 WRAN (54MHz – 964MHz), para los sistemas de radio cognitiva. Algunos diseños se los realizara sobre sustratos de bajas perdidas, otros serán compuestos por antenas preestablecidas como es el caso de las antenas discónicas, con el fin de poder tener un diseño apto para un transmisor de RC. Las antenas estarán dispuestas en forma de arreglo o derivadas de otras antenas base o fundamentales para obtener los parámetros requeridos. Los arreglos radiantes nacidos de estructuras previamente estudiadas serán analizados a través de su diseño y de la simulación virtual, y de esta manera los datos arrojados por el simulador se podrán comparar mejorando su funcionalidad e inclinándose sobre aquel arreglo que mejor se acople a la necesidades de los sistemas de radio cognitiva.

Hay que recalcar que para las tres propuestas que se presentan, las frecuencias de operación están dentro del rango establecido de las bandas de TV. Con el fin de obtener las mejores características técnicas de cada propuesta, la frecuencia de operación de cada arreglo difiere en los tres modelos presentados, pero todos son opciones válidas dentro del rango de 54 – 964 MHz, para finalmente optar por la que mejor solución.

5.1.1. Fases del proyecto

Con el afán de alcanzar el objetivo principal del presente trabajo de titulación, el proyecto se lo ha dividido en cinco fases, las mismas que se detallan a continuación.

Fase I: Revisión Bibliográfica

Dentro de la planificación del proyecto está la Revisión Bibliográfica, a la cual se le dio un periodo de tiempo para recopilar toda la información existente que se creyó

conveniente y necesaria para el desarrollo del proyecto. En la revisión bibliográfica se afianzo conocimientos sobre las características de antenas tanto individuales como en arreglo, sus características de comportamiento, antenas de UBW, acopladores de impedancias, y arreglos de antenas enfocadas al desarrollo del proyecto que cumplan las características requeridas por radio cognitiva. Una vez entendidos estos conocimientos, se comenzó a familiarizarse con el software simulador con el fin poder simular varias propuestas y diseños y poder entender los datos que se obtienen de los mismos.

Fase II: Escoger geometrías de antenas a estudiar.

Con el propósito de enfocarse propiamente en el objetivo propuesto que son arreglos de antenas para radio cognitiva, se utilizó la información referente a sistemas radiantes para RC (papers, libros, tesis, White papers), con el objeto de puntualizar el rango de estudio. De entre todas las posibilidades, se seleccionó antenas que presentan buenas características radioeléctricas, las que son requeridas por radio cognitiva. Entre ellas se ha estudiado antenas del tipo parche rectangular, log-periódicas, monopolos, dipolos y discónicas, logrando seleccionar únicamente las antenas patch rectangular, log-periódica y discónica, las cuales fueron diseñadas y simuladas de forma individual y en arreglo, para contrastar su mejoría o retroceso. Es importante recalcar que las condiciones de posición Indoor como Outdoor de una antena se convierte en una acción de discusión enfocada a buscar la mejor ubicación dentro de un sistema de radio cognitiva.

Fase III: Simulación de geometrías escogidas

Previo al proceso de diseño se procedió a la simulación de los arreglos radiantes, con el fin de obtener los mejores parámetros de funcionalidad comparando resultados que nos permitan escoger la propuesta de diseño más óptimo. La simulación se la realizo en el programa Ansoft HFSS, donde los parámetros principales analizados son las pérdidas de retorno, el coeficiente de reflexión, la relación de onda estacionaria (ROE), el ancho de banda, y el patrón de radiación.

Fase IV: Comparación entre diseños existentes y diseños propuestos en esta investigación.

Después de obtener los datos de las simulaciones, se procedió a efectuar un análisis comparativo a través de tablas y criterios enfocándonos principalmente en el ancho de banda, el patrón de radiación y las pérdidas por reflexión.

Fase V: Presentación de la propuesta final

Con la comparación de los criterios técnicos que se presenta en la fase cuatro, se logra establecer el arreglo de antenas más adecuado que cumple de manera eficiente con las características operacionales de los sistemas de radio cognitiva.

5.1.2. Diseño, dimensiones y materiales de las propuestas

5.1.2.1. Propuesta 1: Antena patch microstrip

La propuesta del primer diseño se basa en antenas patch tipo rectangulares, se ha optado por este modelo por su elevado uso y aplicación en telecomunicaciones. Hay que tomar en cuenta que este tipo de antenas están hechas para sistemas que operan en altas frecuencias, y debido a este parámetro su diseño es pequeño y por lo cual existen posibilidades diversas de aplicaciones. Previo a establecimiento del diseño final de la antena patch se efectuó varios diseños y simulaciones a diferentes frecuencias de operación (600 MHz, 650 MHz, 700 MHz), presentando el valor de 650 MHz como el mejor resultado frecuencial para los elementos de radiación "frecuencia de resonancia de la antena".

En este apartado se diseña una antena patch base o fundamental del tipo rectangular, la cual nos servirá para establecer el diseño de un arreglo adecuado y adaptado a las características de radio cognitiva.

Este tipo de dispositivo es de construcción sencilla, con materiales livianos y versátiles. Además, cabe recalcar que su línea de alimentación de entrada, mantiene una carga aproximada de 50 Ohms (Impedancia de entrada). En la figura 44 se muestra la antena rectangular base para el arreglo, con sus variables de diseño a calcular.

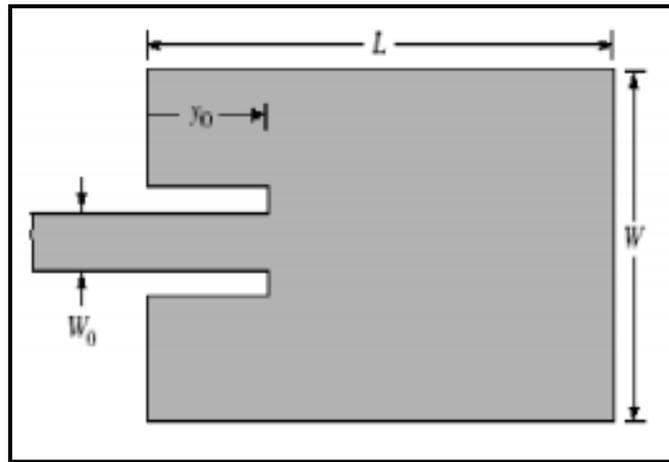


Figura 44. Parche Rectangular y sus dimensiones

Material y espesor del sustrato utilizado por las antenas tipo parche (rectangulares y circulares)

Un sustrato dieléctrico es la base de impresión y construcción para el diseño y realización de antenas patch, las propiedades dieléctricas son proporcionadas por el fabricante por medio de un datasheet del material. Para la elección de un sustrato se debe tomar en cuenta las siguientes especificaciones:

- La permitividad relativa, o también conocida como constante dieléctrica (ϵ_r), se encuentra definida dentro del rango de $1 < \epsilon_r < 12$, aunque generalmente no son tan comunes los materiales con permitividad dieléctrica > 5 .
 - El espesor, h , para seleccionar el espesor del sustrato requerido, se deberán tomar el siguiente rango, en función de la longitud de onda, $0.005\lambda < h < 0.2$
- [7]

Se debe tomar en cuenta que si se disminuye el espesor del sustrato, el ancho de banda disminuirá, la frecuencia de resonancia aumentará, y la longitud resonante de la geometría de la antena a realizar se minimizará. Por lo tanto, si se desea aumentar el ancho de banda, el espesor del sustrato debe crecer, y con el crecerá la longitud resonante de la geometría, la frecuencia resonante disminuirá, y las medidas de la antena se volverán pequeñas. En la tabla 4 se muestra esta analogía de una forma más concreta.

Descripción	Espesor del sustrato	ϵ_r
Disminuir la radiación de las líneas	Pequeño	Alta
Pequeñas dimensiones de la antena	Pequeño	Alta
Bajas pérdidas	Pequeño	Baja
Aumentar el ancho de banda	Grande	Baja
Mayor eficiencia de radiación	Grande	Baja
Menor sensibilidad frente a tolerancias	Grande	Baja

Tabla 4. Dependencia de características en relación al espesor del sustrato

Por ende se puede decir que constante dieléctrica juega un papel fundamental en el diseño de antenas planares, están se adaptan de la mejor manera al diseño, cuando poseen un $\epsilon_r < 5$, donde se incluyen los mejores valores de eficiencia de radiación, mayor ancho de banda y menores pérdidas.

Por lo dicho anteriormente en los diseños de antenas patch en el presente proyecto se usa una ϵ_r (constante dieléctrica) de 2.2 y el tipo de material RT DUROID 5880 que es el más común en el mercado.

El sustrato RT DUROID, es un laminado de alta frecuencia de IF (Frecuencia Intermedia), son materiales compuestos por PTFE (politetrafluoroetileno), que es un polímetro similar al polietileno, en el que los átomos de hidrogeno han sido sustituidos por átomos de flúor, cuya propiedad principal es que es prácticamente inerte, o sea que no reacciona con otras sustancias químicas excepto en situaciones muy especiales, este material esta reforzado con microfibras de vidrio, dando como resultado uniformidad excepcional en la constante dieléctrica. La constante dieléctrica de estos materiales de alta frecuencia es la más baja de todos los productos, además de ser muy común, otra característica muy importante es que son ideales para aplicaciones en ambientes de humedad. [43]

En el anexo 2 del proyecto se muestra el datasheet del material usado

Especificaciones y cálculo matemático de antenas patch microcinta rectangular.

Los parámetros primarios para el diseño de antenas son:

- Con base a la teoría de antenas planarizadas, la separación de la geometría diseñada con los extremos del sustrato será de acuerdo a un monopolo de $\lambda/4$, esto es debido al gran empleo que reciben en la literatura acerca de este tipo de antenas, además de que lo hacen factible en dimensionamiento en lugar de parámetros como $\lambda/2$ o $\lambda/8$ en nuestra investigación.
- La frecuencia de operación que utilizaremos será de 650 MHz.
- El espesor del sustrato que se utilizara de acuerdo a la siguiente formula:
$$0.005\lambda < h < 0.2\lambda$$
- El tipo de sustrato será el RT DUROID 5880 con una constante dieléctrica baja $\epsilon_r = 2.2$.

Frecuencia	Material del sustrato	Altura des sustrato	Constante Dieléctrica
650 MHz	RT DUROID 5880	1.5888	2.2

Tabla 5. Especificaciones básicas para el cálculo y diseño de la propuesta 1

Sobre la base de formulación simplificada que se ha descrito, un procedimiento de diseño se describe, lo que conduce a diseños prácticos de antenas *microstrip* rectangulares. El procedimiento asume que la información especificada debe incluir la constante dieléctrica del sustrato ϵ_r y la frecuencia de resonancia (f_r).

El procedimiento es el siguiente:

Tipo de material

RT DUROID 5880

Valores especificados:

$$\epsilon_r = 2.2$$

$$f_r (\text{Hz}) = 650\text{MHz}$$

$$h = 1.588\text{mm}$$

Determinar:

$$W, L$$

El proceso de diseño empieza con la determinación de la longitud de onda como base para todos los cálculos.

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

$c = \text{velocidad de la luz en el espacio libre}$

$$\lambda = \frac{300}{650\sqrt{2.2}}$$

$$\lambda = \mathbf{311.16 \text{ mm}}$$

Para un dipolo de $\lambda/4$, que dará la separación de la geometría con los extremos del sustrato.

$$\frac{\lambda}{4} = \mathbf{77.8 \text{ mm}}$$

Para determinar la altura (h) o espesor del sustrato, se utiliza la siguiente relación,

$$\mathbf{0.005\lambda < h < 0.2\lambda}$$

$$0.005\lambda = 0.005 * 311.16\text{mm} = \mathbf{1.55\text{mm}}$$

ó

$$0.2\lambda = 0.2 * 311.16\text{mm} = \mathbf{62.2\text{mm}}$$

En base a la relación se escoge un ancho del sustrato de **1.588mm**, que está en el rango que se puede tomar y es el que se utiliza para la simulación.

Para un radiador eficiente, un práctico ancho (W) que conduce a una buena eficiencia de radiación es:

$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

$c = \text{velocidad de la luz en el espacio libre}$

$$W = \frac{300}{2 * 650} \sqrt{\frac{2}{2.2 + 1}}$$

$$W = 182 \text{ mm}$$

La constante dieléctrica efectiva del patch se la obtiene usando:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2}$$

cuando:

$$W/h > 1$$

$$\frac{W}{h} = \frac{182\text{mm}}{1.588\text{mm}} = 114, \text{ por lo tanto se cumple la relacion, el resultado es mayor a uno}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{2.2 + 1}{2} + \frac{2.2 - 1}{2} \left(1 + \frac{(12)(1.588)}{182}\right)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = 2.17$$

La longitud incremental extendida del patch ΔL , es

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

$$\Delta L = h * 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

$$\Delta L = 0.1588 * 0.412 \frac{(2.1 + 0.3)\left(\frac{183}{1.588} + 0.264\right)}{(2.1 - 0.258)\left(\frac{183}{1.588} + 0.8\right)}$$

$$\Delta L = 0.84\text{mm}$$

La longitud actual del patch se obtiene usando,

$$L_{\text{eff}} = L + 2 \Delta L$$

$$L = \frac{1}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{u_0\epsilon_0}} - 2 \Delta L$$

$$L = \frac{300}{2 * 650\sqrt{2.1}} - 2 * 0.83mm$$

$$L = 155mm$$

Estos cálculos serán constados mediante una herramienta matemática en el capítulo de resultados, además de dar a conocer en forma gráfica y de tablas, las dimensiones de la antena de las tres propuestas.

5.1.2.2. Propuesta 2. Antena Log Periódica

En la segunda propuesta se realizara una antena log- periódica, con el fin de ir obteniendo el diseño que mejor se adapte a los sistemas de radio cognitiva, ganando ancho de banda y cubriendo la mayor cantidad de espectro, logrando así un patrón de radiación que tienda a una emisión omnidireccional. Este tipo de antenas se forma a través de arreglos de dipolos, que disponiéndolos de la mejor manera, puedan trabajar a diferentes rangos de frecuencia.

Este tipo de antena es compacta al igual que la propuesta 1, es una antena de bajo costo que impresa con las características adecuadas se logra óptimos anchos de banda y radiaciones casi omnidireccionales.

En sistemas de telecomunicaciones modernos como radio cognitiva las antenas con buen ancho de banda y dimensiones pequeñas son las preferidas.

Las antenas log–periódicas tienen patrón e impedancia característica que son esencialmente independientes de la frecuencia a lo largo del ancho de banda. La estructura de la geometría de las antenas log periódicas se definen debido a que las características eléctricas se repiten periódicamente con el logaritmo de la frecuencia.

En la figura 45 se muestra una estructura de la antena log – periódica a diseñar y los parámetros a ser calculados para su respectivo diseño y buen funcionamiento. Como vemos esta propuesta de antena también se la ha realizado sobre un sustrato de

iguales características que en el anterior diseño, con el fin de tratar de aprovechar la mimetización que se puede lograr aplicando esta técnica.

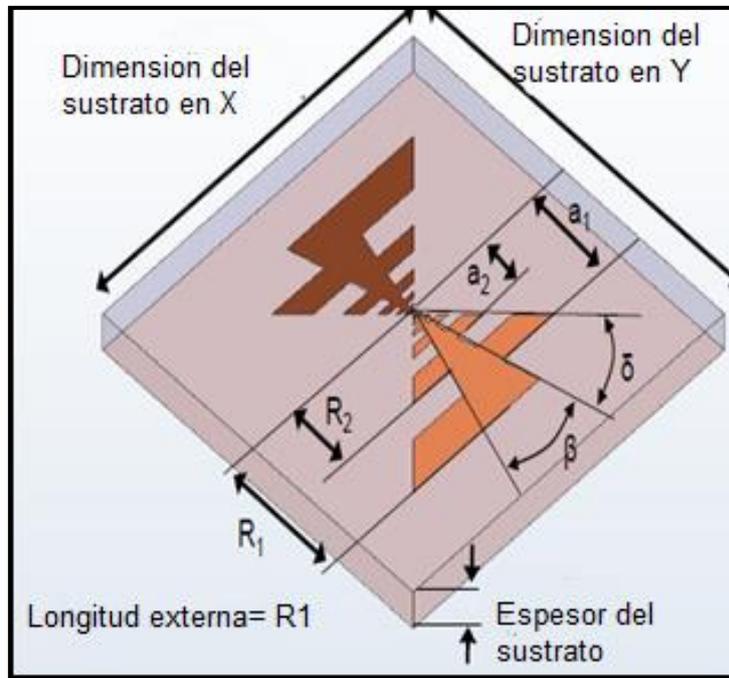


Figura 45. Antena log-periódica planar trapezoidal y la descripción de sus dimensiones

Material y espesor del sustrato utilizado para el diseño de la antena log – periódica planar trapezoidal.

En cuanto al material, espesor y especificaciones del tipo de sustrato a utilizar, será de las mismas características que la propuesta 1. Se escogió las mismas especificaciones, ya que de acuerdo a las investigaciones éstas son las que mejor prestaciones tienen, además de ser las más comunes en el mercado. Para esta propuesta se trabajara a una frecuencia mínima de 300 MHz y frecuencia máxima de 1 GHz, el mismo que presenta las mejores características de operación para un arreglo de este tipo. En el análisis de resultados se contrasta lo anteriormente mencionado.

La tabla 6 muestra las especificaciones para el cálculo y diseño de la antena log-periódica.

Frecuencia	Material del sustrato	Altura des sustrato	Constante Dieléctrica
300MHz-1GHz	RT DUROID 5880	1.5888	2.2

Tabla 6. Especificaciones básicas para el cálculo y diseño de la propuesta 2

Especificaciones y cálculo matemático de antena Log – Periódica Trapezoidal planar.

Las propiedades de una log periódica dentada dependen de τ (constante de escalamiento). Se ha encontrado experimentalmente que la anchura media del haz de potencia aumenta con el incremento del valor de τ como se muestra en la figura 46.

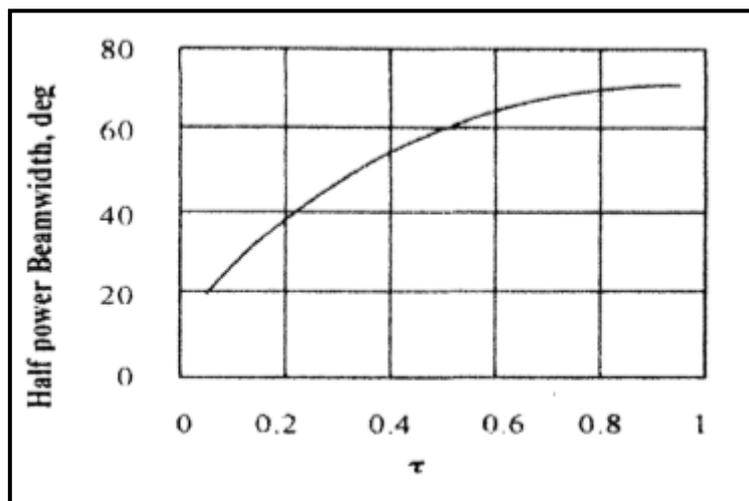


Figura 46. Ancho del haz de potencia media vs τ

Para las consideraciones o necesidades de los sistema de radio cognitiva cuya función es servir a un amplio rango espectral se escogerá un $\tau = 0.7$, que de acuerdo a la gráfica se tendrá un ancho del haz de 70 grados más o menos, además de presentar buenas características en base a estudios previamente ejecutados.

El procedimiento asume que la información especificada debe incluir la constante dieléctrica del substrato ϵ_r , la frecuencia de resonancia (f_r) tanto máxima como mínima, constante de escalamiento τ , ángulos y constante de espaciamento, como se muestra en la tabla 7.

Frecuencia	Material	Constante dielectrica	Angulos α	Angulos β	Constante de escalamiento τ
fmax=1 GHz fmin=300MHz	RT Duroid 5880	2.2	30	60	0.7

Tabla 7. Información que se especifica para el cálculo y diseño de la propuesta 2

El procedimiento es el siguiente:

Tipo de material

RT DUROID 5880

Valores especificados:

$$\varepsilon_r = 2.2$$

$$fr \text{ (Hz)} = 600\text{MHz} - 1\text{GHz}$$

$$\alpha = 30 \text{ grados}$$

$$\beta = 60 \text{ grados}$$

$$h = 1.588\text{mm}$$

$$\tau = 0.7$$

Determinar las longitudes de los reflectores (L), en donde

$$L_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2} = \frac{c}{2 * f_{min}}$$

$$L_{max} = \frac{3 * 10^8}{2 * 600 * 10^6}$$

$$\mathbf{L_{max} = 250 \text{ mm}}$$

$$L_{min} = \frac{\lambda_{min}}{2} = \frac{c}{2 * f_{max}}$$

$$L_{min} = \frac{3 * 10^8}{2 * 1 * 10^9}$$

$$\mathbf{L_{min} = 0.15 \text{ mm}}$$

El número de elementos se lo determina con la siguiente ecuación:

$$N - 1 \log \frac{1}{\tau} = \log f_{max} - \log f_{min}$$

$$N - 1 \log 0.15 = 0.23$$

$$N = 3 \text{ (numero de elementos)}$$

Las dimensiones R_1, R_2, \dots, R_n y a_1, a_2, \dots, a_n , de acuerdo a la figura 45 son calculadas usando la relación dada por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{R_{n+1}}{R_n} = \tau = 0.7$$

$$\frac{r_n}{R_n} = \sqrt{\tau} = \sqrt{0.7} = 0.84 = \sigma$$

Parámetro	Dimensión (mm)	Parámetro	Dimensión (mm)
R1	55 (dada por el diseñador)	a_1	46.2
R2	38.5	a_2	32.34
R3	26.95	a_3

Tabla 8. Dimensiones de las longitudes interiores y exteriores de la antena

Todas estos cálculos, referirse a la figura 45, de donde se puede observar cuales valores se están calculando.

5.1.2.3. Propuesta 3. Antena Discónica

La antena discónica es una antena muy eficiente en cuanto a parámetros de transmisión y de estructura sencilla. Sus características hacen que esta antena pueda ser adaptada a sistemas de radio cognitiva, estas características son su ancho de banda el cual puede acaparar el rango deseable; su ganancia y especialmente su patrón de radiación omnidireccional. Con el diseño correcto se puede obtener estas características de manera óptima.

En cuanto a dimensiones, se sabe que estas dependen de la frecuencia; en este caso se seleccionara una frecuencia de operación de 500 MHz que es la frecuencia que mejor se adapta la antena (en el apartado de resultados se detalla las ventajas de operar a 500 MHz)

Como este tipo de antena no va a ser una antena impresa no especificamos el tipo de material. En la figura 47, se muestra las variables a calcular para el diseño de la antena discónica.

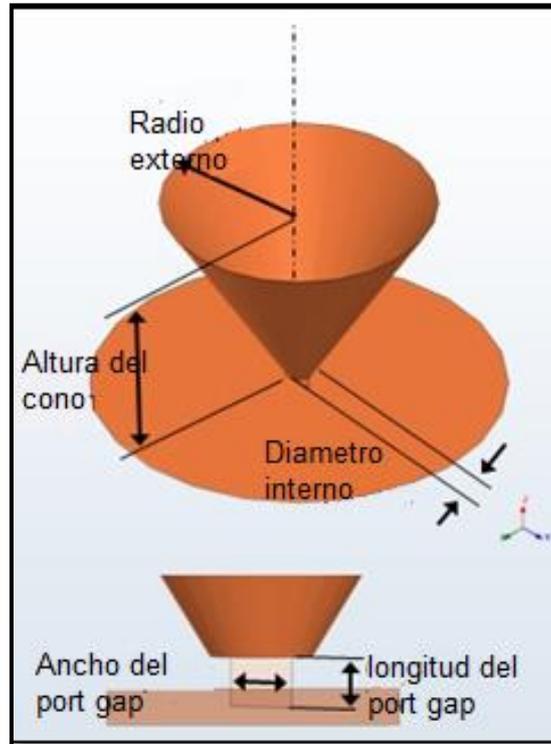


Figura 47. Variables a calcular para el diseño de la antena Discónica

Especificaciones y cálculo matemático para la antena discónica

El procedimiento es el siguiente:

Valores especificados

$$fr (Hz) = 500MHz$$

Determinar la longitud del cono,

$$L,$$

El proceso de diseño empieza con la determinación de la longitud de onda como base para todos los cálculos.

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

$$\lambda = \frac{300}{500}$$

$$\lambda = 0.6m$$

Para $\lambda/4$,

$$\frac{\lambda}{4} = 0.15m$$

De donde,

$$\frac{\lambda}{4} = L \pm (30\%)$$

situacion asumida para mejorar los parametros de radiacion del diseño

$$L = \textit{longitud del cono}$$

Por lo tanto,

$$L = 195 = 200mm \textit{ para el diseño}$$

El diámetro del disco (D) debe ser 70% de $\frac{\lambda}{4}$ de la longitud de onda

$$D \pm (30)\% = 70\% * \frac{\lambda}{4}$$

situacion asumida para mejorar los parametros de radiacion del diseño

$$D = 0.7 * 0.15$$

$$D = 105mm$$

$$D = 140mm \textit{ para el diseño}$$

El diámetro del cono es igual a

$$D_{\text{cono}} = \frac{\lambda}{4} > L$$

$$D_{\text{cono}} = 240mm \textit{ para el diseño}$$

situacion asumida para mejorar los parametros de radiacion del diseño

5.1.3. Software utilizado

En todas las simulaciones del presente proyecto de tesis, se usó el software HFSS (High Frecuencia Structure System), que es un software de alto rendimiento para el diseño, modelación y simulación de estructuras 3D creado para altas frecuencias. De acuerdo a la página web de ANSYS²⁷ (Swanson Analysis Systems, Inc.) el software HFSS es el estándar de la industria para simulación 3D, full-wave, campos electromagnéticos. Su estándar de precisión, soluciones avanzadas y alto rendimiento en tecnología hacen de este una herramienta esencial para ingenieros encargados con la ejecución precisa y diseño rápido de alta frecuencia y alta velocidad de dispositivos electrónicos. HFSS ofrece tecnologías basadas en elementos finitos, ecuaciones integrales, asintótico y avanzados métodos híbridos para resolver un amplio rango de microondas, RF y alta velocidad de aplicaciones digitales. [41]

HFSS permite el estudio electromagnético de modelos a través del método de elementos finitos y mallas adaptativas, facilitando además la visualización del comportamiento de las ondas electromagnéticas por medio de herramientas interactivas y dinámicas.

HFSS es una herramienta útil para resolver sistemas de estructura compleja que son difíciles o imposibles de modelar considerando métodos puramente algebraicos. Se utiliza por lo tanto para la creación de prototipos virtuales de guías de onda, conectores, filtros, chip, integradores de señal entre muchos otros.

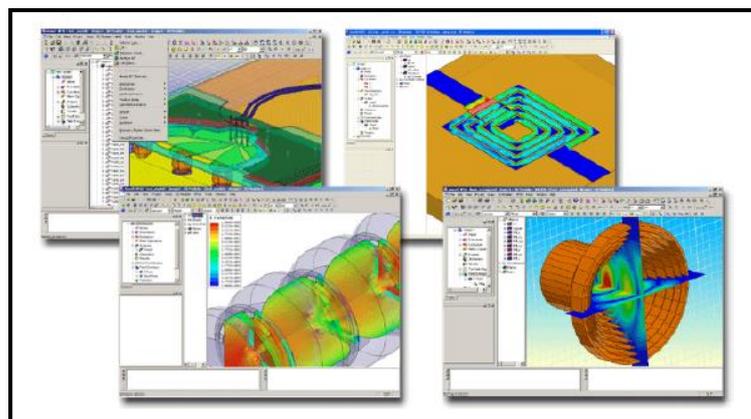


Figura 48. Interfaz del simulador HFSS [41]

²⁷ ANSYS: ANSYS, Inc. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos

El modo de operación de HFSS consiste en la creación de la estructura física que se desea estudiar al cual posteriormente se le incorporan los campos y excitaciones electromagnéticas que afectan al diseño. Luego se decide el rango de frecuencia pertinente y los parámetros que pueden ser variables. Con esta información se crea una malla adaptativa que permite que se calcule iterativamente la solución deseada. Se puede graficar de manera simple su procedimiento como se muestra en la siguiente figura 49.

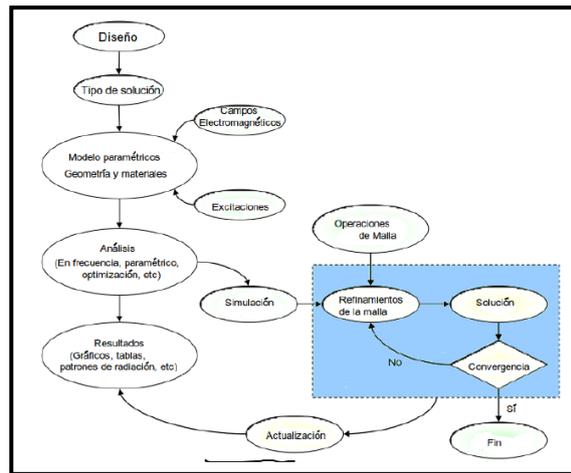


Figura 49. Diagrama de flujo del proceso HFSS [41]

Es importante destacar que dentro del proceso la creación de la malla de aproximación empleando el método de elementos finitos que se realiza mediante un proceso iterativo mostrado en la figura 50. [41]

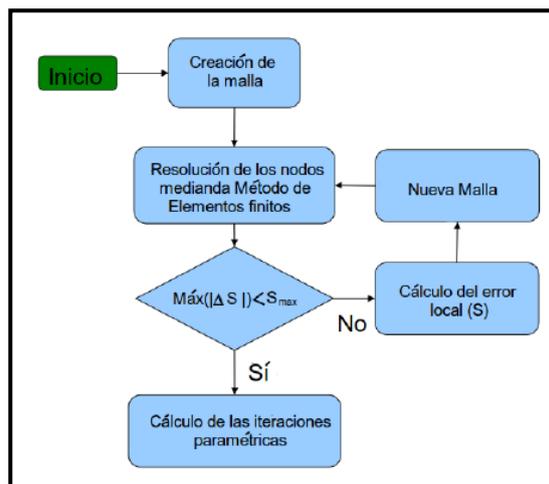


Figura 50. Proceso iterativo de creación de la malla [41]

Usando este simulador se puede obtener resultados además de los ya mencionados, como el patrón de radiación de una antena, las ganancias, las pérdidas de retorno, la impedancia y la relación de onda estacionaria entre las más básicas para el análisis de una antena o de un arreglo. Conforme se ha tratado y ha usado en los diseños, se considera que el simulador es completo para este tipo de trabajos. En el Anexo C se muestra los principios de HFSS, conceptos y forma de uso de esta `poderosa herramienta de simulación. En el anexo 3 y 4 se presenta detalladamente los conceptos, funciones y formas de operación del simulador, además de presentar una breve descripción de diseño y caracterización de antenas.

5.2. Materiales

- Software HFSS (High Frecuencia Structure Sistem), para la simulación de los diseños.
- Extensión del software HFSS para diseño de antenas
- Calculadora Virtual
- Calculadora
- White Papers.

6. RESULTADOS

En este capítulo se presenta una visión global, y detallada de los resultados del proyecto como también del proceso de diseño de cada propuesta, además el desarrollo de las fases que se siguieron para el cumplimiento de los objetivos y desarrollo.

Las propuestas que se presentan se han desarrollado en base a dimensiones y características propias de cada antena con las que se obtienen los mejores resultados. Para conseguir esto, se realizó varios procesos los mismos que consistían en el diseño y simulación de varias antenas (patch, log-periódica y discónica) para diferentes valores de frecuencia y propiedades de operación; quedándonos únicamente con los diseños de mayores prestaciones que se plasman en este apartado.

En el apartado 11 de Anexos (Anexo 1) se muestran los resultados de las simulaciones a diferentes frecuencias dentro de la banda de TV, con la cual se comparó sus parámetros radioeléctricos.

6.1. Presentación de los resultados obtenidos

Antes de mostrar los resultados de las antenas dispuestas en arreglo, se presenta la simulación de las dos primeras propuestas de forma individual para el análisis de su comportamiento previo a la simulación de su funcionalidad en forma de arreglo y verificar cuales son los cambios que se suscitan. La tercera propuesta se presenta como único caso donde no se parte de la simulación individual ya que esta antena está en la capacidad de trabajar directamente con sistemas de radio cognitiva.

El resultado del proceso de simulación y obtención de resultados también son detallados en el presente apartado.

6.1.1. Resultados de la relación de onda estacionaria (ROE), propuesta 1, propuesta 2 y propuesta 3.

Las desadaptaciones de impedancia causan reflexiones y aumentan el ROE. Cuando una línea no está acoplada, parte de la energía incidente sobre la carga es reflejada hacia el generador. La relación entre el voltaje de la onda reflejada y la incidente es el

coeficiente de reflexión. Por este motivo a lo largo de la línea se forma una onda estacionaria, como máximos y mínimos de voltaje y corriente.

El ROE es siempre real y positivo, en el rango de $1 \leq \text{ROE} \leq \infty$. En casos ideales el ROE es igual a 1, pero si la línea está terminada en circuito abierto o cortocircuito hay reflexión total y el $\text{ROE} = \infty$. Para la propuesta de diseño el valor de ROE aceptable es de 1 a 3. A continuación se muestran unas consideraciones técnicas si se supone que la potencia directa es igual al 100%.

ROE	Porcentaje (%)
1	0
1.1	0.227
1.2	0.826
1.3	1.700
1.5	4.000
2.0	11.10
3.0	25

Tabla 9. Consideraciones técnicas del ROE

Según esta tabla estos son los ROE's más utilizados

6.1.1.1. Propuesta 1: Proceso de optimización

Antena patch rectangular simple.

En este apartado se realizara la simulación del diseño de la antena patch rectangular conforme a los cálculos efectuados en el apartado de metodología.

Frecuencia	650 MHz
Impedancia de entrada	50 Ohm
Topología	Rectangular
Tipo de sustrato	RT Duroid 5880

Tabla 10. Características para el diseño de antena rectangular planar

Para poder contrastar los datos del diseño obtenidos mediante las formulas analizadas en el marco teórico, usamos una hoja de extensión del programa HFSS como herramienta matemática para el diseño de antenas cuyos resultados se muestran más adelante.

En la tabla 11 se resumen los datos de los cálculos obtenidos en la sección 5.1.2.1, los mismos que serán usados en el software simulador para la obtención del parámetro de relación de onda estacionaria (ROE). Así mismo en la tabla 10 se describen las características de impedancia, topología y tipo de sustrato usados para el diseño de la antena.

Frecuencia de operación	650 MHz
Altura del sustrato	1.588 mm
Constante dieléctrica efectiva	2.17
Dimensión del patch en X (W)	182 mm
Dimensión del patch en Y (L)	155 mm
Inset Distance	47.32 mm
Inset Gap	2.44 mm
Ancho de alimentación	4.89 mm
Largo de la alimentación	140.58 mm

Tabla 11. Datos obtenidos del análisis matemático y datos complementarios

En la figura 51 se muestra el valor de cada uno de los elementos de la antena patch rectangular.

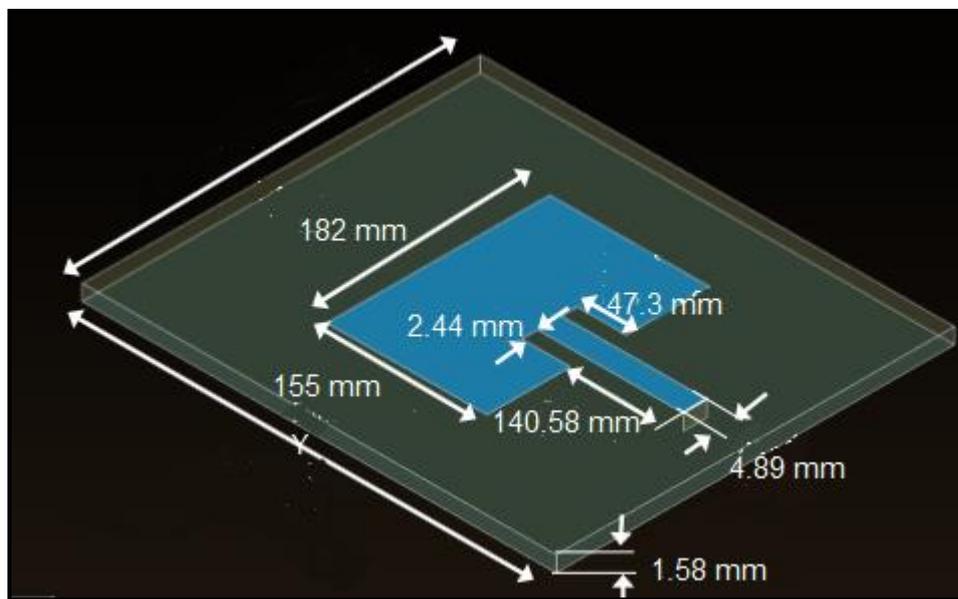


Figura 51. Antena Patch Rectangular individual y sus dimensiones, ubicada sobre el plano XY.

Por otra parte para la aplicación de la extensión o herramienta matemática del software HFSS, se necesita establecer o definir los parámetros de frecuencia de resonancia (f_r), la constante dieléctrica ϵ_r , la altura del sustrato, y las unidades (mm) en la que queremos que nos arroje los resultados. En la tabla 12 se define lo dicho.

Frecuencia de operación	Altura del sustrato	Material del sustrato.	Constante dieléctrica
650MHz	1.5898 mm	RT DUROID 5880	2.2

Tabla 12. Parámetros principales para el diseño de la antena rectangular

Después de introducir estos parámetros en la herramienta matemática, esta nos devuelve el valor de cada una de las dimensiones que componen la antena; la figura 52 muestra los cálculos de las dimensiones que conforman la antena patch medidas por software.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Feed Length	Longitud de la línea de alimentación
Feed Width	Ancho de la línea de alimentación
Inset Gap	Abertura de inserción
Inset Distance	Distancia de la inserción
Patch Dimension X	Dimensión del patch a lo largo del eje X
Patch Dimension Y	Dimensión del patch a lo largo del eje Y
Substrate Dimension X	Dimensión del sustrato a lo largo del eje X
Substrate Dimension Y	Dimensión del sustrato a lo largo del eje Y
Substrate Thickness	Espesor del sustrato

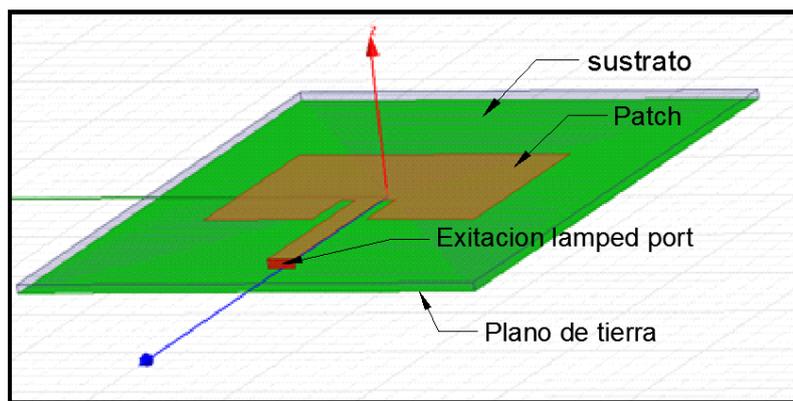
Units	mm
Solution Frequency (GHz)	0.650
Patch Dimension Along x	182.44
Patch Dimension Along y	154.94
Substrate Thickness	1.588mm
Substrate Dimension Along x	283.2
Substrate Dimension Along y	457.91
Inset Distance	47.321
Inset Gap	2.446
Feed Width	4.893
Feed Length	140.584
Outer Boundary	ABC

Figura 52. Resultados proporcionados por la extensión del software HFSS, para la frecuencia de 650 MHz.

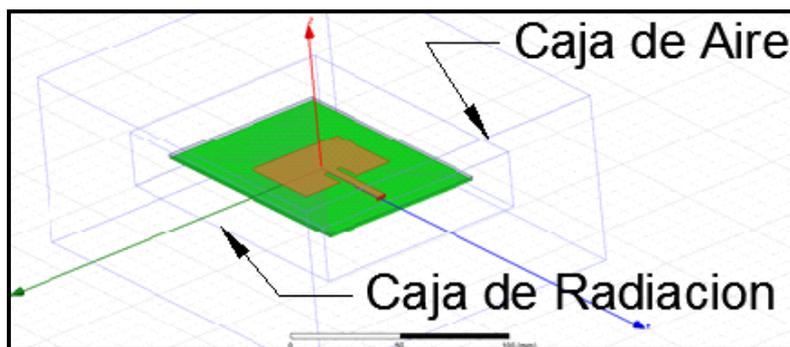
Tanto para los datos obtenidos en el cálculo teórico de diseño de la antena como para los logrados o conseguidos por la herramienta de cálculo virtual se puede notar que los valores de dimensiones que conforman el diseño son relativamente iguales

permitiéndolo establecer un diseño efectivo para condiciones de comunicación basadas en sistemas de RC.

Una vez obtenidos los resultados de las variables se procede a construir la antena en el simulador HFSS, se debe tomar en cuenta que la antena debe ser referenciada a un plano de retorno a tierra, por ello se coloca un plano de tierra debajo del sustrato, con medidas iguales al mismo. Es importante recalcar que el plano de tierra forma parte de todos los diseños de antenas planares, por tanto su presencia es imprescindible en todos los diseños. A continuación en la figura 53 se puede observar la antena patch ya creada, con todos sus elementos, como el plano de tierra, su excitación conocida en el software como *lumped port* y el sustrato donde se ubica la antena patch rectangular. Además tiene asignado una caja de aire llamada *airbox* y otra caja para la radiación virtual, para crear el patrón de radiación en el campo lejano y obtener resultados validos en aplicaciones reales.



a)



b)

Figura 53. Estructura de Antena Rectangular Planar montada en el simulador HFSS: a) Elementos que conforman la antena; b) estructura incluida la caja de radiación y de aire para campo lejano.

Tanto a la placa como al plano tierra se le asigna un campo eléctrico, para que produzca la radiación requerida y efectué una conducción de la corriente apropiada. De igual forma a la caja de aire se le asigna un campo eléctrico en sus caras para delimitar la radiación producida internamente por la placa y el plano de tierra. También se puede observar el puerto de excitación (lamped port) de color rojo que estimula a toda la placa.

Para que el software comience a analizar el diseño se tiene que realizar una validación del mismo, donde se comprueba que este completo. Una vez que la validación se ha completado, se procede a analizar el diseño, el cual puede tardar varios minutos, dependiendo de la complejidad y de las configuraciones para el análisis.

En la figura 54 se muestra el valor del ROE para la antena patch rectangular individual.

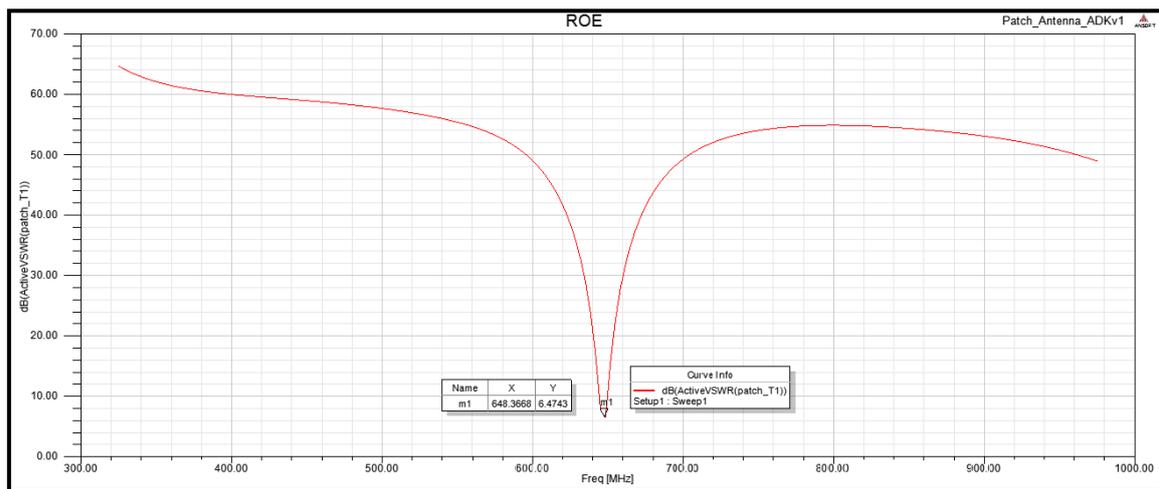


Figura 54. Relación de onda estacionaria (ROE) para la antena Rectangular individual, con respecto a la frecuencia.

La forma de onda de la figura 54 muestra que para la frecuencia de 648.36 MHz se tiene un valor de ROE que es igual a 6.47 dB, que de acuerdo a las consideraciones técnicas no está dentro del rango aceptable para un buen diseño, obteniéndose con este tipo de antena elevadas pérdidas por reflexión (más del 25 % de la potencia transmitida) que además podría dañar el equipo.

Para poder establecer mejores condiciones de valores de ROE se establece la estructuración de un arreglo de antenas rectangulares el mismo que se detalla a continuación.

Arreglo de antenas rectangulares.

Para el proceso de diseño de arreglo de antenas rectangulares se considera el diseño preliminar efectuado para un único patch rectangular, el mismo que con operaciones adicionales nos va a permitir mejora las condiciones de relación de onda estacionaria. Para disponerlas en arreglo se necesita realizar el cálculo de las líneas de transmisión como se muestra a continuación.

Frecuencia	2.4 GHz
Impedancia de entrada	50 Ohm
Topología	Rectangular
Dimensión del Arreglo	2x2
Tipo de sustrato	RT Duroid 5880

Tabla 13. Características para el diseño del arreglo rectangular

El arreglo estará conformado de cuatro antenas rectangulares planarizadas 2x2, con las mismas dimensiones de una antena individual. El valor de impedancia del acople de la antena con la línea de transmisión que alimenta y une toda la estructura del arreglo se debe fijar a un valor de 50 Ohm, valor que se considera obligatorio ya que es el más común dentro del diseño de sistemas de telecomunicaciones con tecnología RC.

En la figura 55 se muestra la disposición del arreglo propuesto. De acuerdo al valor fijado de las impedancias de las líneas de transmisión se obtienen los diferentes valores de ancho (w_1, w_2 y w_c) y largo, los mismo que permiten la existencia de un mejor flujo de corriente.

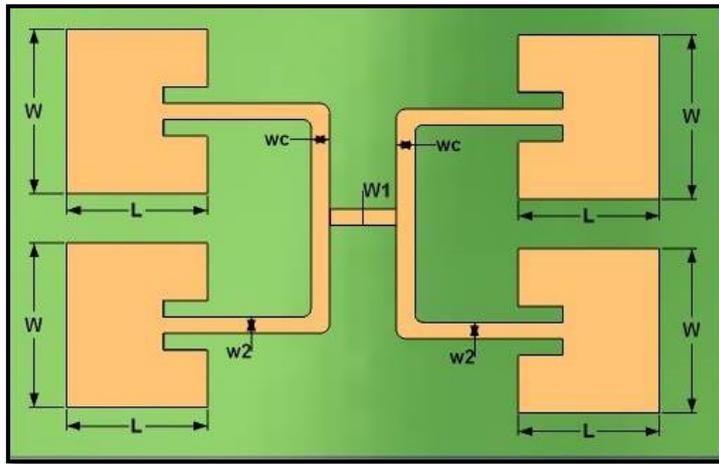


Figura 55. Acople de impedancias del arreglo 2x2

La alimentación principal de entrada es de 50 ohm $Z_1 = 50\Omega$, la cual se divide en dos líneas de 100Ω, $Z_2 = 100\Omega$. Luego se calcula el valor de Z_c , donde $Z_c = \sqrt{Z_1 * Z_2}$, y del valor de esta impedancia se obtendrá el ancho de la línea w_c (Ver figura 55)

Basados en la separación de la geometría diseñada con los extremos del sustrato, los datos de impedancias para un valor de monopolo de cuarto de longitud de onda se fijan en:

$$Z_1 = 50$$

$$Z_2 = 100$$

$$Z_c = \sqrt{100 * 50} = 70.7$$

Una vez obtenidas las impedancias se puede utilizar una calculadora virtual que ayudara a obtener las dimensiones de las alimentaciones de acuerdo a los valores de impedancia; así mismo nos entrega los resultados de los detalles curvos y quiebres que se deben hacer en las líneas de transmisión para poder adaptarlos de la mejor manera y así reducir las pérdidas por uniones. En la figura 56, se muestra un diagrama de las dimensiones que calcula la herramienta virtual, para el diseño y conexión de las líneas de transmisión.

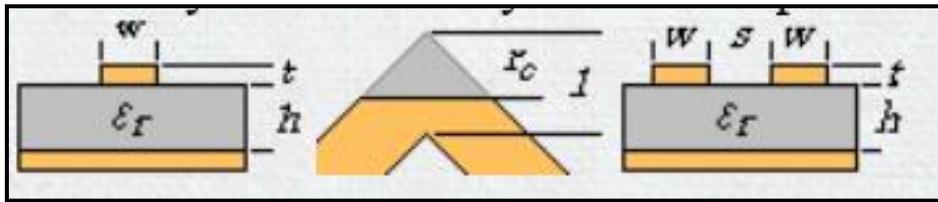


Figura 56. Sintetizador y analizador de líneas de transmisión microstrip [42]

En donde,

ϵ_r = permitividad relativa del dielectrico

w = Ancho del conductor

h = altura del dielectrico

t = espesor del conductor

r_c = Compensacion cuando se dobla en angulo recto

S = Separacion entre conductores

Además de otros parámetros como la velocidad de transmisión, la permitividad relativa efectiva y la longitud física. En las figuras 57, 58, 59 se muestran los resultados arrojados por la calculadora virtual, para las diferentes impedancias (50, 70.7 y 100), para los parámetros ya definidos anteriormente como la f_r , ϵ_r , y h .

Frequency	650	MHz
Electrical length	90	deg
Dielectric relative permittivity (ϵ_r)	2.2	
Dielectric height (h)	1.5888	mm
Conductor thickness (t)	0.0001	mm
Impedance (Z_0)	50	Ω
Conductor width (w) \approx	4.836832337298319	mm
Effective relative permittivity \approx	1.878277441395	
Velocity of propagation \approx	0.729659310937	
Physical length \approx	84.133214741690	mm
Rightangle bend compensation (r_c) \approx	0.530666693768	
Synthesize for w		Analyze for Z_0

Figura 57. Calculadora virtual de líneas de transmisión para una impedancia de 50 ohm

Frequency	650	MHz
Electrical length	90	deg
Dielectric relative permittivity (ϵ_r)	2.2	
Dielectric height (h)	1.5888	mm
Conductor thickness (t)	0.0001	mm
Impedance (Z_0)	100	Ω
Conductor width (w) \approx	1.4132392446607616	mm
Effective relative permittivity \approx	1.766733061931	
Velocity of propagation \approx	0.752340656678	
Physical length \approx	86.748482584192	mm
Rightangle bend compensation (r_c) \approx	0.715614515589	
	<input type="button" value="Synthesize for w"/>	<input type="button" value="Analyze for Zo"/>

Figura 58. Calculadora virtual de líneas de transmisión para una impedancia de 100 ohm

Frequency	650	MHz
Electrical length	90	deg
Dielectric relative permittivity (ϵ_r)	2.2	
Dielectric height (h)	1.5888	mm
Conductor thickness (t)	0.0001	mm
Impedance (Z_0)	70.7	Ω
Conductor width (w) \approx	2.7805283156188207	mm
Effective relative permittivity \approx	1.821730627711	
Velocity of propagation \approx	0.740897142909	
Physical length \approx	85.428990614539	mm
Rightangle bend compensation (r_c) \approx	0.581213229434	
	<input type="button" value="Synthesize for w"/>	<input type="button" value="Analyze for Zo"/>

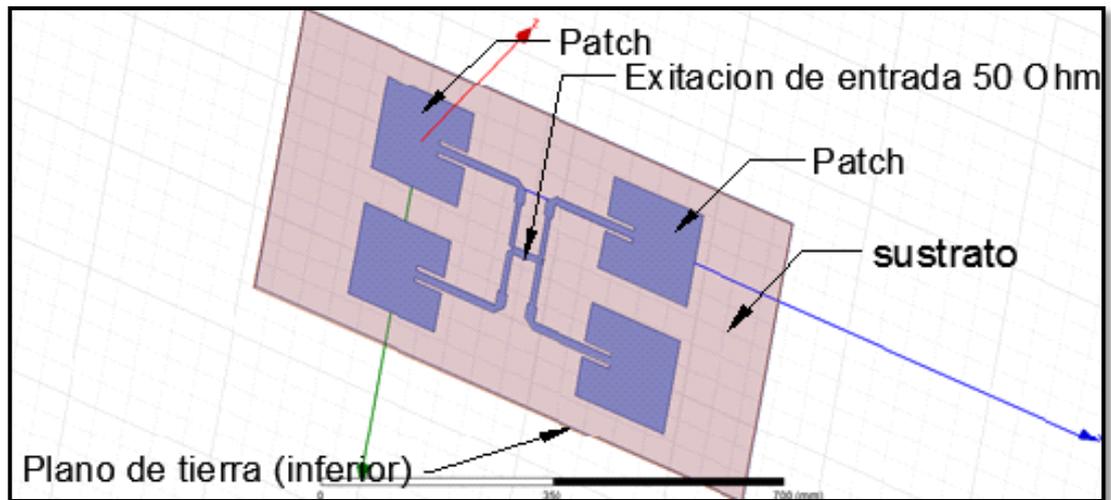
Figura 59. Calculadora virtual de líneas de transmisión para una impedancia de 70.7 ohm

Basándose en los resultados de la calculadora virtual, la tabla 13 muestra los anchos de las líneas en relación a la impedancia.

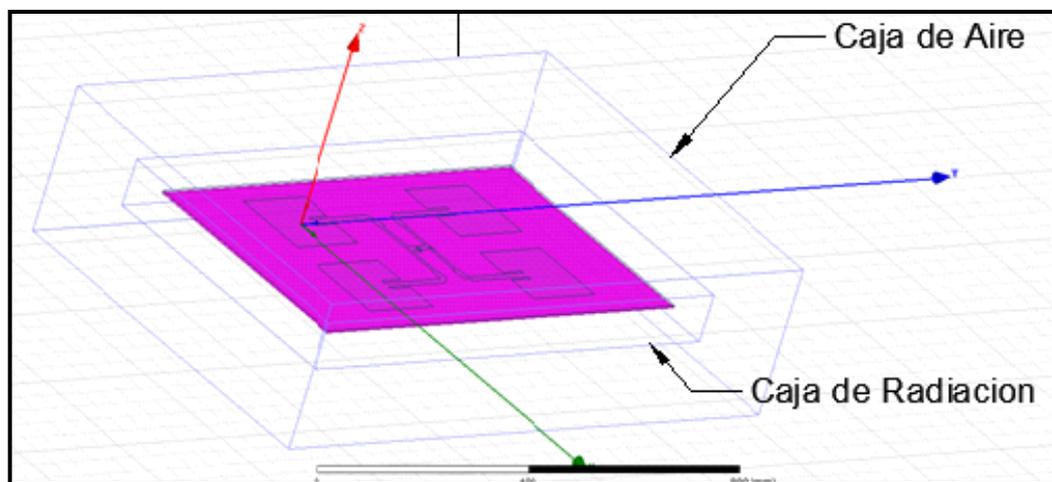
Ancho del conductor	Impedancia del conductor
$w_1=4.83\text{mm}$	$Z_1=50$
$w_2=1.41\text{mm}$	$Z_2=100$
$w_c=2.77$	$Z_c=70.7$

Tabla 14. Resumen de el ancho de cada uno de las líneas de transmision para las diferentes impedancias

Después de obtener las dimensiones para las líneas de transmisión, se procede a disponer las antenas en forma de arreglo. En la figura 60 se muestra la estructura del arreglo en el simulador. Se observa claramente los detalles en las uniones y conexiones. Cabe mencionar que se optó por disponer a las antenas en un arreglo de 2x2, por el motivo que se trabaja a una frecuencia de 650MHz, ya que se las dispone linealmente las dimensiones del arreglo aumentan complicando los procesos de montaje dentro de algún dispositivo.



a)



b)

Figura 60. Estructura del arreglo de antenas rectangulares de tipo 2x2 montada en el simulador HFSS: a) Elementos que conforman el arreglo; b) Arreglo incluida la caja virtual y radiación para campo lejano.

Una vez establecidos los parámetros se procede a la simulación cuyos resultados de relación de onda estacionaria se muestran a continuación

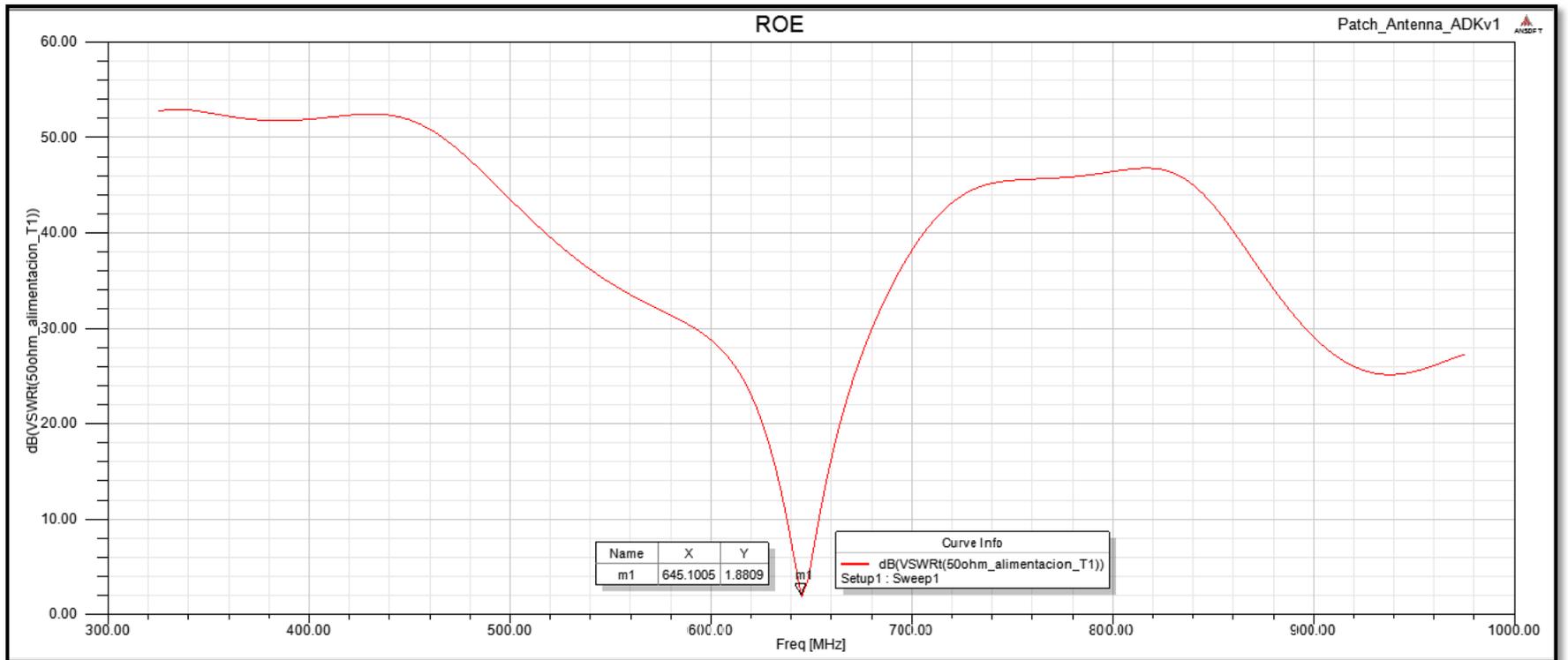


Figura 61. Relación de Onda Estacionaria para el Arreglo de antenas rectangulares, con respecto a la frecuencia.

La forma de onda del ROE demuestra el comportamiento del arreglo, donde se puede observar que para la frecuencia 645 MHz, tenemos una mejor eficiencia de radiación debido a que el ROE es de 1.88dB, valor que está dentro del rango permisible otorgándonos el 10 % de la potencia de transmisión reflejada al TX.

6.1.1.2. Propuesta 2: Proceso de optimización

Dipolo planar individual

Se partirá diseñando un dipolo individual para luego diseñar una antena log-periódica completa, con el propósito de obtener mejores resultados en cuanto al parámetro ROE. Al igual que el caso anterior la propuesta 2 es planarizada sobre un sustrato RT-DUROID 5880, un espesor de 1.588 mm y constante dieléctrica igual a 2.2.

Previo a la presentación de propuesta 2, se realizó simulaciones a diversas frecuencias con el fin de obtener un diseño óptimo, que se adapte a los requerimiento de radio cognitiva; por tanto inicialmente se presenta un dipolo que trabaja a 1 GHz, debido a que la antena log-periódica entrega mejores prestaciones en el rango de 600 MHz a 1 GHz y al igual que la propuesta 1 la intención es de mejorar los parámetros de radiación. En la figura 62 se muestra la estructura y componentes que forman una antena monopolo. Tomar como referencia que la antena planarizada está ubicada sobre el eje XY.

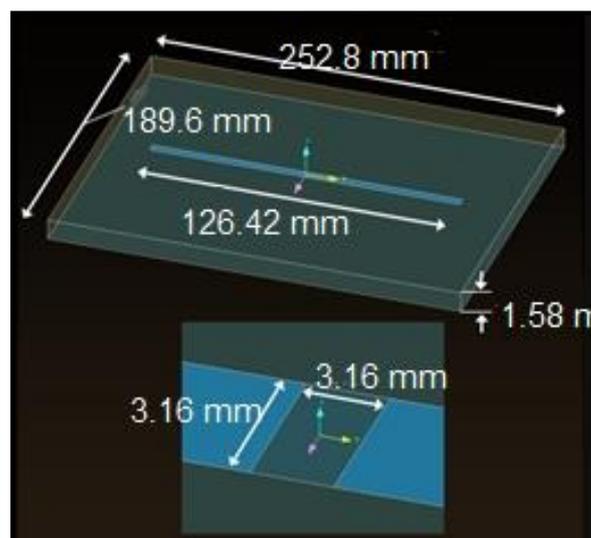


Figura 62. Dimensiones y elementos que conforman el diseño de un dipolo planar, ubicada sobre el plano XY

Como se aprecia en la figura 62, estas son las variables que compondrán el diseño de la antena tipo dipolo para una frecuencia de 1GHz, las cuales dependen de la frecuencia de operación, así como también del tipo de material y las dimensiones

Como ya se mencionó en el apartado de metodología, es necesario disponer de parámetros fundamentales, los cuales se definen en la tabla 15.

Frecuencia de operación	Altura del sustrato	Material del sustrato.	Constante dieléctrica
1GHz	1.588 mm	RT DUROID 5880	2.2

Tabla 15. Parámetros básicos para el diseño del dipolo planar

Estos parámetros permiten obtener las dimensiones de los elementos que conforman la estructura, así insertando estos datos en la hoja de cálculo de la extensión de HFSS, se puede obtener los valores de los elementos de la estructura radiante. (ver figura 63).

VARIABLE	DESCRIPCION
Feed Gap Length	Largo de la alimentación de la antena dipolo
Dipole With	Ancho del Dipolo
Dipole Length	Longitud del Dipolo
Substrate Thicknes	Espesor del sustrato
Substrate dimensión X	Dimensión del sustrato en X
Substrate Dimension Y	Dimensión del Sustrato en Y

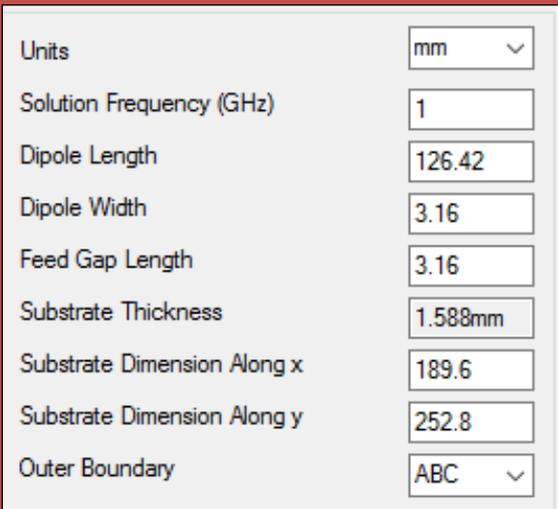


Figura 63. Información obtenida con la extensión del software HFSS

Como puede notarse en la figura 63 las dimensiones del dipolo son pequeñas y versátiles, muy útiles para diferentes aplicaciones por el tamaño del mismo. Estas dimensiones obtenidas serán usadas para montar la estructura en el simulador.

La figura 64 se muestra la estructura de la antena dipolo sobre el sustrato para la frecuencia de 1GHz.

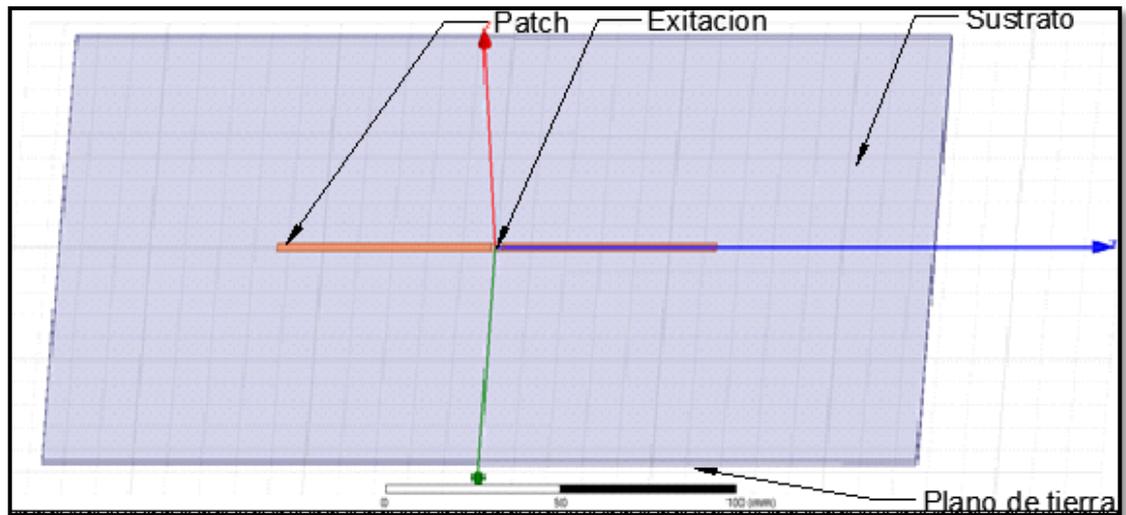


Figura 64. Estructura del dipolo sobre el sustrato planar montada en el simulador HFSS

Las formas de onda y los parámetros de radiación en campo lejano son primordiales, para lo cual se inserta recubriendo la antena de una caja de aire y otra de radiación. En la figura 65 se muestra lo mencionado.

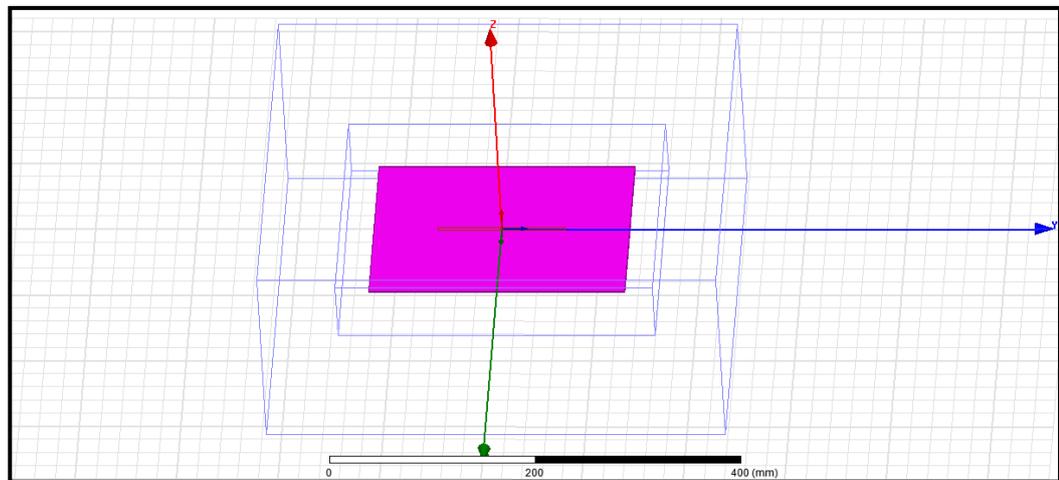


Figura 65. Estructura del dipolo montada sobre el simulador HFSS y recubierta por una caja de aire y caja de radiación.

Notar que la figura ya cuenta con una excitación lamped port para su análisis.

Una vez con la estructura completa y validado el diseño, se procede a pasar a la fase de análisis de la estructura, en donde nos presenta como resultado el ROE requerido en este apartado. En la figura 66 se muestra la forma de onda del ROE con respecto a la frecuencia.

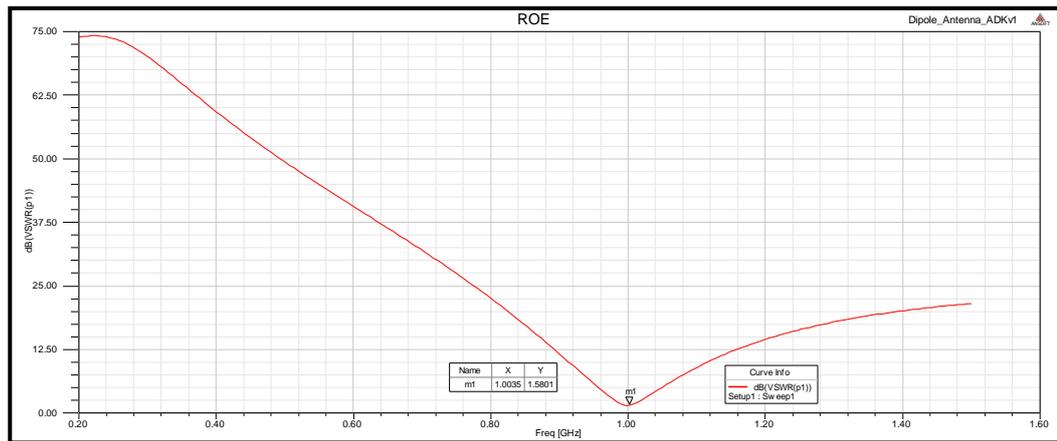


Figura 66. Relación de onda estacionaria (ROE) para el dipolo planar individual, con respecto a la frecuencia.

Según el comportamiento de la forma de onda se observa que para la frecuencia de operación, se obtiene un ROE de 1.58 dB (mirar el marcador m1 de la figura 66), el cual es un valor aceptable dentro del rango de 1 a 3 para sistemas que trabajen a esta frecuencia. Es decir a 1.5 se está reflejando el 4% de toda la potencia entregada por el transmisor. Hasta ahora los diseños carecen de ancho de banda.

Antena log-periódica

El proceso de diseño y simulación es semejante que los descritos anteriormente. Siempre se parte de los parámetros principales y de los variables que conforman toda la estructura. En la tabla 16 se muestran los parámetros básicos para el diseño de la estructura radiante log-periódica.

Altura del substrato	Material del sustrato.	Constante dieléctrica	Frecuencia Baja	Frecuencia Alta
1.588 mm	RT DUROID 5880	2.2	300 MHz	1GHz

Tabla 16. Parámetros básicos

Notar que en la tabla 16 se mencionan dos frecuencias, esto es debido a que este tipo de antenas están en la capacidad de abarcar un gran ancho de banda, así mismo, en las ecuaciones matemáticas tomar en cuenta dos frecuencias como se indicó en la propuesta 2 del apartado metodología. En la tabla 17 se muestra un resumen de los datos calculados para el diseño de la antena log-periódica.

Frecuencia de operación	fmax=1GHz; fmin=300MHz
Altura del sustrato	1.588 mm
Tau τ	0.7
Sigma σ	0.84
Angulo delta α	30
Angulo beta β	60
Constante dieléctrica efectiva	2.17
Longitud máxima del reflector	250 mmm
Longitud mínima del reflector	0.15 mm
Numero de elementos	3
Longitud externa (Rn)	R1=55 mm; R2=38.5; R3=26.95mm
Longitud Interna (an)	a1=46.2; a2=32.64; a3=0
Ancho del Port Gap	55.51 mm

Tabla 17. Datos obtenidos del análisis matemático y datos complementarios.

La figura 67 muestra las variables, componentes y dimensiones de la antena log-periódica, además de las constantes importantísimas que caracterizan este tipo de antenas como son la constante de escalamiento (τ) y la constante de espaciamento (σ).

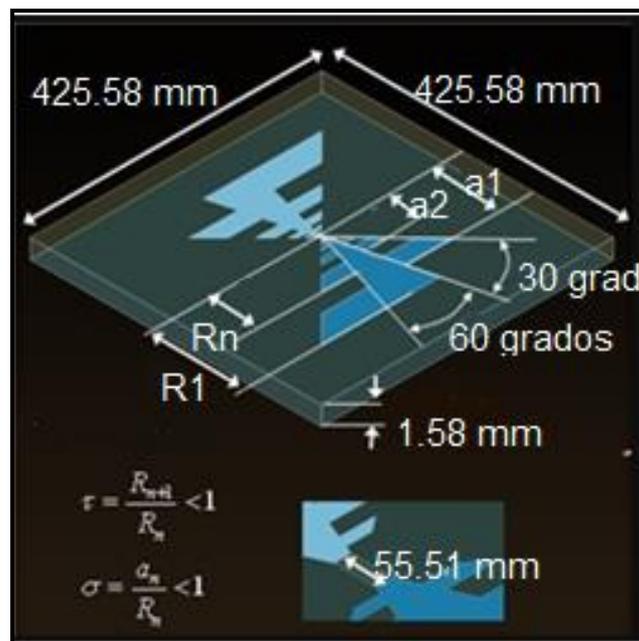


Figura 67. Constantes y dimensiones que conforman el diseño de una antena log-periódica

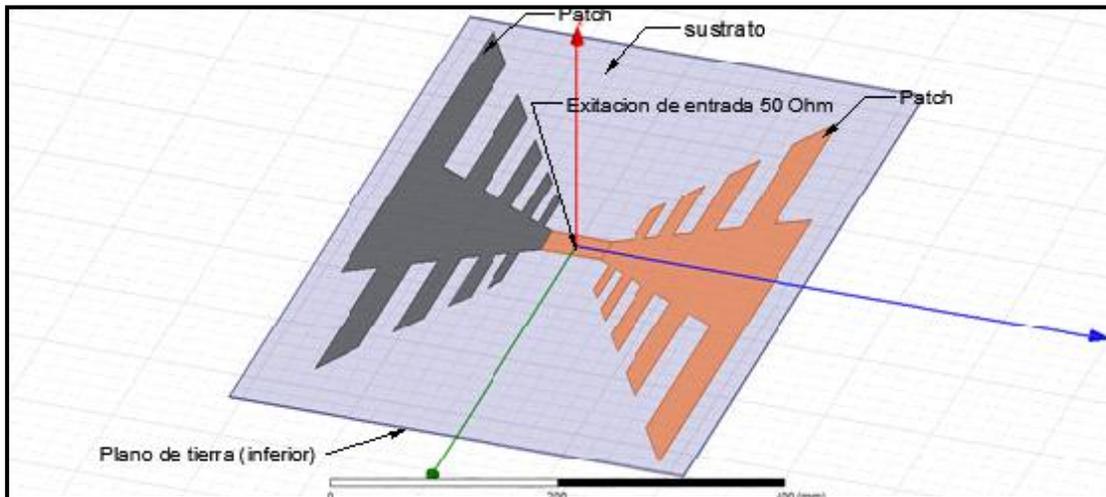
Por otro lado, también se puede usar la extensión del software HFSS, para la obtención de los valores que conforman la antena log-periódica, de acuerdo a los parámetros de la tabla 16. En la figura 68 se muestran los resultados obtenidos mediante software, comparables a los obtenidos en la propuesta 2 del apartado de metodología y que se mostraron en la tabla 17. Hay que recalcar que existen parámetros definidos por el diseñador como son la antena fr, la constante dieléctrica ϵ_r , altura del sustrato (h), los ángulos α y β y la constante de escalamiento $\tau < 1$ que igual están presentes en la tabla 17 y figura 68

Variable	Descripción
R_n	Longitud externa
a_n	Longitud interna
α (delta)	Angulo Delta (grados)
β (beta)	Angulo Beta (grados)
Port Gap Width	Ancho del puerto de alimentación
Substrate Dimension X	Dimensión del sustrato a lo largo del eje X
Substrate Dimension Y	Dimensión del sustrato a lo largo del eje Y
Substrate Thickness	Altura del sustrato
Constante de espaciamento	σ (sigma)
Constante de escalamiento	τ (tau)

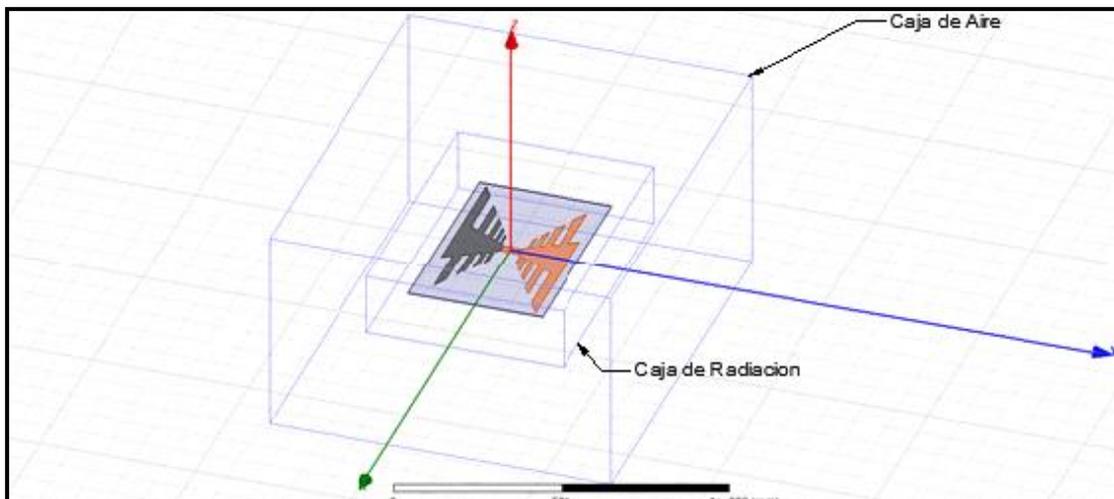
Figura 68. Información obtenida mediante la extensión del software HFSS

Notar que las dimensiones de la antena log-periódica son pequeñas, haciendo de esta una antena muy versátil y eficiente.

Con los datos obtenidos mediante cálculos matemáticos y software, se monta la antena en el simulador. La figura 69 muestra la antena creada, con todos sus elementos y dimensiones, los cuales se denotan en la misma figura.



a)



b)

Figura 69. Estructura de la antena log-periódica montada en el simulador HFSS: a) Elementos que la conforman; b) estructura incluida las cajas de radiación y aire para campo lejano.

Como se puede notar en la figura 69, la estructura de la antena está montada en el simulador, con todos los parámetros definidos y calculados. Después de la fase de validación, se procede al análisis de la estructura log-periódica, en este caso el ROE (Relación de onda estacionaria), que se muestra en la figura 70.

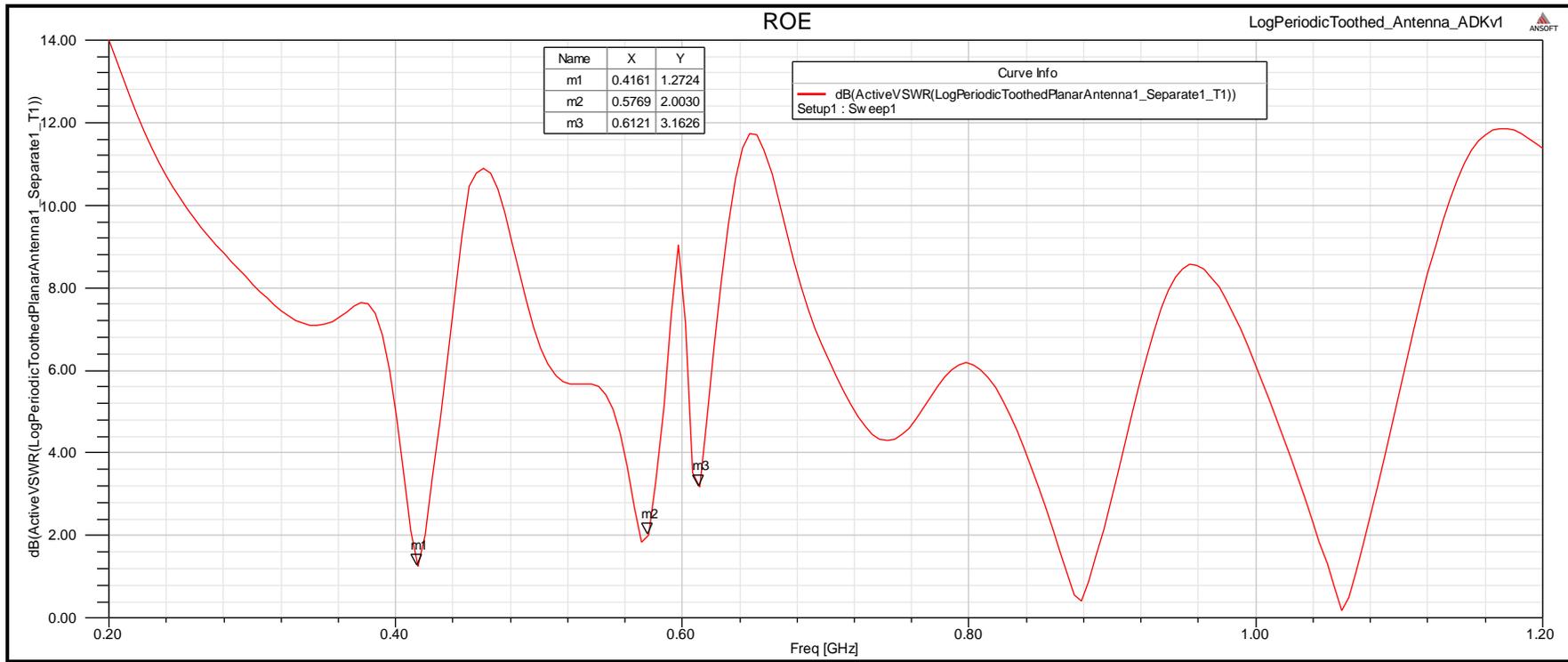


Figura 70. Relación de onda estacionaria (ROE) de antena log-periódica

En el comportamiento de la forma de onda de la figura 70, se aprecia muchas variaciones en la forma de onda con respecto a la frecuencia, de acuerdo a esto se obtienen diferentes valores de ROE a diferentes frecuencias (fijarse en los marcadores). El ROE llega a tener valores aceptables para múltiples frecuencias de operación dentro del ancho de banda propuesto (54 MHz-964 MHz). Como se nota todos los valores del ROE están dentro del rango admisible (1 a 3dB), es decir que la antena está reflejando hacia el transmisor del 1% al 25% en los peores casos.

6.1.1.3. Propuesta 3: Proceso de optimización

Antena Discónica

En la propuesta 3, se ha optado por diseñar una antena no planarizada. La antena propuesta es una antena Discónica estudiada por muchos años. Su particular diseño parte desde una antena Bicónica y por tanto se la considera como un arreglo entre un disco que hace de plano de tierra, un insulador que es el que separa el cono del disco y un cono que es un polo ensanchado. En la figura 71 se muestra el modelo de antena Discónica a diseñar, las variables y componentes que la conforman.

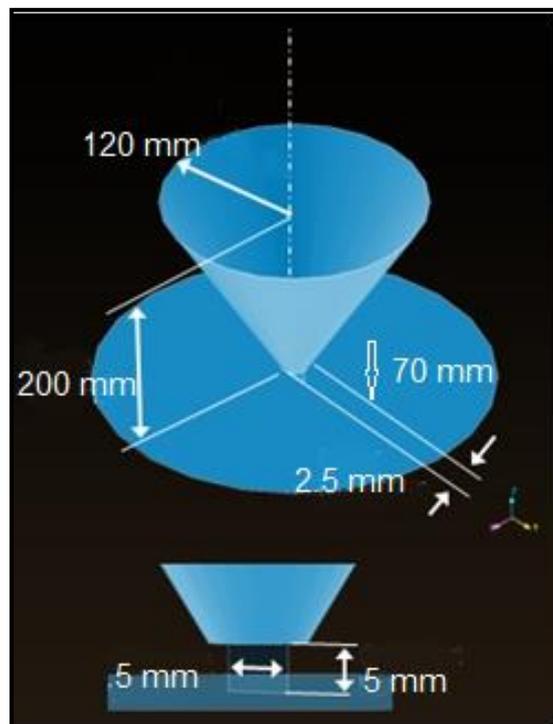


Figura 71. Modelo de antena Discónica a diseñar y sus dimensiones.

Se opta por este tipo de antena debido a las características que presenta como omnidireccionalidad y ancho de banda, particularidades requeridas en los sistemas de radio cognitiva.

Para esta propuesta se trabaja con la frecuencia de operación de 500 MHz, ya que se efectuó simulaciones a diferentes frecuencias evidenciándose que a un valor de 500 MHz presento mejores resultados de operación. En la tabla 18 se muestra un resumen de los valores de cada uno de las variables calculados en la propuesta 3 del apartado de metodología.

Frecuencia de operación	500 MHz
Radio interno	2.5 mm
Radio externo	120 mm
Altura del cono	200 mm
Radio del disco de tierra	70 mm
Longitud de la alimentación (port gap)	5 mm
Ancho de la alimentación (port gap)	5 mm

Tabla 18. Datos obtenidos del análisis matemático y datos complementarios.

De igual manera podemos utilizar la extensión del programa HFSS, introduciendo en el la frecuencia de operación ya definida (500 MHz). En la figura 72, se observa los datos obtenidos mediante software.

VARIABLE	DESCRIPCION
Outer radius	Radio del cono exterior
Inner Diameter	Radio del cono interior
Cone Height	Altura del cono
Gap Port	Dimensiones de la alimentación (Insulador)

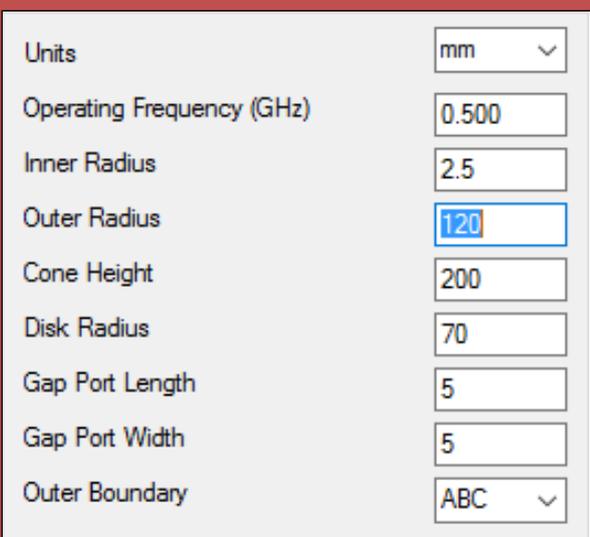
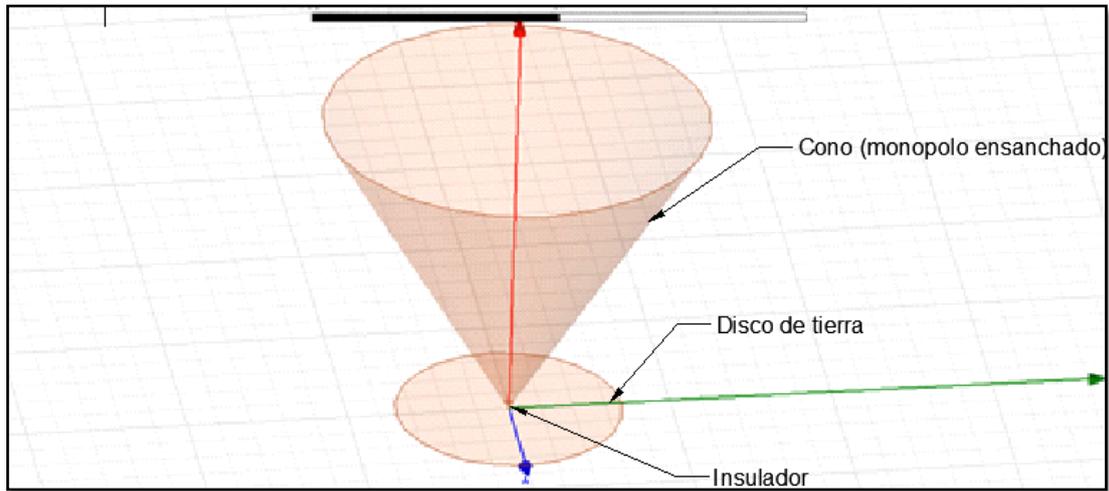
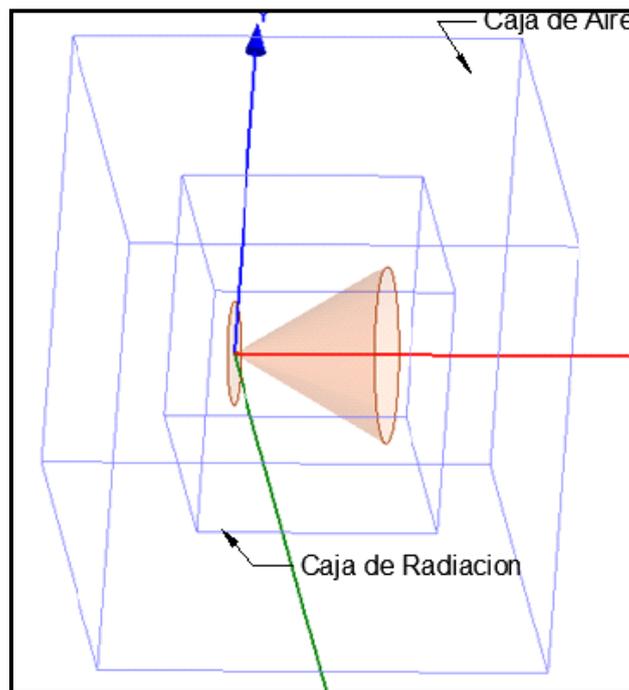


Figura 72. Información obtenida mediante la extensión del software HFSS

A partir de estos datos se procede al diseño y montaje de la antena sobre el simulador para su respectivo análisis. En la figura 73 se muestra la estructura de la antena Discónica con todos sus elementos.



a)



b)

Figura 73. Estructura de la antena Discónica montada en el simulador HFSS: a) Elementos que la conforman; b) Estructura incluida la caja de aire y de radiación para campo lejano (3D)

La figura 73 es el resultado del montaje de la antena Discónica sobre el simulador, tomando en cuenta las dimensiones y los elementos que conforman una antena de este tipo.

A partir de esto se procede a analizar la estructura y así obtener los parámetros de transmisión deseados. En la figura 74 se observa el resultado en lo referente al ROE para la antena discónica.

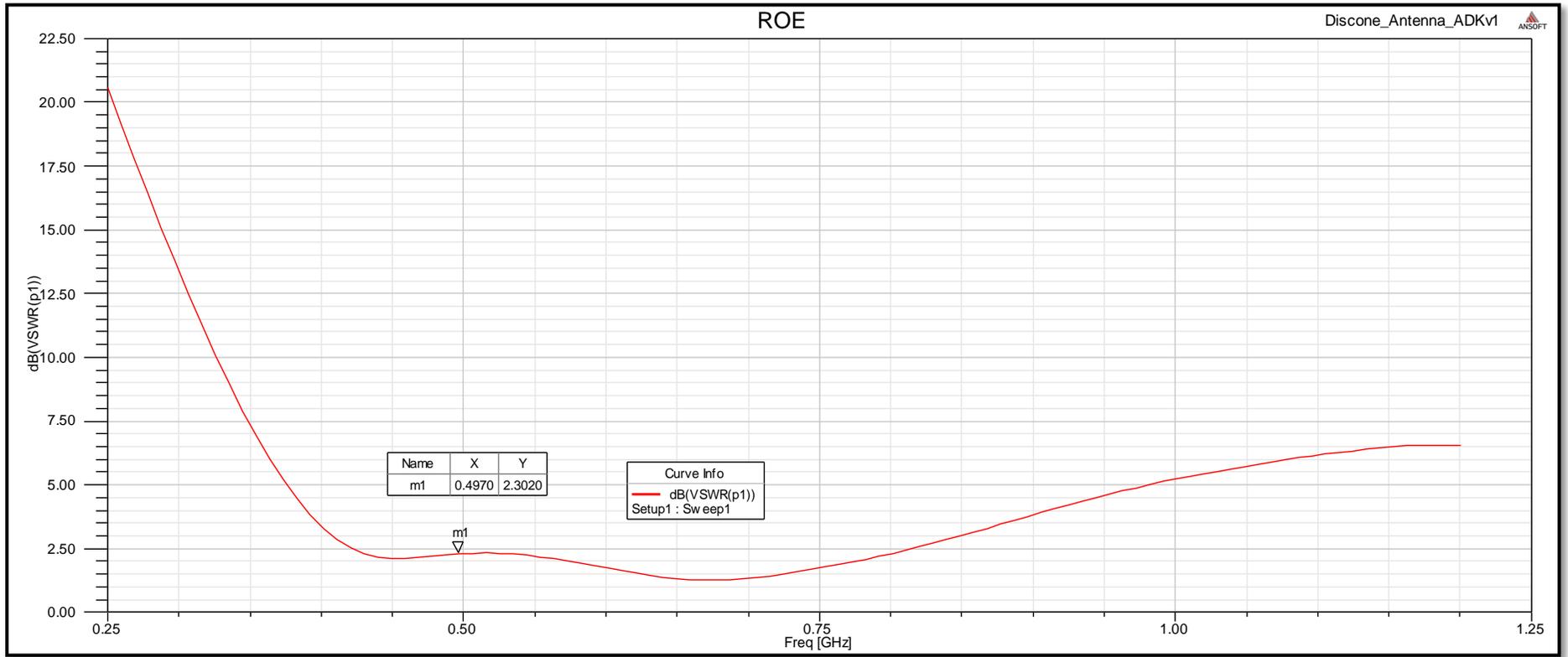


Figura 74. Relación de onda estacionaria de la antena Disconica

Del análisis que se puede hacer de la figura 74, se presenta un ROE muy estable para el rango de frecuencias requerido, y está dentro del rango admisible para un diseño eficiente, el valor del ROE se mantiene cerca de 2.3 dB para las diferentes frecuencias.

6.1.2. Resultados de pérdidas por retorno ($S_{1,1}$) para la antena propuesta 1, propuesta 2 y propuesta 3

Las pérdidas por retorno $S_{1,1}$ es otro parámetro muy importante a analizar de nuestro prototipo. $S_{1,1}$ son los coeficientes de reflexión y transmisión entre onda incidente y la onda reflejada, refiriéndose a como las corrientes son afectadas cuando se desplazan por una línea de transmisión o cuando se encuentran con alguna discontinuidad debido a la introducción de una red, en una geometría radiante; esto quiere decir que una onda al desplazarse por la línea de transmisión se encuentra con línea de diferente impedancia de la impedancia característica de la línea.

El coeficiente de reflexión también indica el acoplamiento logrado en una red o dispositivo, siendo el coeficiente de reflexión, participe para dar una respuesta en frecuencia lo más plana posible. Para un aprovechamiento mayor al 90% de la señal emitida/recibida los valores del coeficiente de reflexión adecuados deben ser menores a -8 dB ($-\infty \leq S_{1,1} \leq 0$ en dB).

6.1.2.1. Presentación del parámetro $S_{1,1}$ para la propuesta 1

Antena tipo patch rectangular simple.

En la figura 75 se muestra el comportamiento de la antena rectangular individual, en relación a las pérdidas por retorno que es un parámetro importante para determinar el ancho de banda y el acople de la antena.

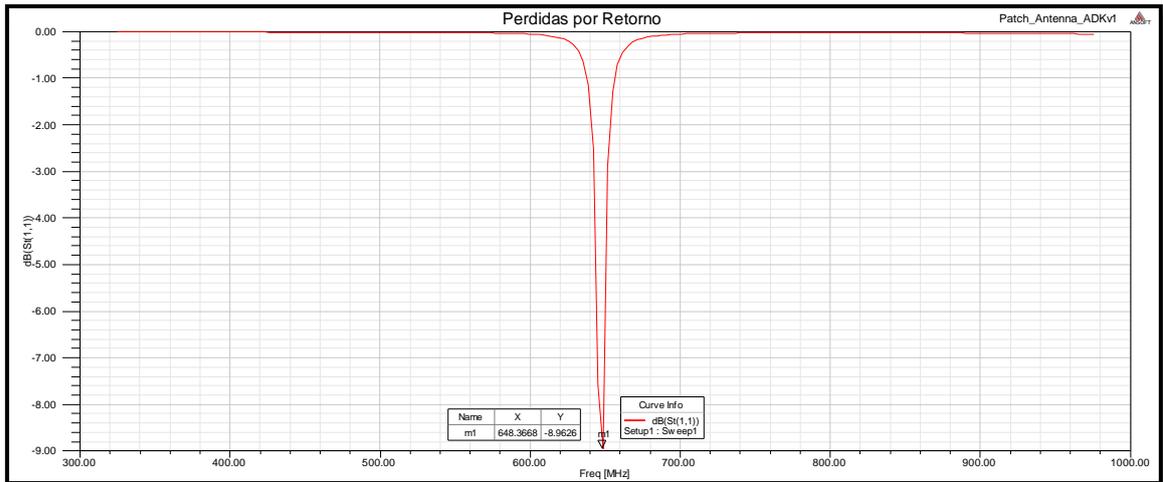


Figura 75. Pérdidas por retorno (S1,1) de la antena rectangular individual

Como se observa en la figura 75 el resultado de las pérdidas por retorno (S1,1), para la frecuencia de resonancia tiene un valor de -8.9 dB. Hay que recordar que las pérdidas por retorno (S11), nos indica cuanta de la energía transmitida es reflejada debido a las interferencias en el acoplamiento entre la línea de alimentación y la carga.

Arreglo de antenas rectangulares.

La figura 76 muestra las pérdidas por retorno del arreglo de antenas. Como se puede observar, se tiene un valor de S1,1 de -20dB para la frecuencia de resonancia y por lo tanto los resultados son satisfactorios, en cuanto al acoplamiento. En cuanto al ancho de banda, aún se obtiene un reducido valor para esta propuesta de diseño.

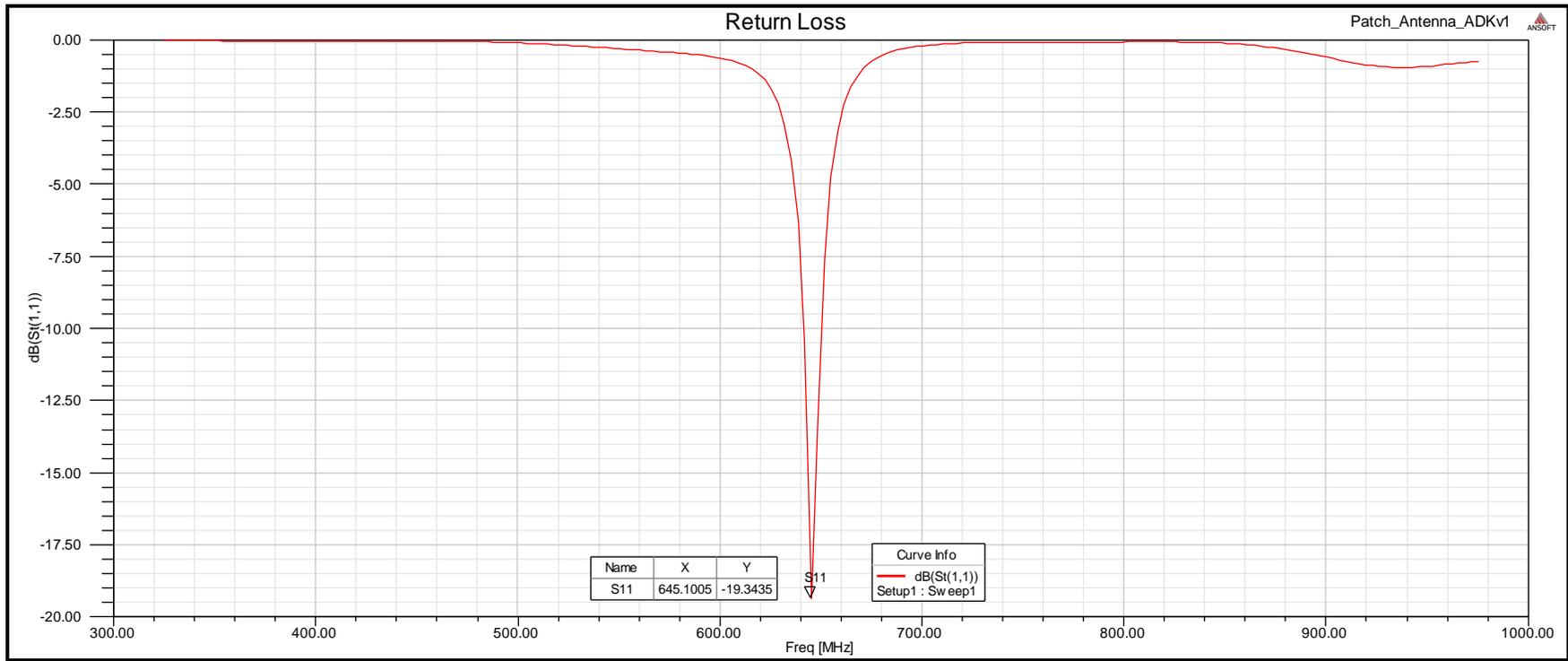


Figura 76. Pérdidas por retorno (S1,1) del arreglo de antenas rectangulares

6.1.2.2. Presentación del parámetro S1,1 para la propuesta 2

Dipolo planar Individual

En la figura 77, se muestra el resultado de las pérdidas por retorno del dipolo trabajando a una frecuencia de operación de 1GHz.

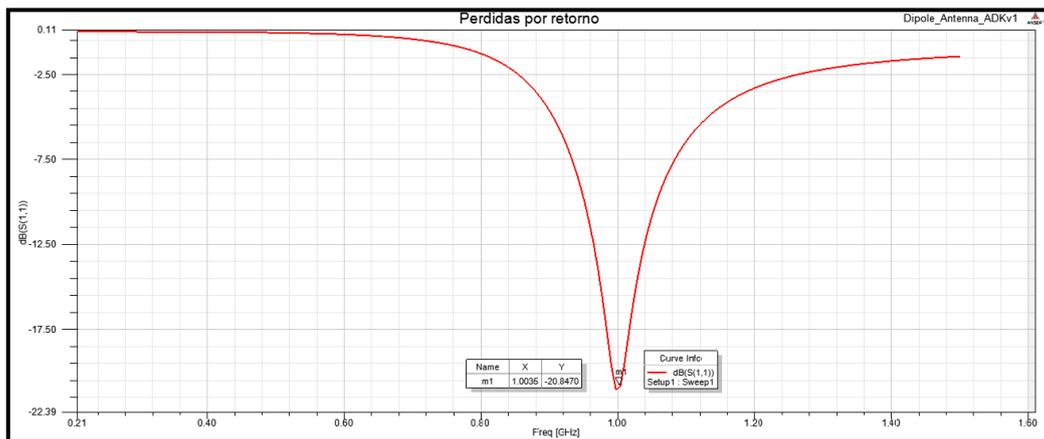


Figura 77. Pérdidas por retorno (S1,1) de la antena dipolo planar individual

Según muestra la figura 77 el valor obtenido por pérdidas por reflexión es de -21dB y el ancho de banda es de 50MHz tomada desde una referencia de -8dB. Para la frecuencia de resonancia tenemos una eficiencia de más del 90% de la potencia de la señal emitida por un buen acoplamiento.

Antena log-periódica

En la figura 78 se muestra las pérdidas por retorno de la antena log-periódica.

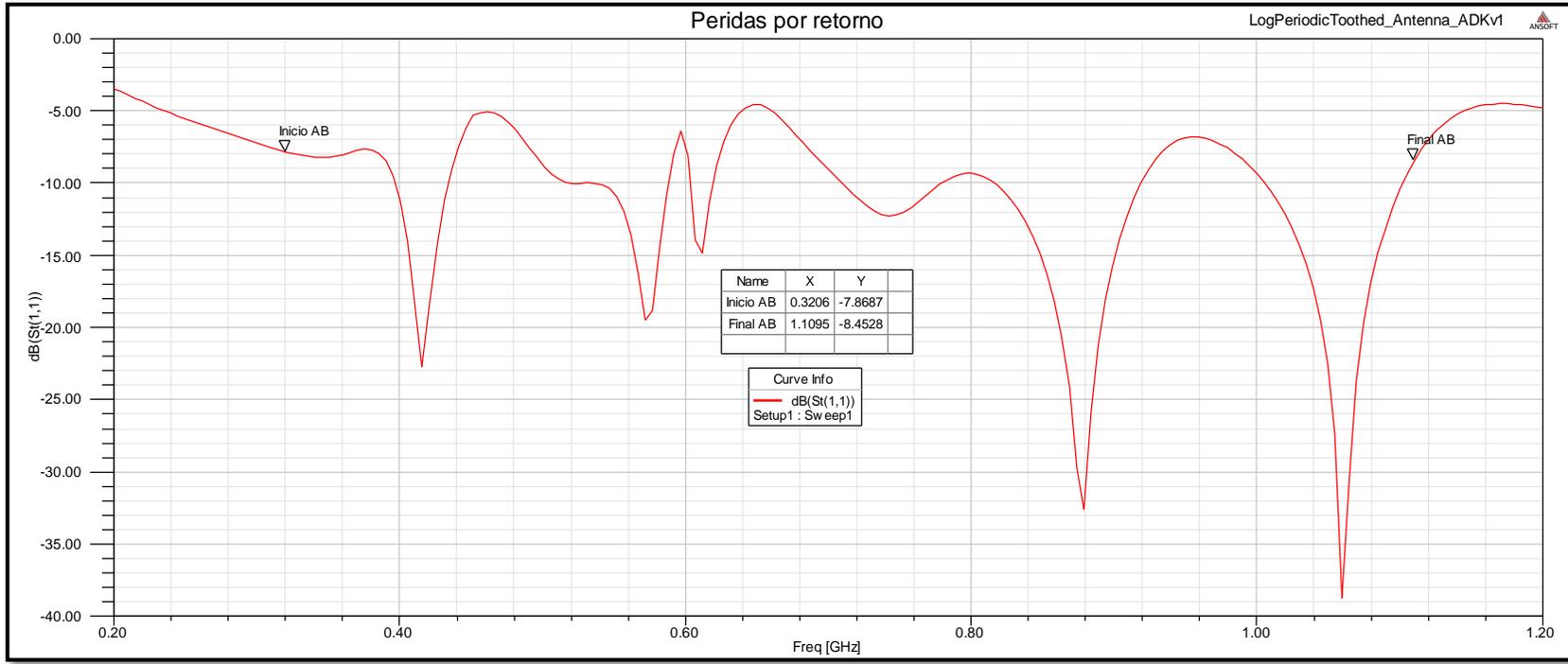


Figura 78. Pérdidas por retorno (S1,1) de la antena log-periódica

Los valores de pérdidas por retorno para este arreglo de antenas están por debajo de los -8dB para un rango considerable de frecuencia, donde además se puede apreciar que el ancho de banda alcanzado mejora notablemente frente a otras propuestas logrando así la posibilidad de mostrar mejores funcionalidades en un sistema de radio cognitiva.

6.1.2.3. Presentación del parámetro S_{1,1} para la propuesta 3

En la figura 79 se muestra el parámetro S_{1,1} para la tercera propuesta, si analizamos la gráfica notamos que la curva cae por debajo de los -8dB para todo el rango de frecuencias requerido, alcanzando un ancho de banda de 700 MHz (fijarse en los marcadores m1 y m2) valor altamente adecuado para los sistema de radio cognitiva.

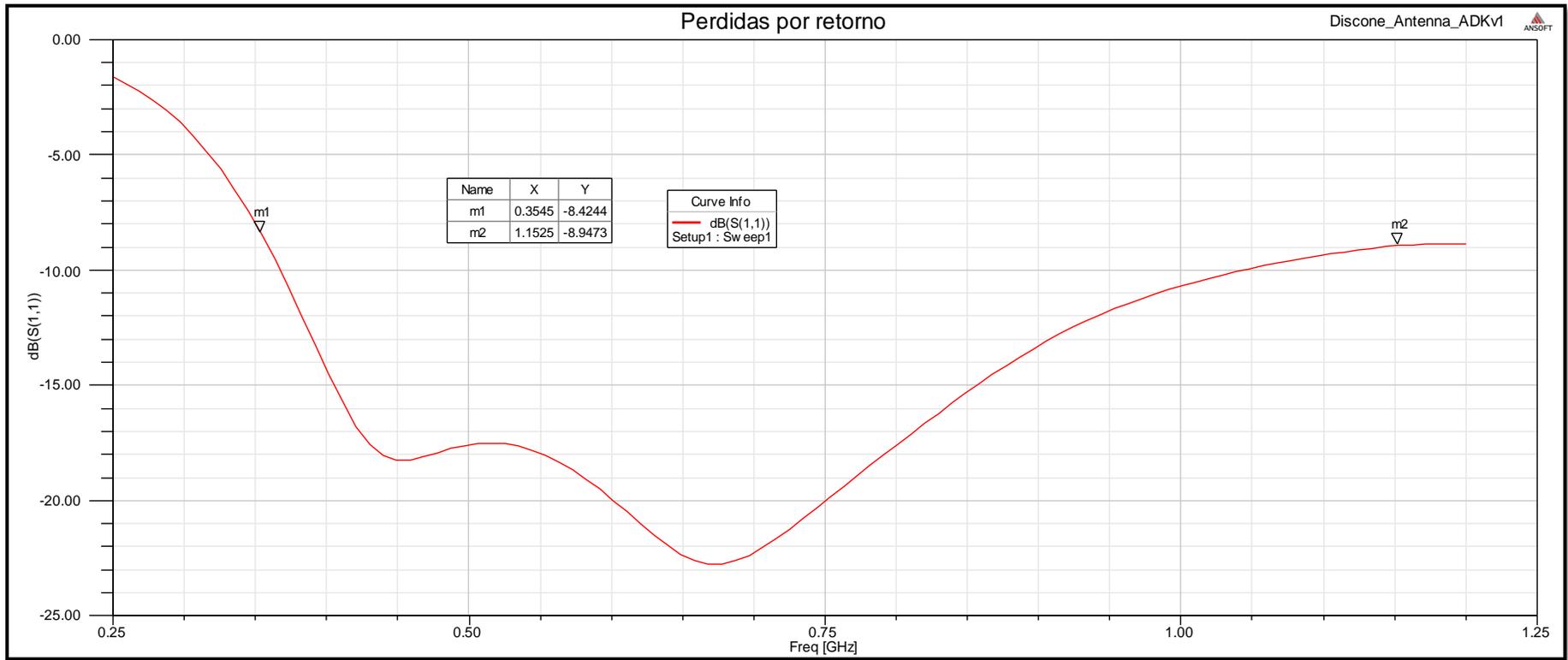


Figura 79. Pérdidas por retorno de la antena Discónica

6.1.3. Resultados del patrón de radiación para la antena propuesta 1, propuesta 2 y propuesta 3

En esta sección se observa los resultados arrojados por el simulador, en cuanto al patrón de radiación para todos los casos de diseño propuesto. En los datos de la simulación se puede medir valores de potencia radiados por las antenas en una dirección específica así como también los valores de ganancia y formas de radiación de los sistemas radiantes.

6.1.3.1. Presentación del patrón de radiación de la propuesta 1

Antena patch rectangular simple.

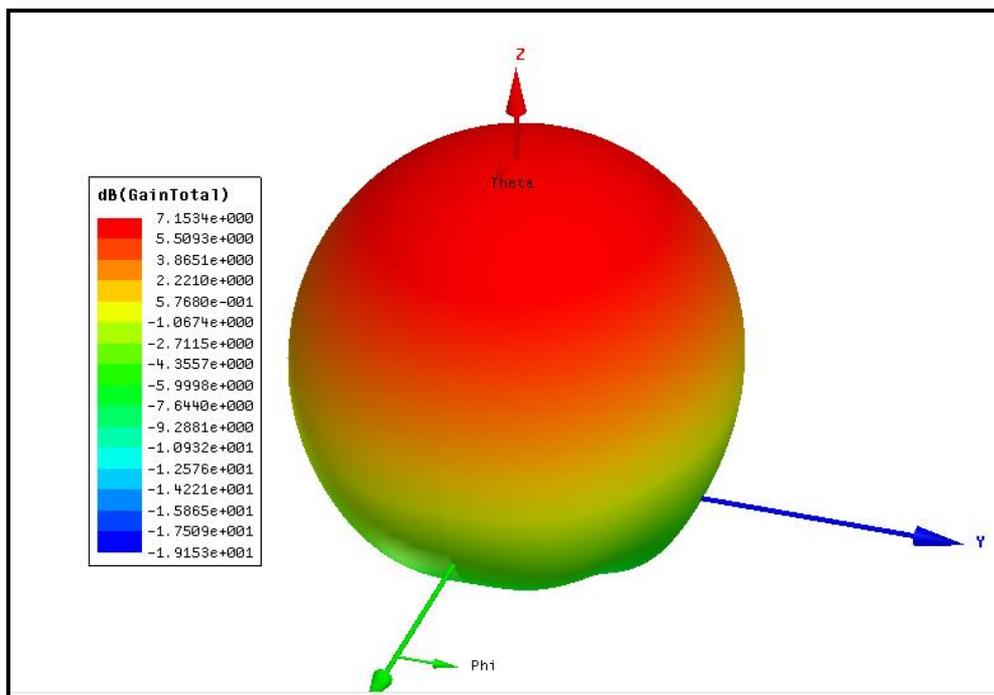


Figura 80. Patrón de radiación de la antena rectangular planarizada a una frecuencia de 650 MHz. Gráfico polar en 3D

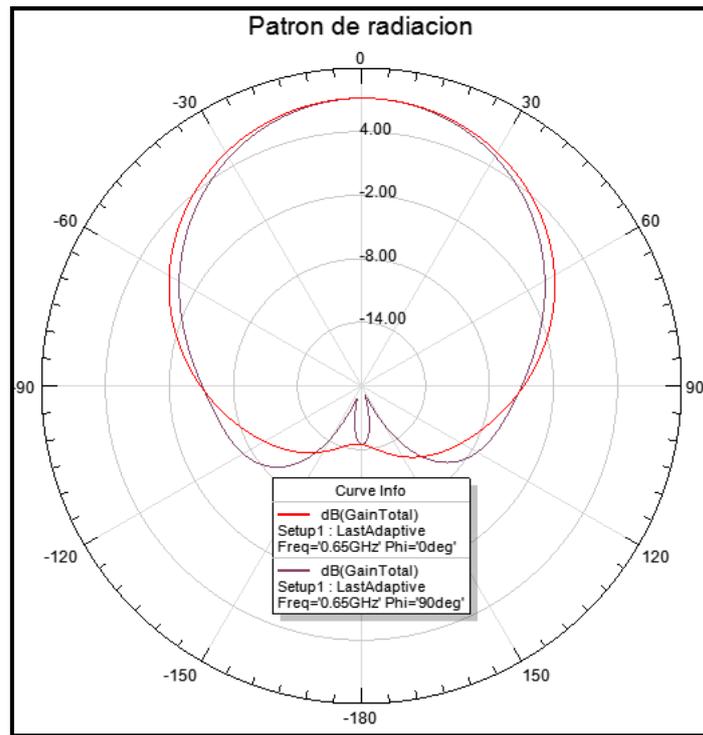


Figura 81. Patrón de radiación de la antena rectangular planarizada a una frecuencia de 650 MHz. Para 0 y 90 Phi

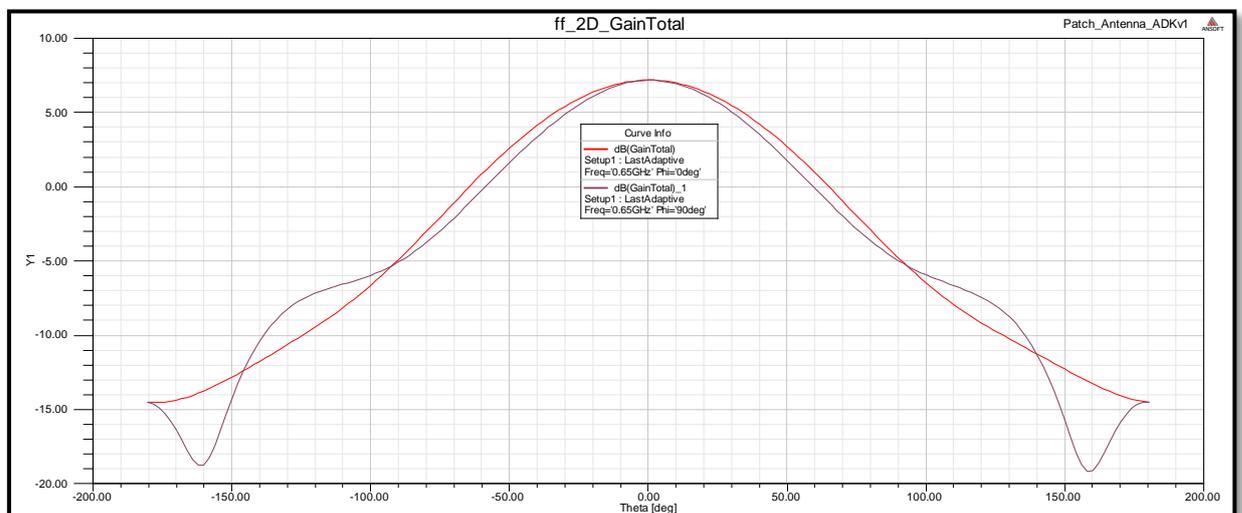


Figura 82. Ganancia de la antena rectangular planarizada a una frecuencia de 650 MHz en 2D

Arreglo de antenas rectangulares

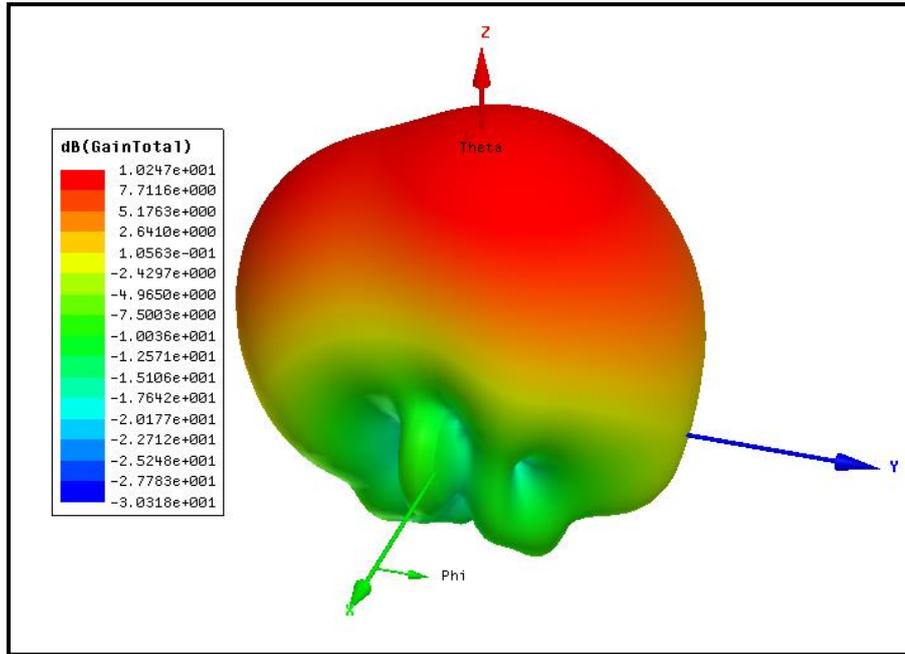


Figura 83. Patrón de radiación del arreglo de antenas planarizada a una frecuencia de 650 MHz. Gráfico polar en 3D

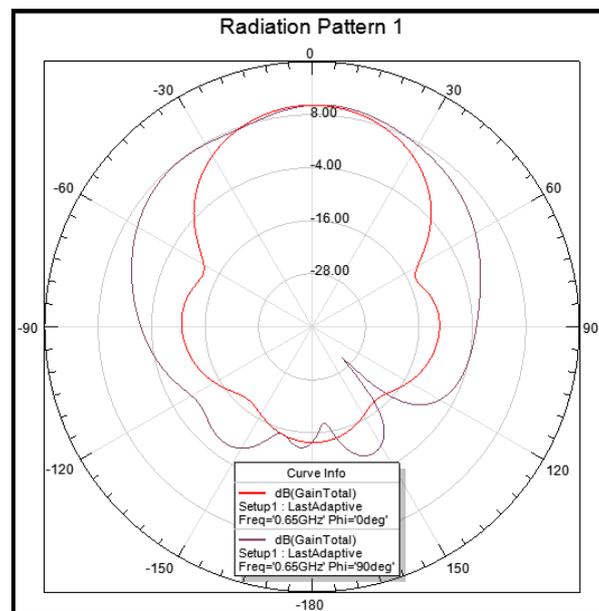


Figura 84. Patrón de radiación del arreglo planarizado a una frecuencia de 650 MHz. Para 0 y 90 Phi

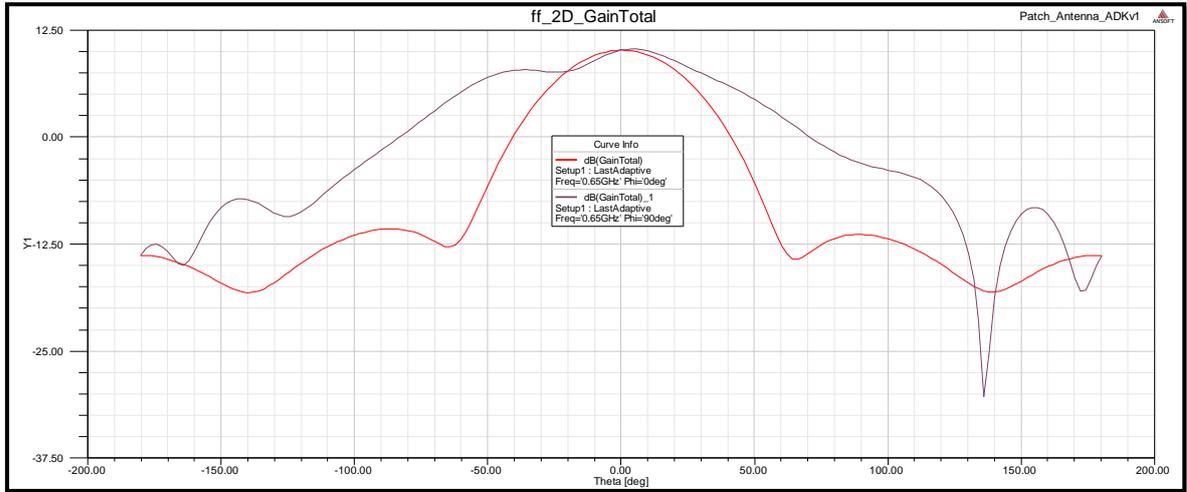


Figura 85. Ganancia del arreglo planarizado a una frecuencia de 650MHz en dos dimensiones

Finalmente, se resume en la tabla 17, la información de los patrones de radiación de la propuesta 1.

Antena	Ganancia Máxima	Frecuencia de operación	Omnidireccionalidad
Rectangular individual	7 dB	650 MHz	NO
Arreglo de antenas rectangulares	10 dB	650 MHz	Medianamente

Tabla 19. Resumen de las características de los patrones de radiación en la propuesta 1

6.1.3.2. Presentación del Patrón de radiación de la antena propuesta 2

Dipolo planar Individual

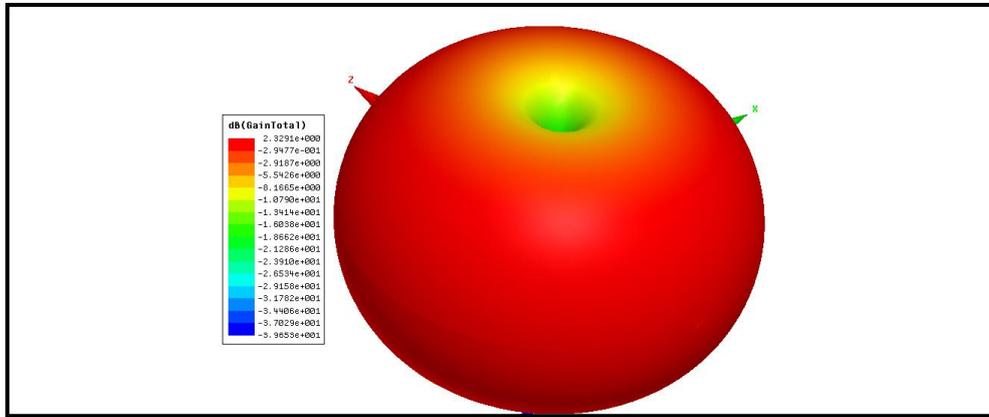


Figura 86. Patrón de radiación de la antena Dipolo planar a una frecuencia 1 GHz.
Gráfico polar en 3D

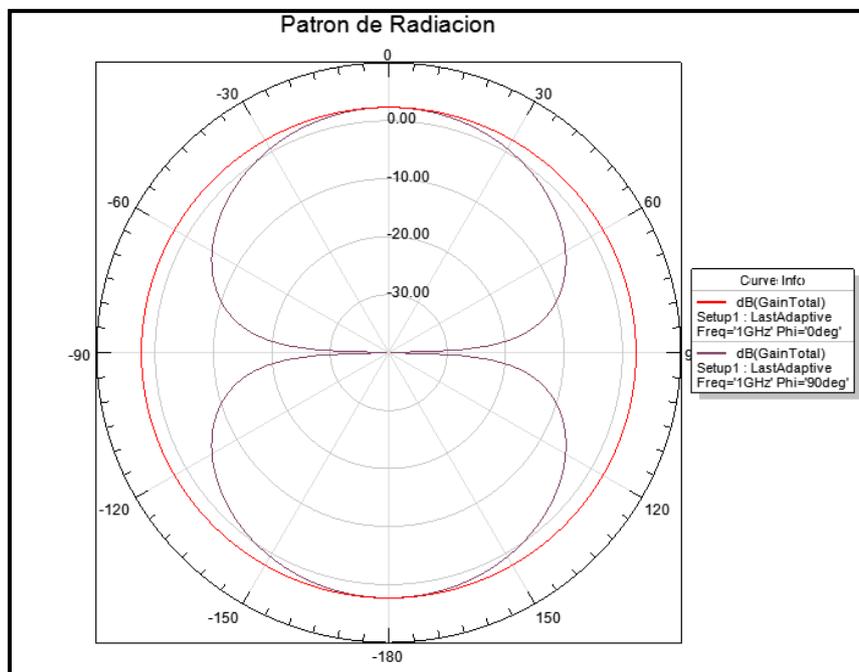


Figura 87. Patrón de radiación de la antena Dipolo planar a una frecuencia de 1 GHz.
Para 0 y 90 Phi

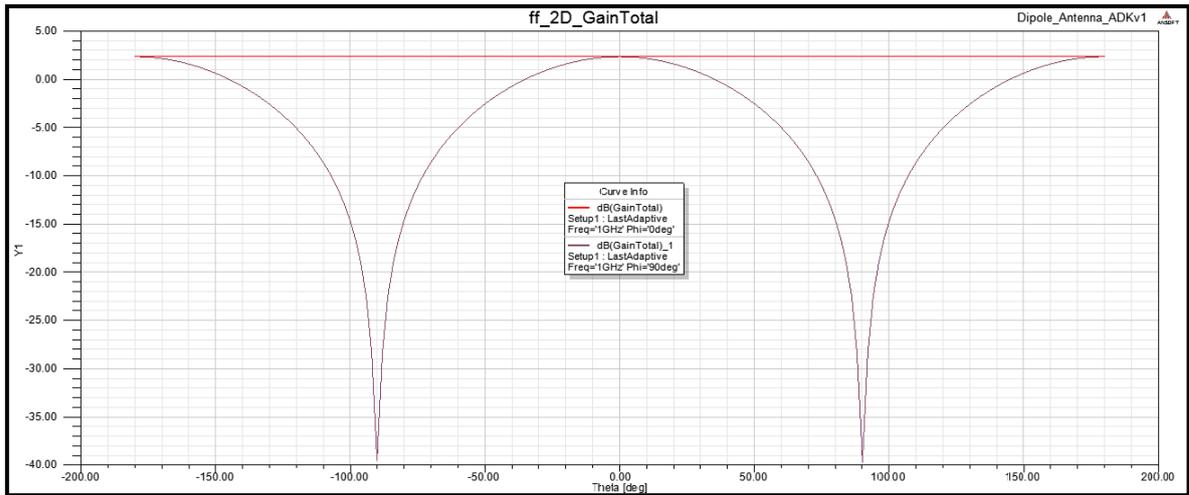


Figura 88. Ganancia de la antena Dipolo Planar en 2D. Para 0 y 90 Phi

Antena log-periódica

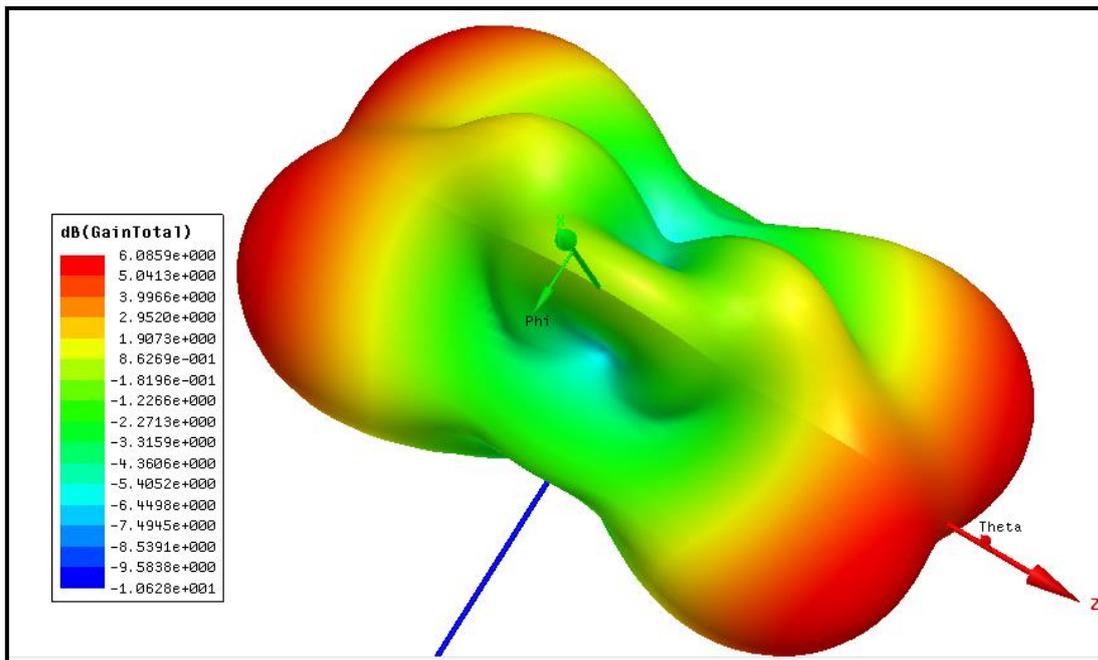


Figura 89. Patrón de radiación de la Log-periódica planar a una frecuencia de 1GHz GHz.

Gráfico polar en 3D

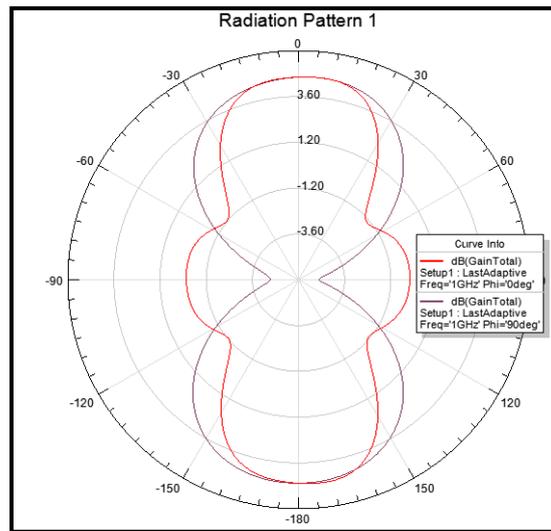


Figura 90. Patrón de radiación de la antena Log-periódica planar a una frecuencia de 1 GHz.
Para 0 y 90 Phi.

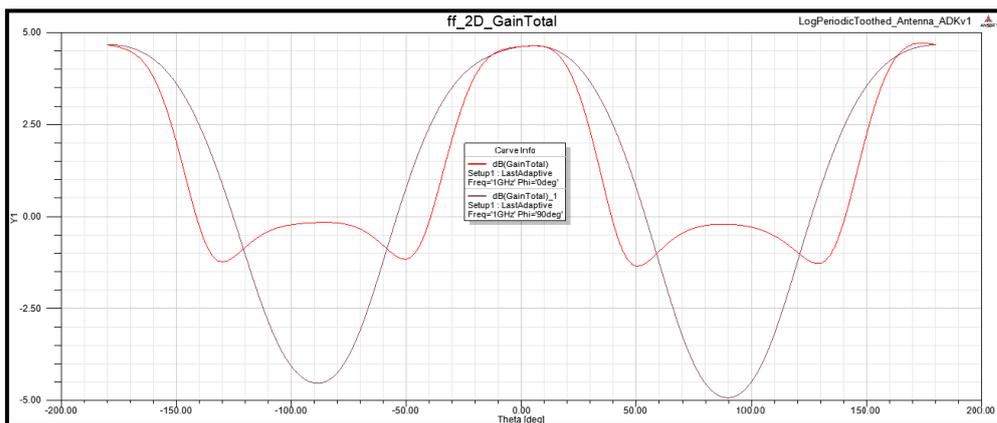


Figura 91. Ganancia de la antena Log-periódica planar a una frecuencia de 1 GHz en 2D.
Para 0 y 90 Phi

A continuación en la tabla 18 se muestra la información de los patrones de radiación de la propuesta 2.

Antena	Ganancia Máxima	Frecuencia de operación	Omnidireccionalidad
Dipolo	2.32 dB	1 GHz	SI
Log- periodica	6 dB	300MHz-1GHz	SI

Tabla 20. Resumen de las características de los patrones de radiación en la propuesta 2

6.1.3.3. Presentación del patrón de radiación de la antena propuesta 3

Antena Discónica

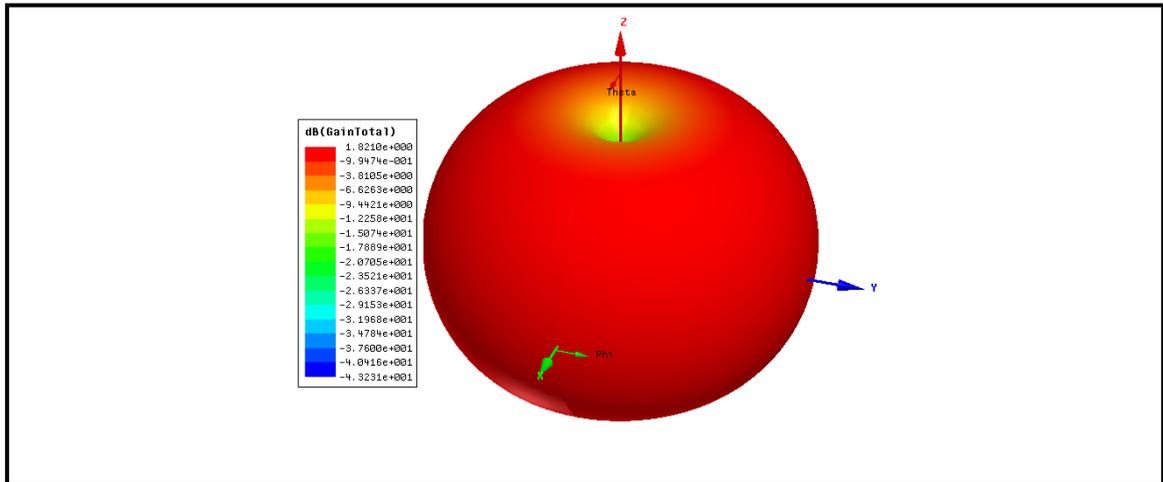


Figura 92. Patrón de radiación de la Antena Discónica a una frecuencia de 500 MHz. Gráfico polar en 3D

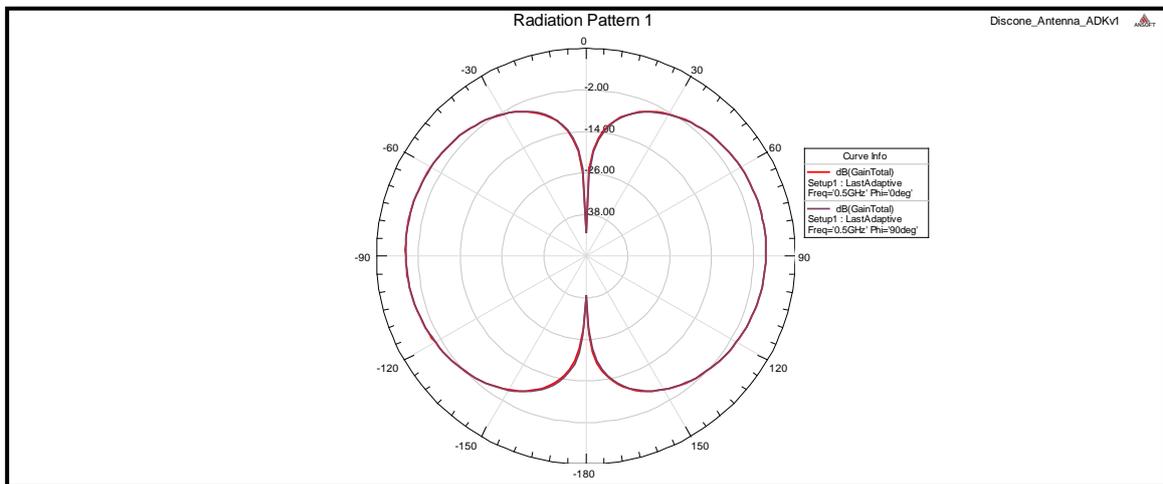


Figura 93. Patrón de radiación de la antena Discónica a una frecuencia de 500MHz. Para 0 y 90 Phi

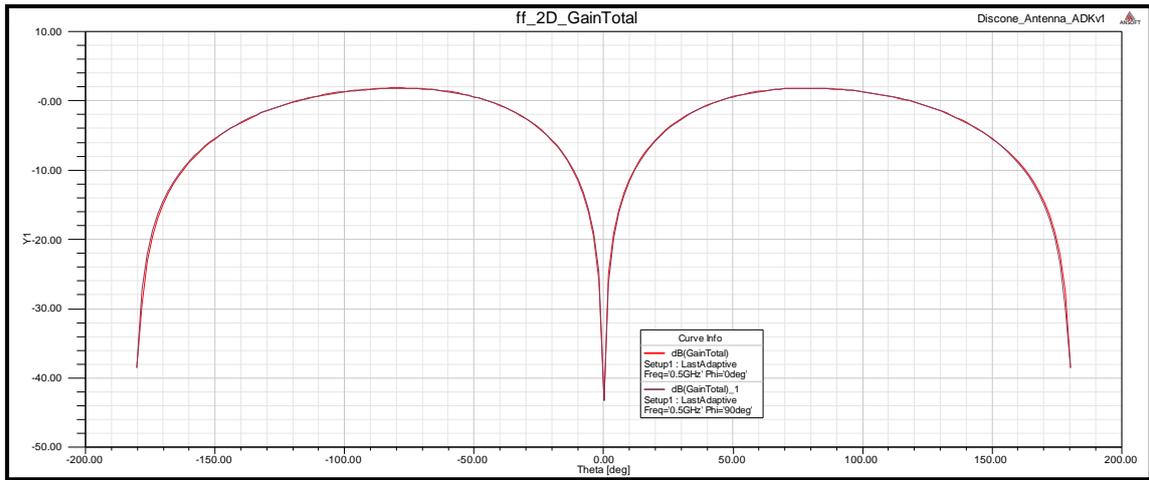


Figura 94. Ganancia de la antena Discónica a una frecuencia de 500 MHz en 2D. Para 0 y 90 Phi

A continuación se muestra la tabla 19 con el resumen de la información del patrón de radiación para la propuesta 3.

Antena	Ganancia Máxima	Frecuencia de operacion	Omnidireccionalidad
Disconica	1.82 dB	500 MHz	SI

Tabla 21. Resumen de las características de los patrones de radiación en la propuesta 3

7. DISCUSIÓN

En este capítulo se evaluará y discutirá los resultados arrojados por el simulador y que fueron mostrados en el apartado anterior. Los parámetros que se evaluaron en la presentación de resultados son la relación de onda estacionaria ROE, las pérdidas por retorno $S_{1,1}$, patrón de radiación, directividad y ganancia en las antenas, cuantificaciones importantes para determinar un diseño adecuado y óptimo para aplicaciones de radio cognitiva.

También se definirá la propuesta más adecuada para trabajar en sistemas cognitivos como el elemento radiante, aportando y sumando de esta manera a las investigaciones que se han venido efectuando en la carrera de Ingeniería en electrónica y Telecomunicaciones de la **Universidad Nacional de Loja**, en lo referentes a las redes cognitivas; mencionando que ya existe un análisis e identificación de los *White space* en la banda VHF/UHF en la ciudad de Loja, este tema de investigación lleva por nombre "IDENTIFICACIÓN DE WHITE SPACES EN LA BANDA VHF/UHF PARA LA FUTURA IMPLEMENTACIÓN DE REDES DE RADIO COGNITIVA EN LA CIUDAD LOJA", donde de acuerdo a los resultados deja en claro que "Existe una gran disponibilidad del espectro radioeléctrico dentro de las bandas evaluadas, confirmando de esta manera que técnicamente resulta factible la implementación de sistemas basados en radios cognitivas dentro de la ciudad de Loja"

Hay que tomar en cuenta que en los resultados obtenidos por el simulador son confiables, comportándose con leves variaciones en los diferentes ambientes de la realidad, para que de esta manera en proyectos futuros implementar estos elementos radiantes para redes cognitivas.

7.1. Relación de onda estacionaria

Como ya se mencionó en el capítulo 4.1, el ROE es muy importante al momento de evaluar el diseño de una antena y su comportamiento, ya que provee información de la efectividad en el acoplamiento que debe tener la línea de transmisión y la antena. El valor del ROE mínimo es 1, el cual representaría el caso ideal que indica que toda la potencia incidente es transmitida en forma de energía electromagnética y no existe onda reflejada hacia la fuente.

Al evaluar la relación de onda estacionaria en las tres propuestas bajo estudio, se notó principalmente la mejora de este parámetro al disponer las antenas en forma de arreglo.

- La propuesta 1 (Arreglo de antenas rectangulares), muestra que para la frecuencia de 645 MHz, el mejor ROE tiene con un valor de 1.88 dB, con potencia directa igual al 100% donde el valor de potencia reflejada hacia el transmisor del 5%; valor admisible únicamente para un valor de frecuencia fijo. Para las demás frecuencias el ROE sale del rango admisible, por lo tanto para las consideraciones de los sistemas de radio cognitiva el arreglo no cumple con este requerimiento.
- Para la propuesta 2; la capacidad de operación multibanda de la antena genera variaciones de la relación de onda estacionaria; cuyos valores son relativamente similares. Esta señal se comporta ofreciendo valores de ROE admisibles para diferentes frecuencias dentro del rango requerido en este proyecto; es decir la antena trabajaría con mejores prestaciones para las frecuencias de 416 MHz, 500MHz, 576MHz, 875 MHz, 1GHz que según las consideraciones de radio cognitiva ya representa un rango de espectro electromagnético tentativo para su funcionamiento.
- La propuesta 3, supera considerablemente las condiciones de la relación de onda estacionaria frente a las otras propuestas, brindándonos además un ancho de banda considerable primordial para sistema de radio definida por software.

7.2. Pérdidas por retorno

Al analizar las pérdidas de retorno de las propuestas bajo estudio y tomando en cuenta que están directamente relacionadas con la relación de onda estacionaria, se nota que los resultados obtenidos son similares. Como ya se mencionó, las pérdidas de retorno varían entre 0 y $-\infty$ dB, donde $-\infty$ sería el comportamiento ideal, el cual se da cuando la línea y la antena están perfectamente acopladas ($ROE=1$). Idealmente, para valores de ROE igual a 1 el valor de pérdidas por retorno le corresponden a $-\infty$ y por otro lado para valores de ROE iguales a 3 dB, el valor de pérdidas por retorno serán iguales a -6 dB. Un ROE igual a uno radia el 100%, un ROE igual a 2 el 89% y un ROE igual a 3 el 75.1 %.

Como se puede notar en la propuesta 1, se presenta un valor de pérdidas por retorno de -19.34 dB para la frecuencia de 645 MHz. Este valor es aceptable, pero con un ancho de banda mínimo y poco funcional para frecuencias distintas a la de resonancia.

En la propuesta 2 se nota claramente un mejoramiento, donde casi toda la señal está por debajo de los -8 dB, o sea que encuentra dentro del rango admisible para evitar elevada potencia reflejada hacia el transmisor. Este caso de análisis cubriría considerablemente el ancho de banda requerido para los sistemas de radio cognitivo.

La propuesta 3 al igual que en la propuesta dos, alcanza a cubrir un gran ancho de banda que oscila entre los 250 MHz hasta 1100 MHz, cubriendo un considerable rango espectral para los propósitos de los sistemas de RC.

7.3. Patrón de Radiación

El patrón de radiación de la propuesta 1, muestra cierta direccionalidad en la dirección z para la frecuencia de operación de 650 MHz, pero si se la ve desde phi igual a 90 grados, toma la forma de omnidireccional, que la denominaremos en este caso medianamente omnidireccional. Esta propuesta de arreglo llega a tener una ganancia de 10 dB, que es una elevada ganancia y por ende el motivo de que no tienda a ser del todo omnidireccional, sino más directiva.

En la propuesta 2, para la antena log- periódica, esta alcanza una buena ganancia de 6 dB, tiende a ser más omnidireccional que la propuesta anterior, el cual se nota mas claramente en la figura polar para este caso. Al igual que en la propuesta 1, se presenta lóbulos secundarios en la diagrama de radiación.

La propuesta 3, tiene un patrón de radiación completamente omnidireccional y por ende tendrá una ganancia menor que la propuesta anteriores, el cual su valor es de 1.82 dB de ganancia. Este es el patrón de radiación perfecto para darle aplicación sobre una estación base dentro de un sistema de radio cognitiva.

En la tabla 22 se muestra la comparación de los diagramas de radiación para las tres propuestas.

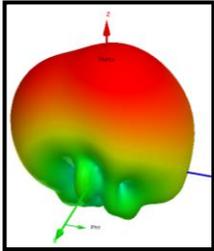
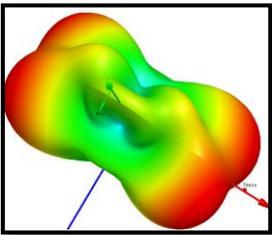
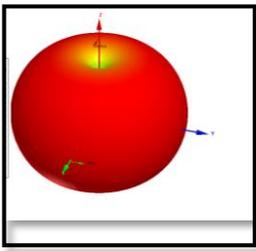
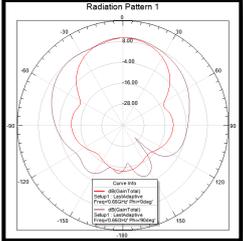
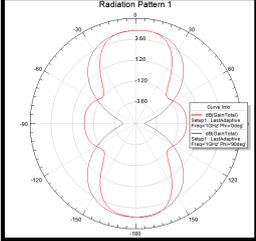
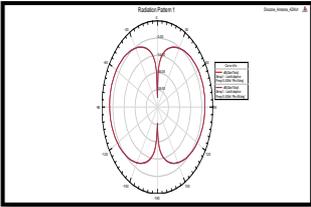
Tipo de Propuesta	Arreglo Rectangular	Antena Log-Periódica	Antena Discónica
Patrón de radiación			
Patrón de radiación polar			
Ganancia	10 dB	6 dB	1.82 dB
Omnidireccionalidad	NO	Medianamente	SI

Tabla 22. Comparación de los diagramas de radiación de las tres propuestas

Una vez finalizado el análisis y discusión de las propuestas radiantes se procede a presentar en las tablas 23, 24, 25 un resumen con los valores mas relevantes de los parámetros de radiación que se analizaron a cada una de las propuestas para cada frecuencia de operación.

Frecuencia 650 MHz	
Parámetro	Arreglo rectangular
Perdidas por retorno	-19.34 dB
ROE	1.88 dB
Ganancia	10 dB
Ancho de Banda	Relativamente angosto (10 MHz)
Patrón de Radiación	Directivo

Tabla 23. Resumen de los parámetros de radiación para el Arreglo Rectangular

Frecuencia 300MHz-1GHz	
Parámetro	Antena Log-periódica
Perdidas por retorno	Variable entre -8 dB a -33 dB para distintas frecuencias dentro del rango de TV
ROE	1.27dB, 2dB, 3dB (en el rango de frecuencias de TV)
Ganancia	6 dB
Ancho de Banda	788 MHz
Patrón de Radiación	Medianamente Omnidireccional

Tabla 24. Resumen de los parámetros de radiación para la Antena Log-periódica

Frecuencia 500 MHz	
Parámetro	Antena Discónica
Perdidas por retorno	Variable entre -8 dB a -23 dB para distintas frecuencias dentro del rango de TV
ROE	Oscilando entre 2.3 dB y 1.2 dB (en el rango de frecuencias de TV)
Ganancia	1.82 dB
Ancho de Banda	800 MHz
Patrón de Radiación	Omnidireccional

Tabla 25. Resumen de los parámetros de radiación para la antena Discónica

En la tabla 26, se hace una comparación de los parámetros de radiación analizados, con el objetivo de escoger la propuesta que mejor se adapte a los sistemas de radio cognitiva. Es por eso que la propuesta que cumple con los objetivos del presente trabajo es la antena **Discónica**.

Parámetro	Arreglo Rectangular	Antena Log-periódica	Antena Discónica
Perdidas por retorno	-19.34	Variable entre -8 dB a -33 dB para distintas frecuencias dentro del rango de TV	Variable entre -8 dB a -23 dB para distintas frecuencias dentro del rango de TV
ROE	1.88 dB	1.27dB, 2dB, 3dB (en el rango de frecuencias de TV)	Oscilando entre 2.3 dB y 1.2 dB (en el rango de frecuencias de TV)
Ganancia	10 dB	6 dB	1.82 dB
Ancho de banda	10 MHz	788 MHz	800 MHz

Tabla 26. Resumen General de los parámetros de radiación para las tres propuestas radiante

8. CONCLUSIONES

- ✚ Desde el punto de vista técnico y basado en los parámetros de Relación de Onda Estacionaria, pérdidas de retorno, ancho de banda, ganancia y directividad; el diseño basado en una solución radiante Discónica se presenta como opción y recurso de mayor eficiencia para aplicaciones dentro de una red de Radio Cognitiva.
- ✚ Este proyecto sirve como aportación a diferentes estudios realizados dentro de los sistemas de radio cognitiva, complementando de esta manera su campo de estudio y aplicabilidad.
- ✚ De acuerdo a la investigación realizada, en el mercado de telecomunicaciones se han desarrollado escasas soluciones técnicas de antenas para aplicaciones en Redes de radio cognitiva. Esto es derivado de una investigación aún incompleta e inconclusa que permita su implementación masiva.
- ✚ Los estudios técnicos realizados previamente, donde se evidencia el bajo uso y subutilización del espectro radioeléctrico, con altos porcentajes de desocupación fundamentalmente en el rango de frecuencias de TV (53 MHz-1GHz) dentro de los sectores rurales del Ecuador han generado la realización del presente proyecto de titulación como un aporte a las mejoras tecnológicas para la penetración de los servicios de telecomunicaciones.
- ✚ Las tres propuestas de antenas aquí expuestas se realizaron en base a frecuencias dentro del rango de la banda de TV, esto, con el fin de poder disponer de una antena como hardware partícipe de un sistema cognitivo, el cual pueda manejar las bandas subutilizadas para ofrecer diversos servicios de telecomunicaciones a sectores marginados principalmente. Además, las propuestas de diseño se basaron en el estándar IEEE 802.22 WRAN donde define que el rango de trabajo de los sistemas de radio cognitiva sea la banda de TV, que es el grupo de frecuencias en donde hay mayor desperdicio espectral.

- ✚ Los diferentes parámetros de transmisión como son ancho de banda AB, perdidas por reflexión, relación de onda estacionaria ROE, ganancia y patrón de radiación, hacen posible definir la aplicación más adecuada para las antenas. Así en este proyecto se construyó tres propuesta de antenas, en la que los parámetros se adapten a los requerimientos de sistemas de radio cognitiva.

- ✚ Esta investigación deja un notable trabajo de estudio futuro, donde se podrían alcanzar mejores prestaciones para las entenas en RC derivadas del uso de nuevos o mejores materiales de construcción y las constantes posibilidades de miniaturización.

- ✚ Este proyecto presenta los resultados de los parámetros de funcionamiento de antenas operando en el rango de 54 MHz a 964 MHz, intervalo adoptado para el cumplimiento del estándar IEEE 802.22. Esto apertura la posibilidad de nuevos diseños de antenas que puedan cubrir otros rangos de frecuencia del espectro radioeléctrico donde se podrían incorporar nuevos servicios de telecomunicaciones.

- ✚ Los diferentes estudios que anteceden este trabajo referidos a la ocupación y desocupación del espectro radioeléctrico dentro del cantón Loja; más los resultados aquí obtenidos contribuyen ampliamente a las posibilidades de establecer redes o arquitecturas de radio cognitiva dentro de nuestro medio; la subutilización del espectro es evidente y la demanda del consumo de ancho de banda amerita lo antes indicado.

9. RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar diseños de antenas que estén en la capacidad de acoplarse a los sistemas de radio cognitiva dentro de otro rango de frecuencias, con el fin de reutilizar de forma óptima el espectro subutilizado.
- ✚ Usar software de simulación con la misma confiabilidad que presenta el HFSS pero que contenga mayor velocidad para el procesamiento de datos y entrega de resultados, ya que el software usado en este estudio presentó retardos de procesamiento elevados al momento de analizar o simular las diferentes antenas diseñadas.
- ✚ Los diferentes estudios realizados sobre la disponibilidad del espectro radioeléctrico en la provincia de Loja para sistemas de radio cognitiva brindan sustentable información referida a este tema por lo tanto es recomendable para trabajos posteriores, desarrollar implementaciones de antenas o arreglos de antenas que permitan ir conformando un sistema completo de Radio Cognitiva y basados en el estándar IEEE 802.22 WRAN.
- ✚ Las diferentes ventajas y potencialidades que presentan los sistemas de radio cognitiva nos obligan a proponer y buscar los sitios adecuados para el desarrollo de esta infraestructura; por lo tanto el reto para posteriores estudios radica en el despliegue de este tipo de infraestructura en función de las necesidades de uso espectral de las diferentes poblaciones de la región y con mayor énfasis en los sitios rurales menos servidos.
- ✚ La mayor parte de las simulaciones de antenas impresas se las realiza sobre un sustrato de muy buenas características eléctricas, el cual no afecta las propiedades de las antenas, ya que este materia no presenta variaciones como respuesta a las fluctuaciones de corriente sobre la misma, es por eso que se recomienda utilizar el sustrato aplicado para las propuesta que lo requirieron denominado RT – DUROID 5880

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. IEEE. (2002). Standard Definitions of Terms for Antennas, Std 145-1983, Revision of ANSI/IEEE Std 145-1973
- [2].
- Hickman, I. (1995). *Manual Practico de radiofrecuencia*. Madrid: Paraninfo.
- [3]. Anguera, J., & Perez, A. (2008). *Teoría de Antenas*. España.
- [4]. D. Kraus, J. (1988). *Antennas for applications*. New York.
- [5]. Cardama, A. (2002). *Antenas*. Madrid.
- [6] Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory*. New Jersey: Hoboken.
- [7] Fernández, F., & Lima, L. (2013). *Diseño de una antena de UBW para aplicaciones de RC*. Mexico.
- [8] Flickenger, R. (2013). *Redes inalámbricas en los países en desarrollo*. Limehouse Book Sprint Team.
- [9] ANSYS. (2016). *ANSYS HFSS*. Recuperado el 14 de Mayo de 2016, de ANSYS HFSS: <http://www.ansys.com/es-ES/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>
- [10] *PCB Design, Analisis y Package*. (06 de 09 de 2016). Recuperado el 20 de 05 de 2016, de <http://www.zeland.com/>
- [11] UIT. (2008). *Reglamento de las Radiocomunicaciones*. New York.
- [12] FCC. (2002). *Spectrum Policy Task Force Report*. ET Docket .
- [13] D. Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen. (2004). Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios. in : Proc. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers.
- [14] A. Petrin, P.G. Steffes. (2004). Measurement and Analysis of Urban Spectrum Usage, in: Proc. Of the 2004 International Symposium on Advanced Radio Technologies NTIA Special Publication SP-04- 409, 2004.
- [15] FCC. (2003). Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies. ET Docket No. 03 108.
- [16] FCC, (2005) ET Docket No. 03-108.

- [17] S. Haykin. (2010). Cognitive Radio: brain-empowered wireless communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 23.
- [19] Y. Yuan, et al. (2007) KNOWS: Cognitive Networking Over White Spaces. En: Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007).
- [20] J Mitola. (1992) The Software Radio., IEEE National Telesystems Conference, 1992 - Digital Object Identifier 10.1109/ NTC.1992.267870.
- [21] J. Zhao, H. Zheng, & G. Yang. (2007). *Spectrum Sharing Through Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Access Network*. Japon.
- [22] Twain, K. (2002). *WiproSDRadio.pdf*. En línea, en BroadcastPapers.com, <http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/WiproSDRadio.pdf>
- [23] <http://www.janes.com/articles/Janes-Military-Communications/AN-USC-61-Digital-Modular-Radio-DMR-United-States.html>
- [24] <http://www.eda.europa.eu/genericitem.aspx?area=28&id=588>
- [25] Company, N. I. (2013). *GNU Radio*. Recuperado el 17 de Agosto de 2016, de GNU Radio: <http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnuradio>
- [26] Company, N. I. (2016). *Ettus Research*. Recuperado el 25 de Agosto de 2016, de Ettus Research: <https://www.ettus.com/download>
- [27] Renteria Aguilar, J. H. (s.f.). *Radio Cognitiva- Estado del Arte*.
- [28] G, Thomas. (2010). *Telecommunications Law and Policy*.
- [29] Joseph Mitola, III. (1999). *Cognitive Radio for Flexible Multimedia Communications, Mobile Multimedia Communications. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop on,*
- [31] IEEE. (2016). *Standard Definitions and Concepts for Spectrum Management and Advanced Radio System Technologies*.
- [32] FCC. (2003). *Noticed of proposed Rulemaking*.
- [33] Nell, J. (s.f.). *The Role of the Game Theory in Analysis of Software Radio Networks*.
- [34] Bin, L., & Rondeau, T. (2014). *General Radio Interface Between Cognitive Algorithms and Reconfigurable Radio Platforms*. Recuperado el 10 de Agosto de 2016, de General Radio Interface Between Cognitive Algorithms and Reconfigurable Radio Platforms: tp://www.crtwireless.com/files/LeB_2.pdf

- [35] Technology, E. (2010). *Bureaus*. Recuperado el 12 de Junio de 2016, de Bureaus: http://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/cognitive_radio/fcc_cognitive_radio_fette_v8.ppt
- [36] MemberClicks. (2014). Wireless Innovation Forum. Recuperado el 22 de Mayo de 2016, de Wireless Innovation Forum: <http://www.wirelessinnovation.org/>
- [37] ITU, Z. 1. (1991). *Specification and Description Language*. Switzerland.
- [38] UNAM. (2010). *Implementación de la Radio Cognitiva*.
- [39] A. Milligan, T. (2005). *Modern Antenna Design*. New Jersey: Hoboken.
- [40] A. Balanis, C. (2008). *Modern Antena Handbook*. Canada.
- [41] ANSYS. (06 de Septiembre de 2016). *Ansoft HFSS*. Recuperado el Miercoles de Junio de 2016, de <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>.
- [42] finetune. (2004). *Online calculator - Synthesize/Analyze microstrip transmission line*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de Online calculator - Synthesize/Analyze microstrip transmission line: <http://www.finetune.co.jp/~lyuka/technote/ustrip/>
- [43] Corporacion, R. (2016). *Rogers Corporation*. Recuperado el 22 de Junio de 2016, de Rogers Corporation: <https://www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf>

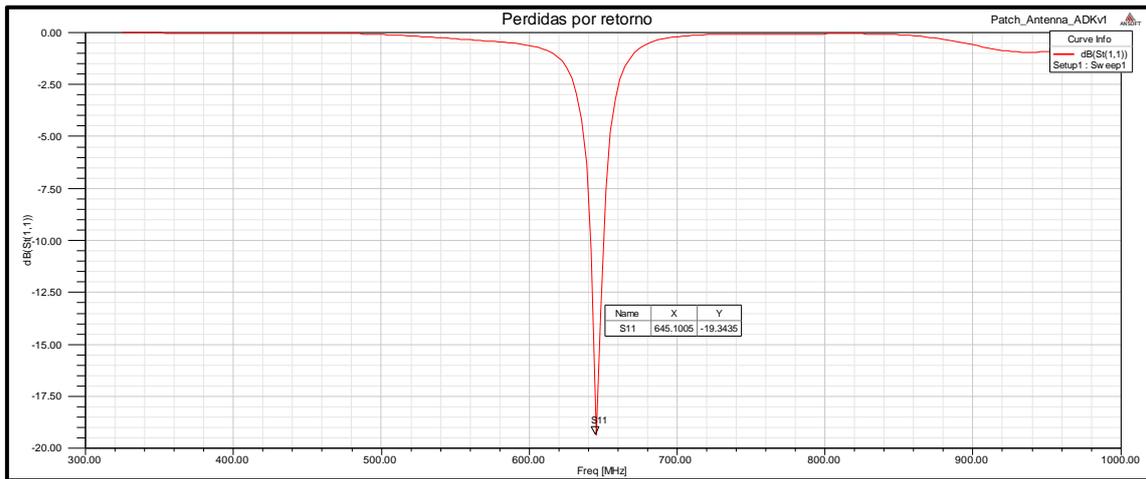
11. ANEXOS

ANEXO 1: SIMULACIONES DE LAS TRES PROPUESTAS A DISTINTAS FRECUENCIAS

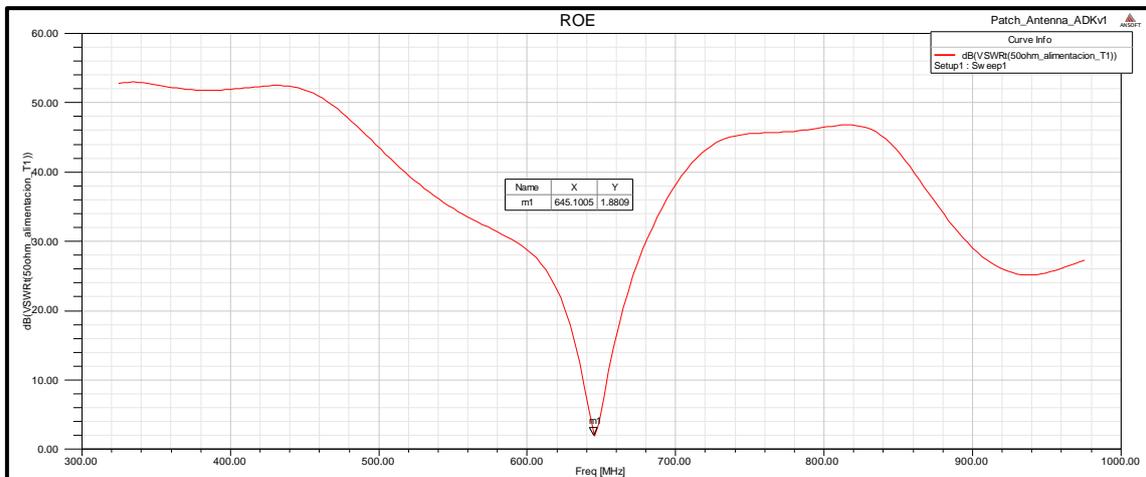
En las siguientes graficas se muestra los principales parámetros analizados con el software de simulación HFSS, de los cuales se pudo definir la propuesta que mejores características presentan, presentándolos así en el apartado de resultados en este documento.

PROPUESTA 1: ARREGLO DE ANTENAS RECTANGULARES TIPO PARCHE

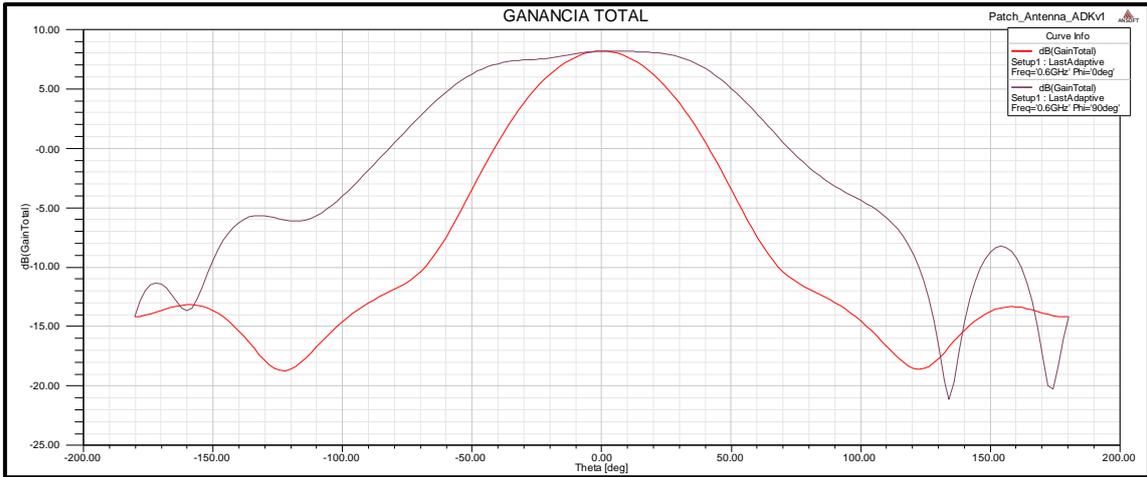
❖ F=600 MHz



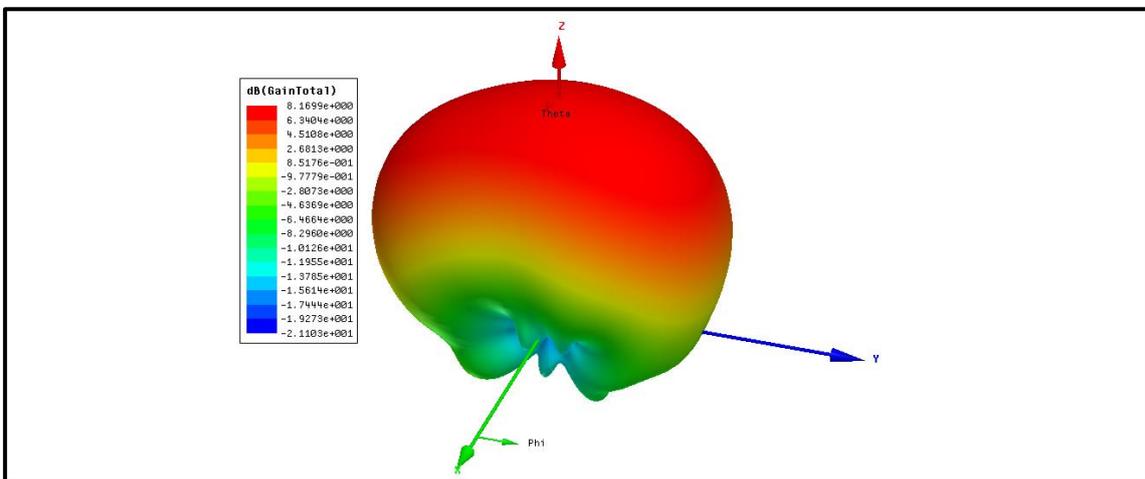
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE

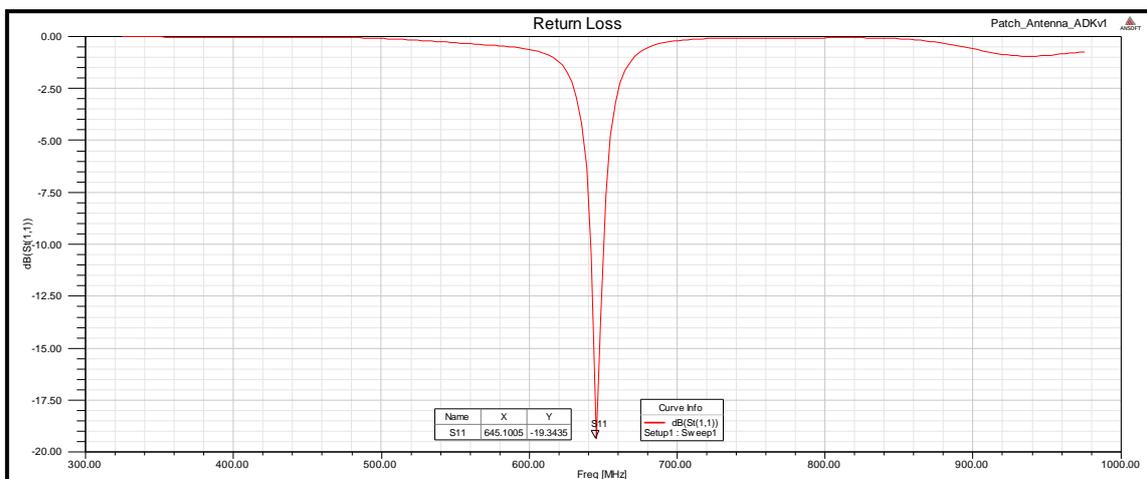


Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)

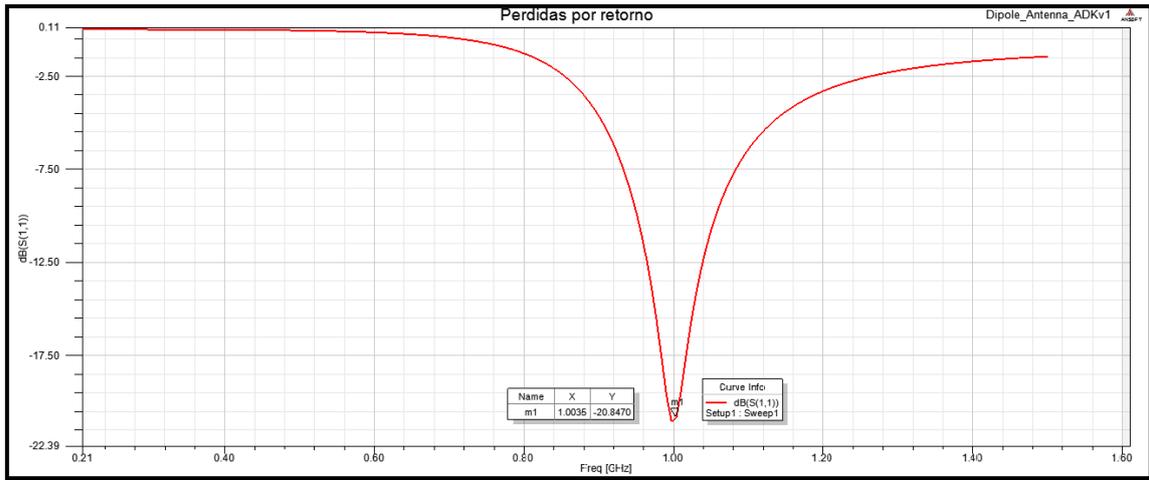


Patrón de radiación y Ganancia

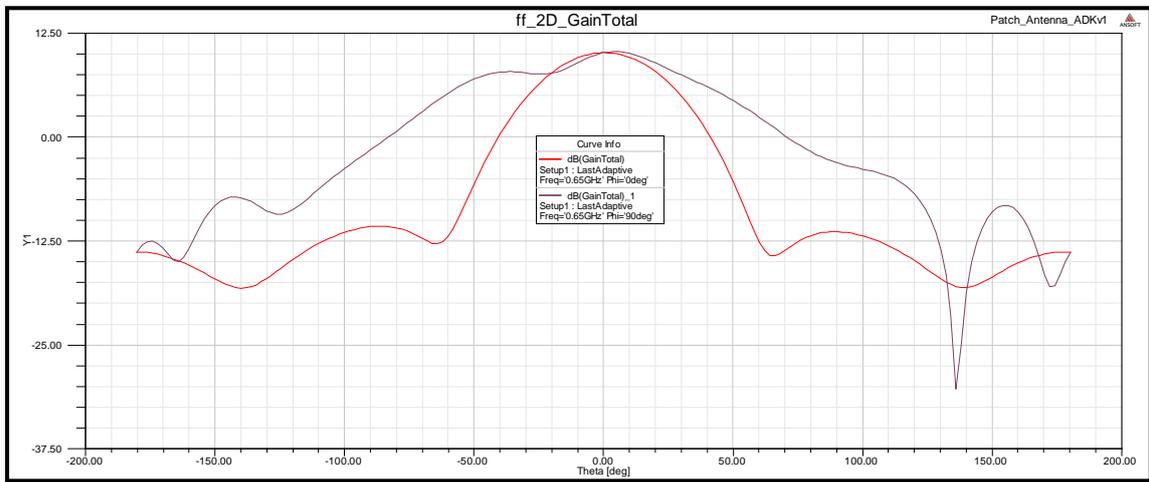
❖ F=650 MHz



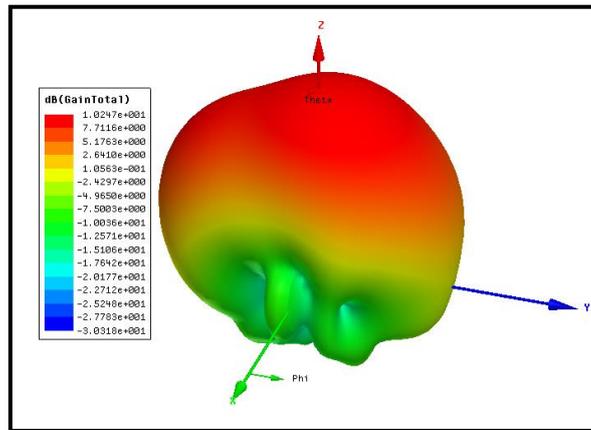
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE

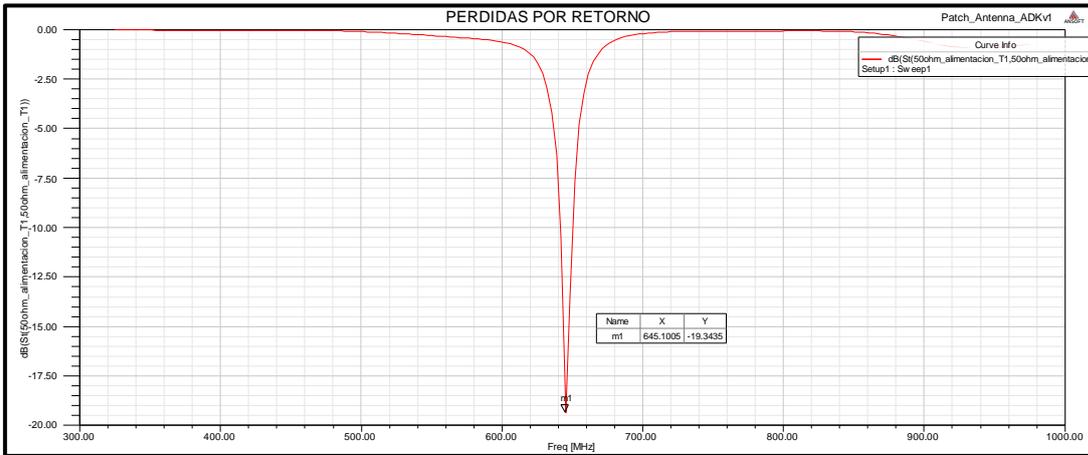


Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)

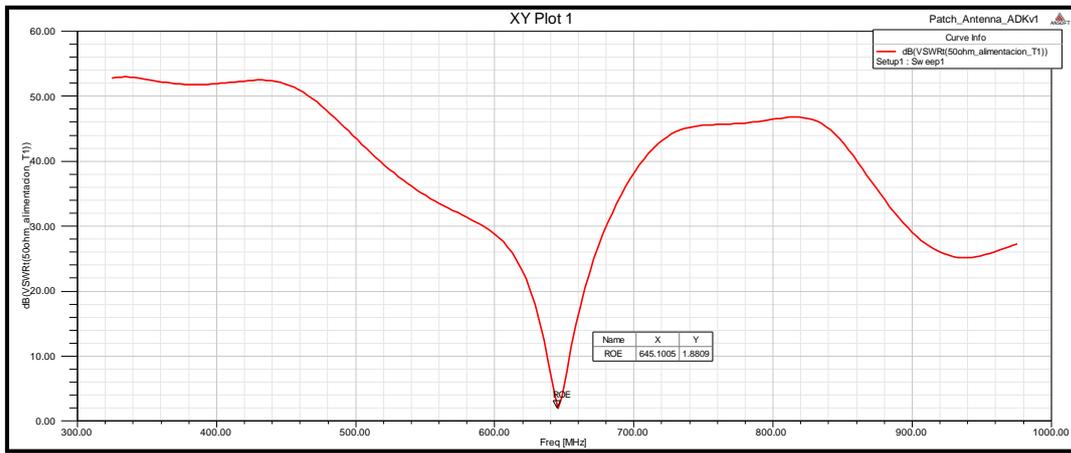


Patrón de radiación y Ganancia

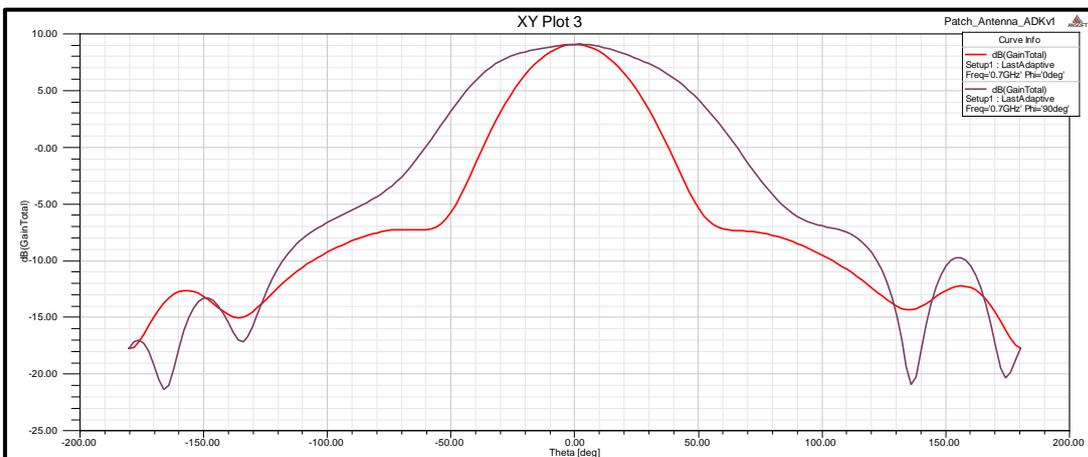
❖ F=700 MHz



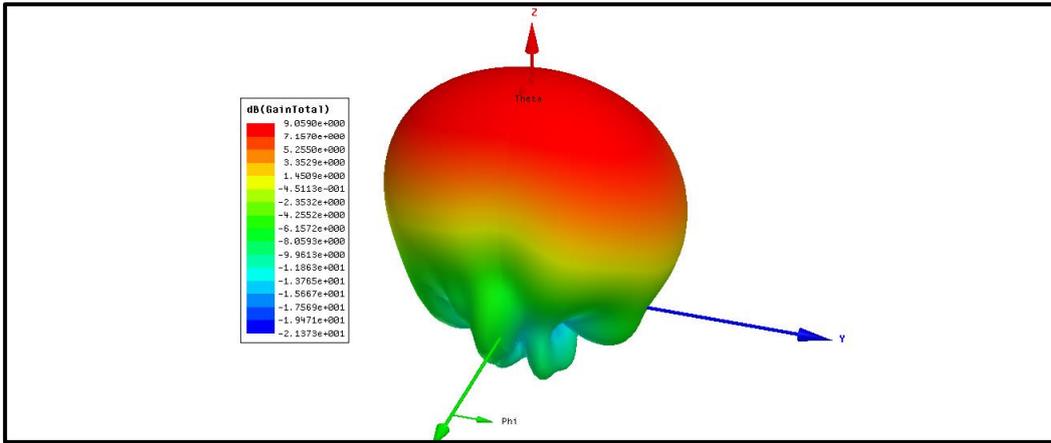
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE



Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)



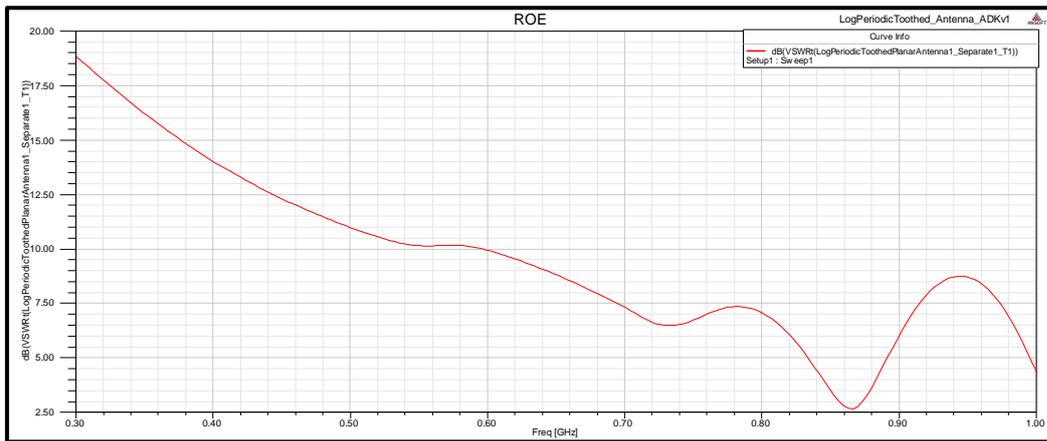
Patrón de radiación y Ganancia

PROPUESTA 2: ANTENA LOG-PERIÓDICA

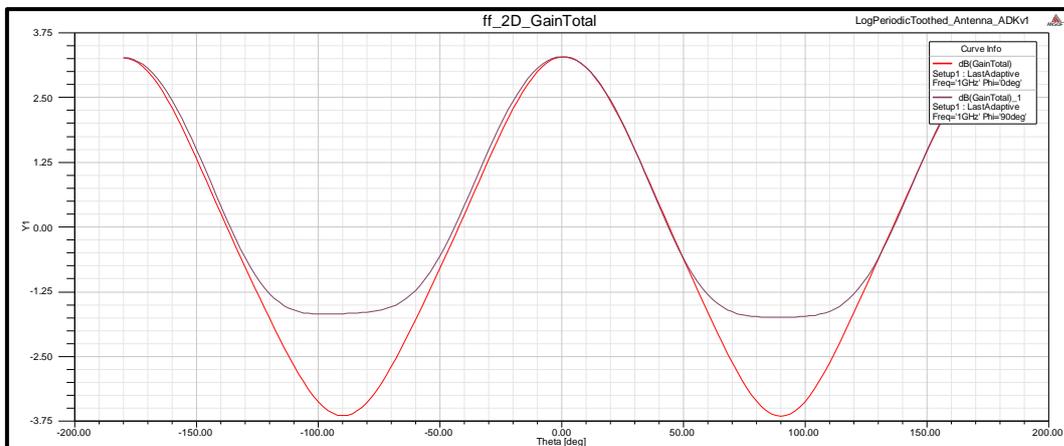
❖ F= 600 MHz – 1 GHz



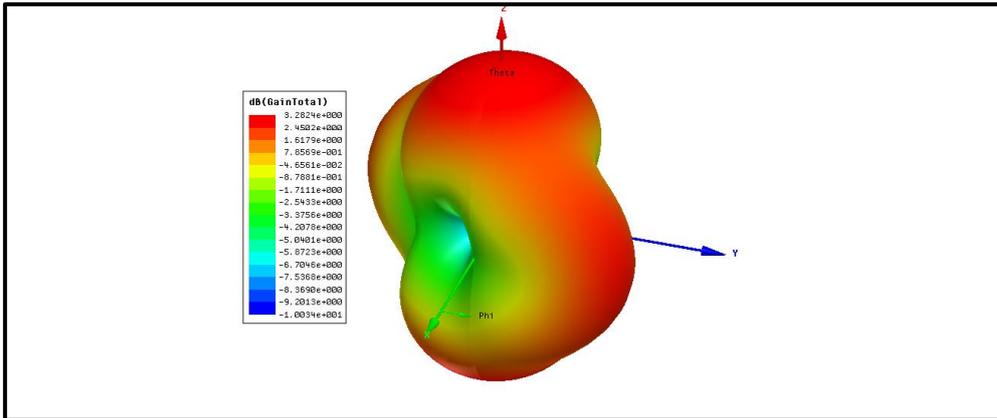
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE

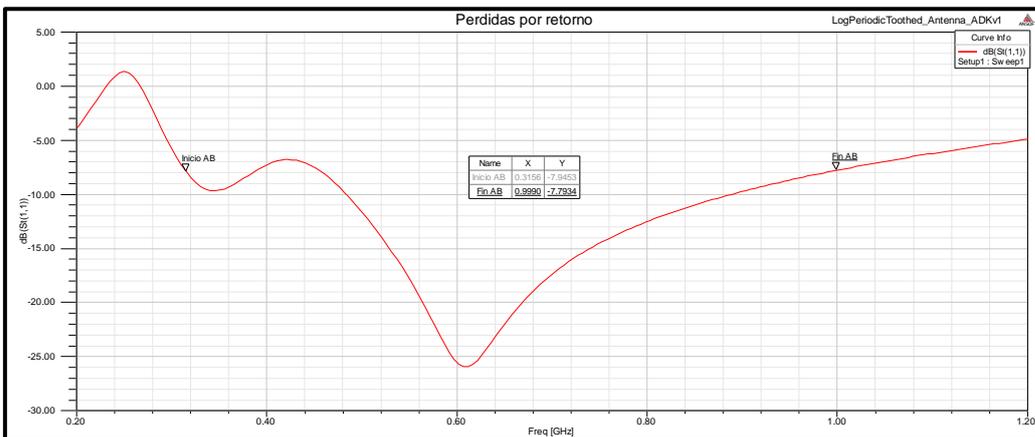


Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)

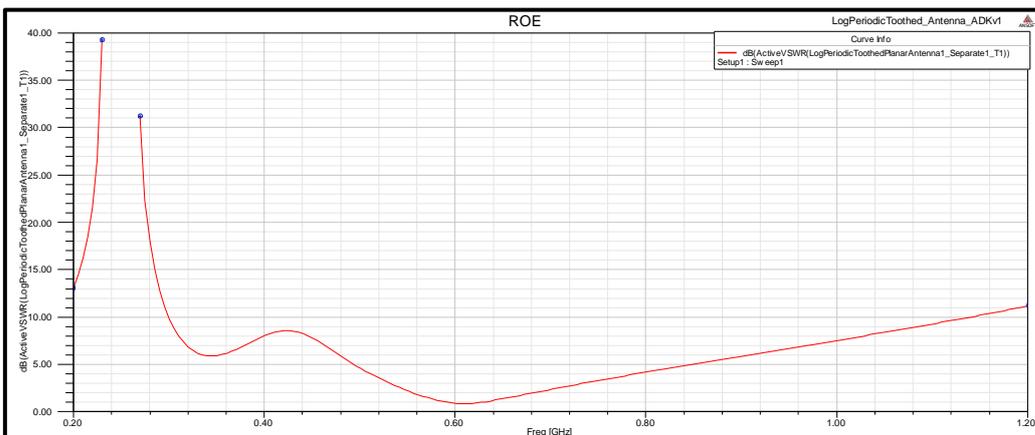


Patrón de radiación y Ganancia

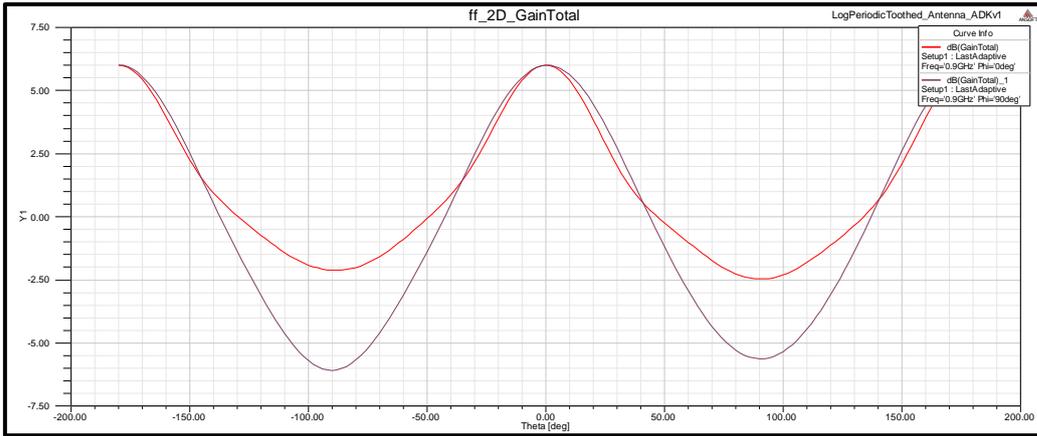
❖ **F=300 MHz – 900 MHz**



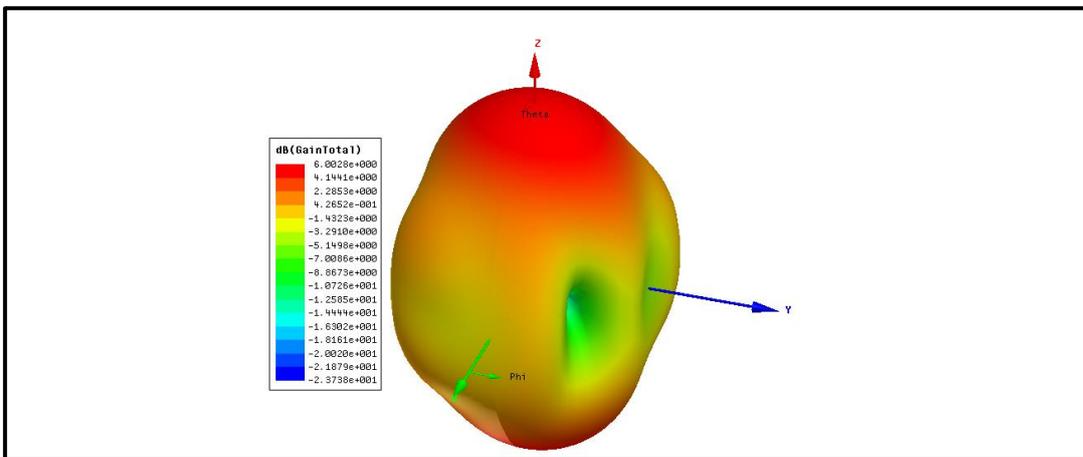
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE

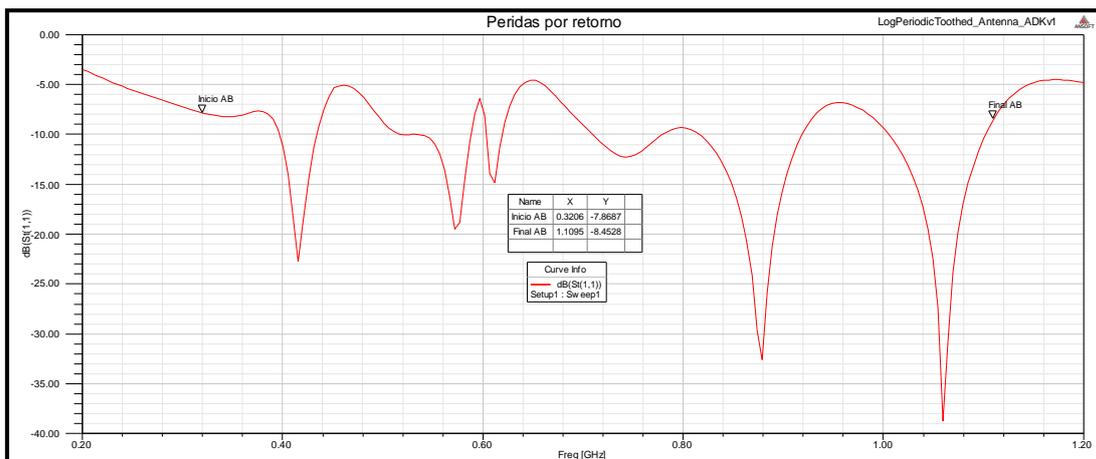


Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)

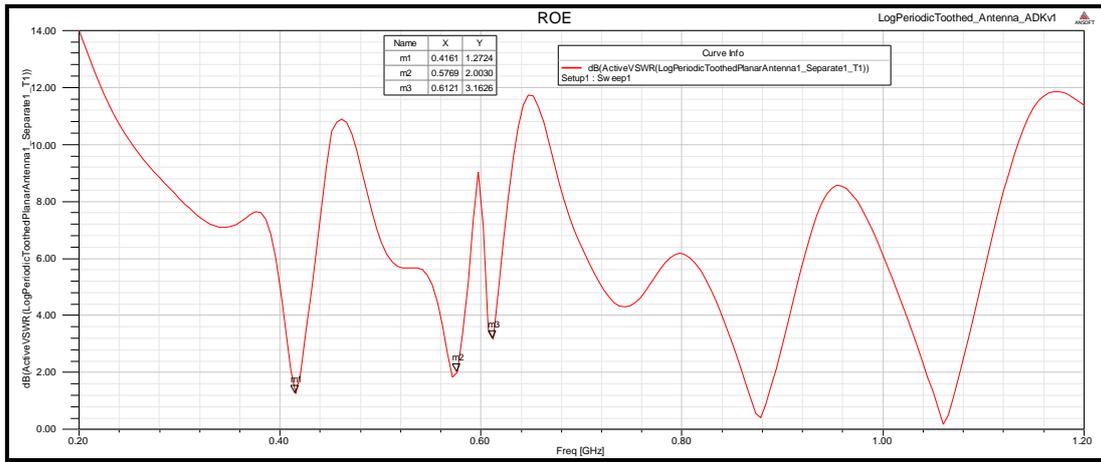


Patrón de radiación y Ganancia

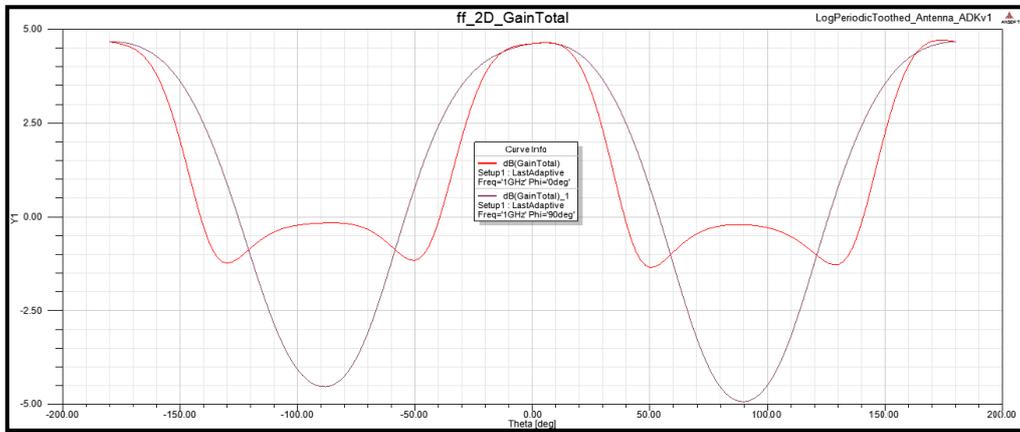
❖ F=300 MHz – 1 GHz



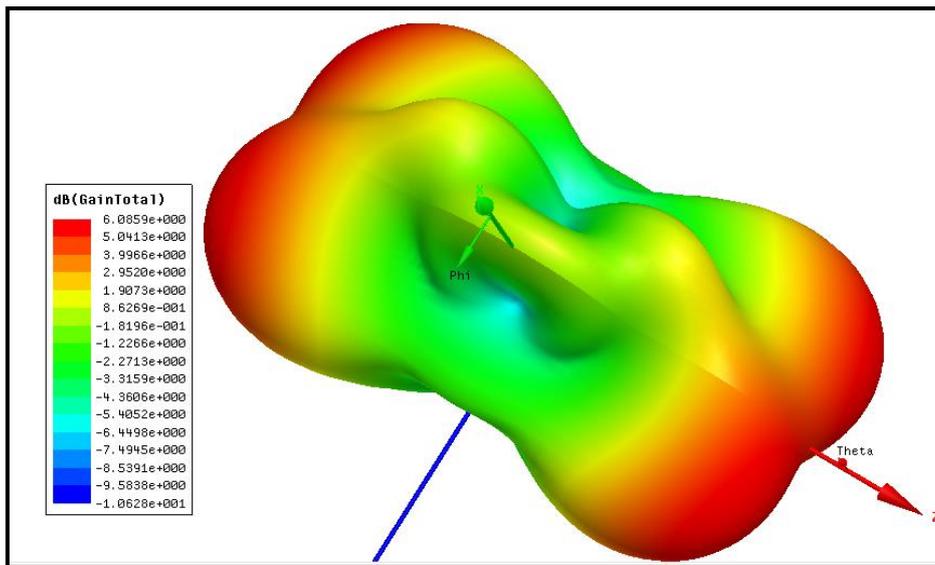
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE



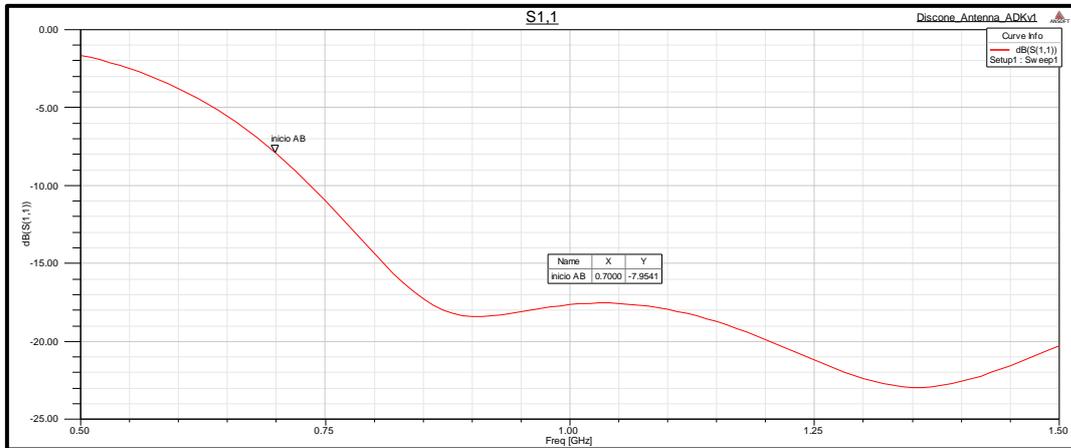
Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)



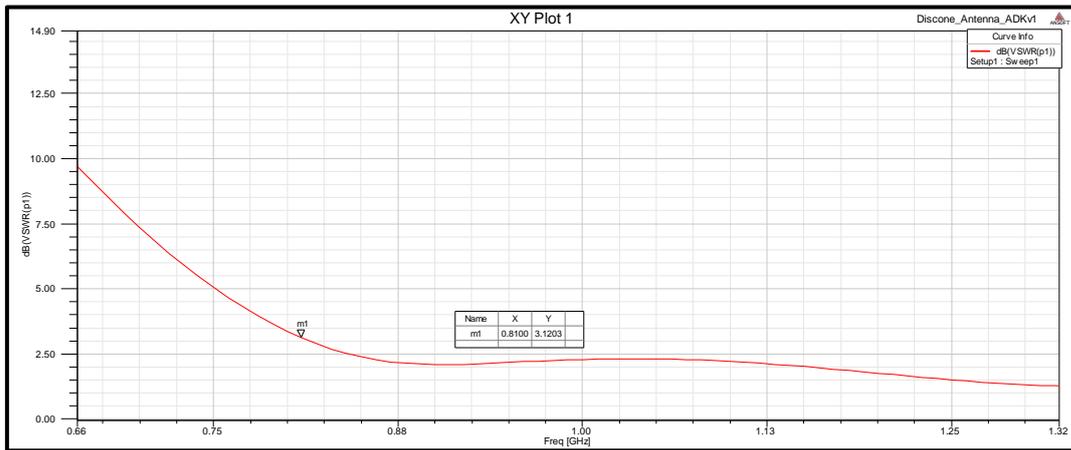
Patrón de radiación y Ganancia

PROPUESTA 3: ANTENA DISCÓNICA

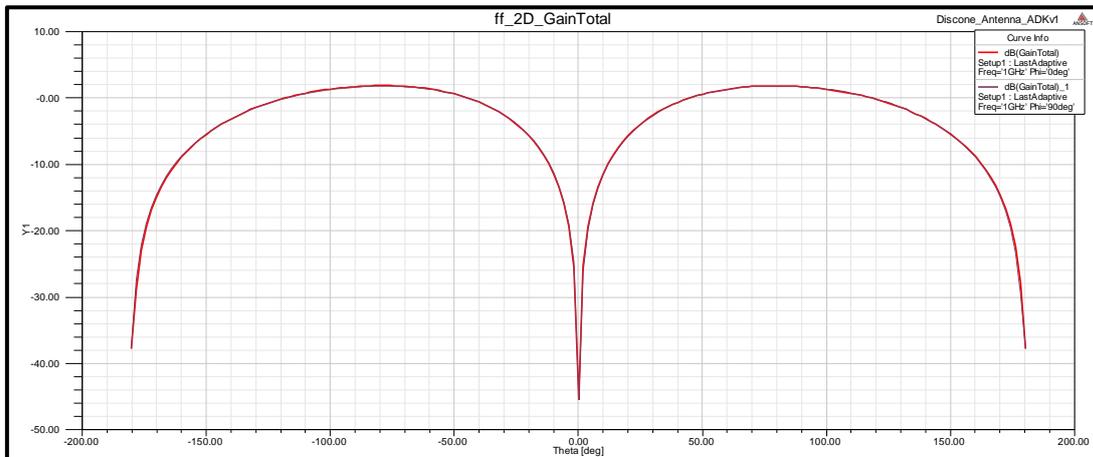
❖ F= 1GHz



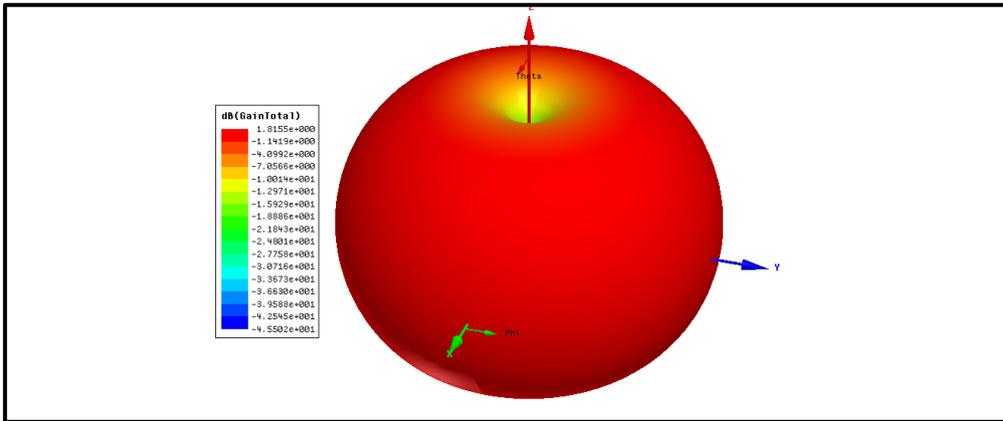
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE

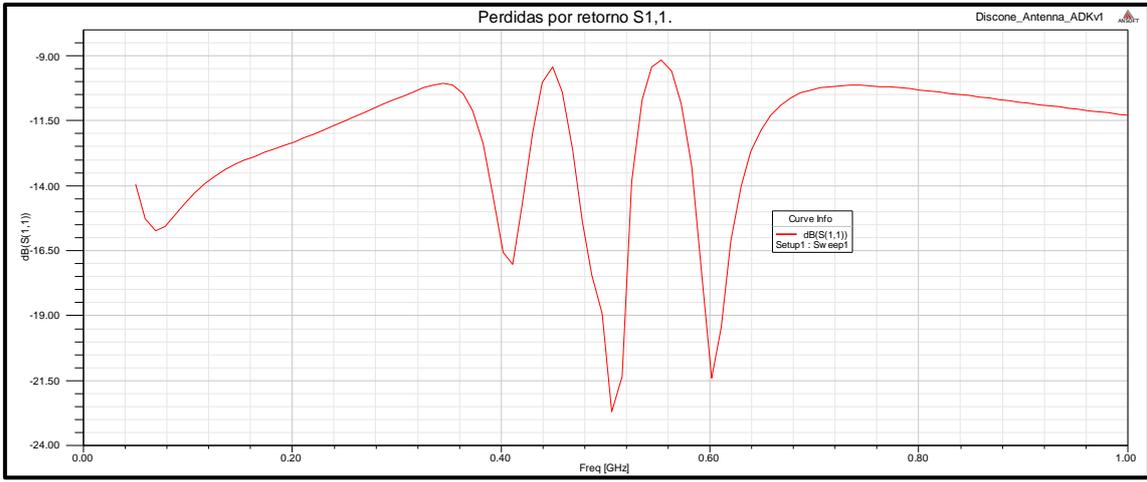


Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)

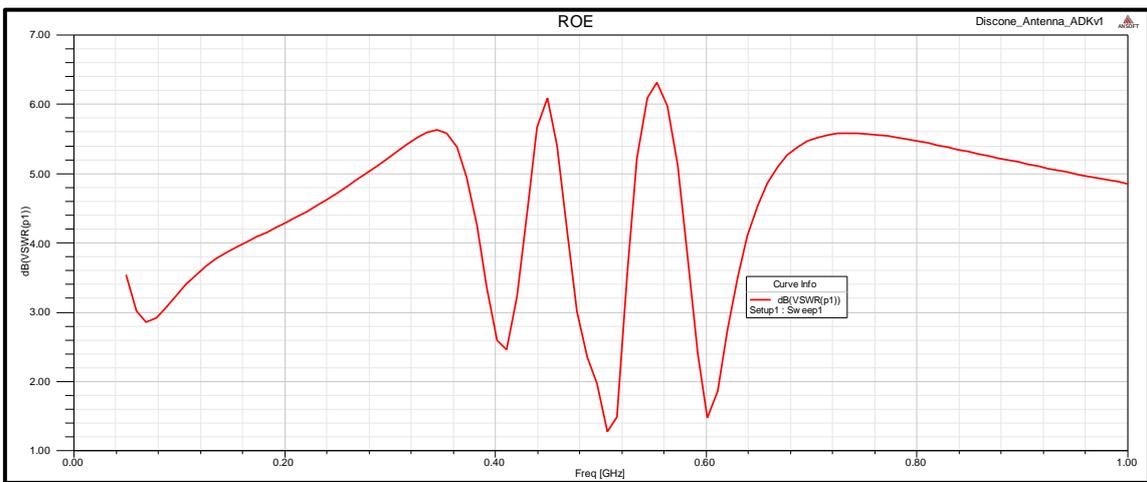


Patrón de radiación y Ganancia

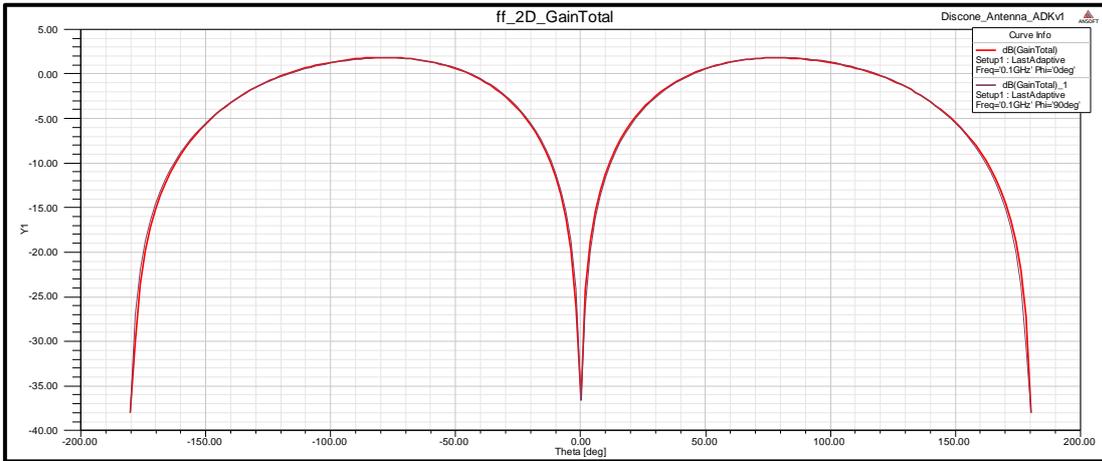
❖ **F=100 MHz**



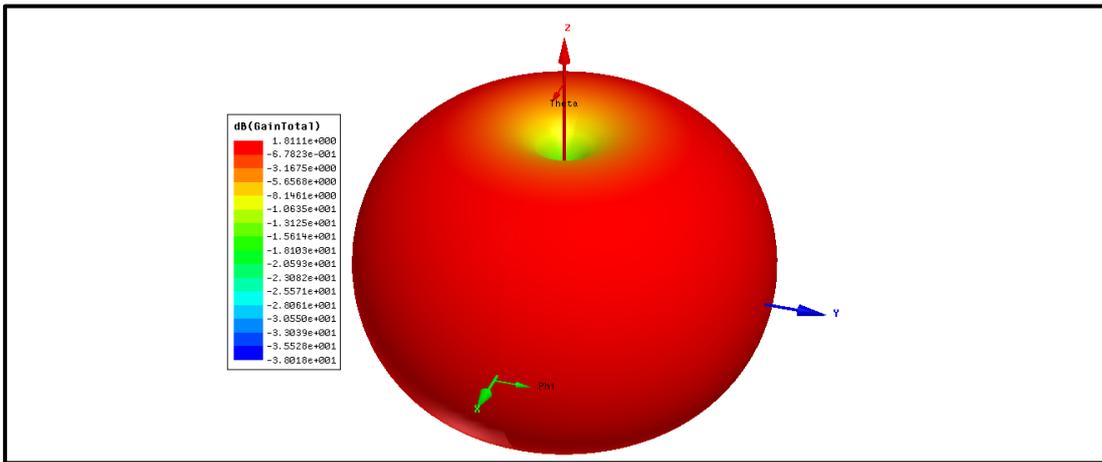
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE

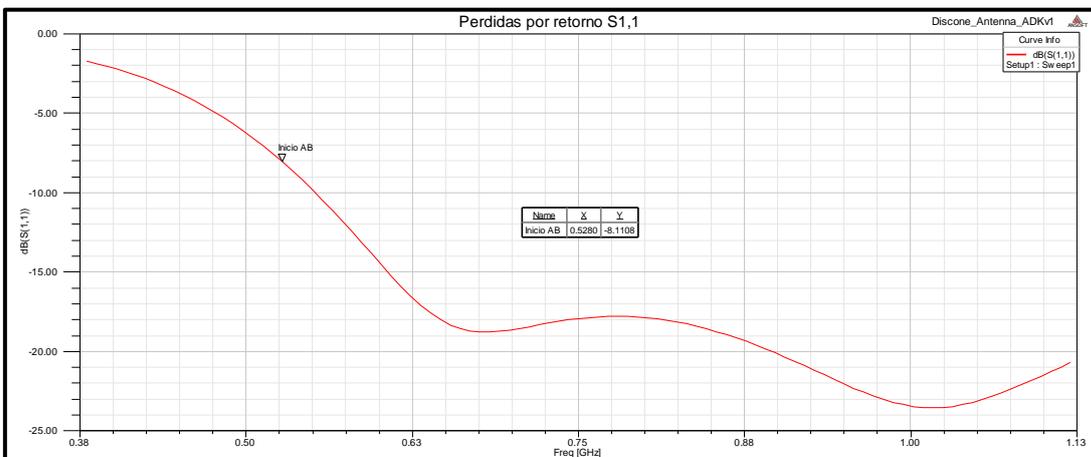


Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)

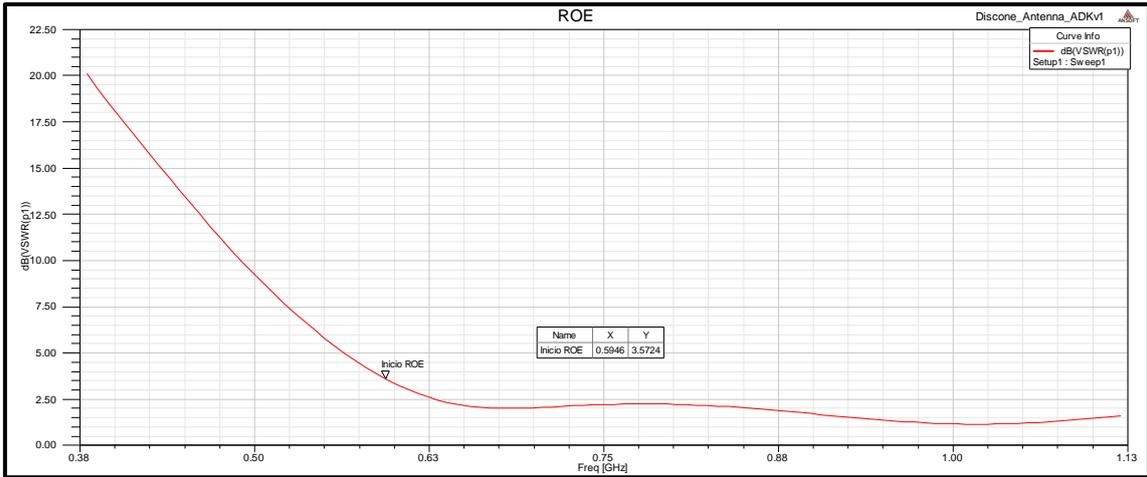


Patrón de radiación y Ganancia

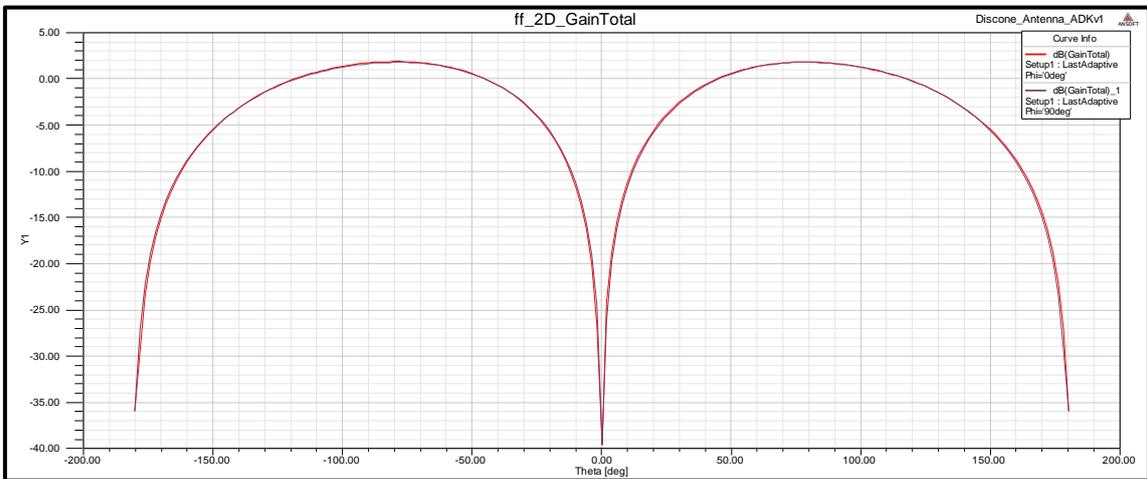
❖ **F=750 MHz**



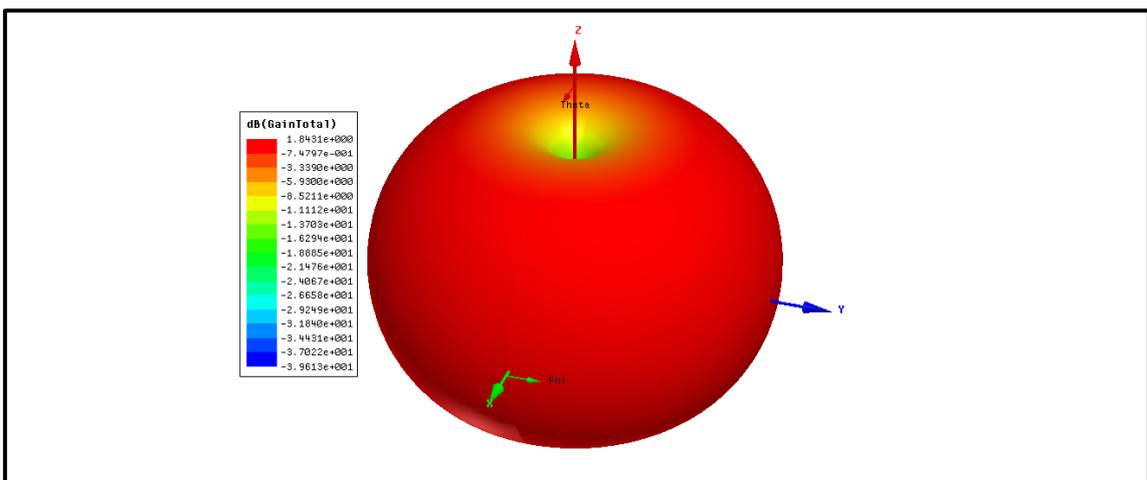
Pérdidas por retorno S1,1



Relación de onda estacionaria ROE



Ganancia total en dos dimensiones (Phi=0, Phi=90)



Patrón de radiación y Ganancia

ANEXO 2: DATA SHEET DEL SUSTRATO UTILIZADO

ANEXO 3: PRINCIPIOS FUNDAMENTALES, CONCEPTOS Y USO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN HFSS

**ANEXO 4: CONSIDERACIONES DE MODELAMIENTO DE
ANTENAS TOMADO DE LA PÁGINA WEB DE ANSYS**