



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES
Y REDES**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE DOS
SISTEMAS RADIANTES DIRECTIVOS APLICADOS A LA
TECNOLOGÍA SDRADAR”**

Trabajo de titulación

Tipo: Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR: MAURICIO ISRAEL ORTIZ QUISHPE

DIRECTOR: ING. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS PhD.

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, Mauricio Israel Ortiz Quishpe

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Mauricio Israel Ortiz Quishpe, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 27 de mayo de 2020.



Mauricio Israel Ortiz Quishpe
060415535-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo DISPOSITIVO TECNOLÓGICO, “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE DOS SISTEMAS RADIANTES DIRECTIVOS APLICADOS A LA TECNOLOGÍA SDRADAR”, realizado por el señor: MAURICIO ISRAEL ORTIZ QUISHPE, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Franklin Geovanni Moreno Montenegro PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2020-05-27
Ing. Paul David Moreno Avilés PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2020-05-27
Ing. Pedro Severo Infante Moreira MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2020-05-27

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermano por haberme forjado como la persona que soy; los anhelos logrados se los debo a ellos incluyendo este, formándome con valores y cualidades que me motivan constantemente para alcanzar nuevas metas. Especialmente a mi madre Ma. Inés quien ha sido un pilar fundamental, apoyándome incondicionalmente en cada empresa emprendida en mi vida, incluyendo esta meta.

Mauricio.

AGRADECIMIENTO

A mi familia, mis padres Ma. Inés, Alfonso y Aníbal, mi hermano Luis, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. A mis compañeros que se han convertido en buenos amigos.

A Dios por darme la perseverancia y las bendiciones para lograr esta y futuras metas.

Al Ing. David Moreno, mi director de trabajo de titulación, y docente en diversas materias, siendo una guía importante en la carrera y en esta investigación, por su amplio conocimiento y don de enseñanza.

Mauricio.

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE GRÁFICOS.....	XI
INDICE DE ANEXOS.....	XVII
RESUMEN.....	XVIII
SUMMARY.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Sistemas Radares.....	5
1.1.1. <i>Definición</i>	5
1.1.2. <i>Partes básicas de un radar</i>	6
1.1.3. <i>Bandas de frecuencias específicos para radar.</i>	7
1.1.4. <i>Efecto de la frecuencia de operación (banda) en el radar.</i>	9
1.1.4.1. <i>Banda S (2.7 a 3.7 GHz).</i>	9
1.1.5. <i>Tipos de sistemas radares.</i>	10
1.1.6. <i>Ecuación del radar</i>	11
1.2. Antenas (Sistemas Radiantes).....	15
1.2.1. <i>Tipos de antenas.</i>	17
1.2.2. <i>Patrón de radiación</i>	20
1.2.2.1. <i>Patrones isotrópicos, direccionales y omnidireccionales</i>	22
1.2.2.2. <i>Regiones de campo</i>	23
1.2.3. <i>Directividad</i>	24
1.3. Software Defined Radio (SDR).....	26
1.3.1. <i>Definición SDR</i>	26
1.3.2. <i>Software Defined Radar (SDRadar)</i>	27

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	30
2.1. Metodología de la investigación.....	30
2.1.1. <i>Tipo de investigación</i>	30
2.1.1.1. <i>Investigación bibliográfica.</i>	30

2.1.1.2. Investigación descriptiva.....	30
2.1.1.3. Investigación de campo.....	31
2.1.2. Técnicas de investigación	31
2.1.2.1. Población y Muestra	31
2.1.2.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	31
2.1.2.3. Técnicas de procesamiento y análisis de Datos	31
2.1.2.4. Validación y confiabilidad	31
2.1.3. Metodología del diseño y construcción de los sistemas radiantes directivos	32
2.1.4. Software y equipamiento (construcción y pruebas)	32
2.1.4.1. CST STUDIO Suite.....	32
2.1.4.2. ANSYS HFSS	33
2.1.4.3. LabVIEW.....	34
2.1.4.4. Plotter de circuitos impresos PCB ProtoMat LPKF S103	35
2.1.4.5. Analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight.....	36
2.1.4.6. Analizador de espectros MS2724C	38
2.1.4.7. Tarjeta NI USRP-2932	39
2.1.5. Diseño de los sistemas Radiantes Directivos	41
2.1.5.1. Arreglo de antenas parche $M \times N$ Microstrip	41
2.1.5.2. Antena bocina piramidal	49
2.1.6. Construcción de los sistemas radiantes directivos	54
2.1.6.1. Construcción arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.....	55
2.1.6.2. Construcción de las antenas bocina piramidal	56

CAPÍTULO III

3. VALIDACIÓN DE LOS SISTEMAS RADIANTES DIRECTIVOS	59
3.1. Pruebas con el analizador de espectro MS2724C ANRITSU	59
3.1.1. Pruebas del sistema arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S	60
3.1.1.1. Prueba rotación 360° de la antena parche 4x4 microstrip.....	60
3.1.1.2. Prueba de cada frecuencia Banda –S incluyendo intervalo hasta 4-4GHZ limite tarjeta NI USRP 2932 del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.....	62
3.1.2. Pruebas del sistema bocina piramidal banda-S	63
3.1.2.1. Prueba rotación 360° de la antena bocina piramidal banda-S	63
3.1.2.2. Prueba de cada frecuencia Banda –S incluyendo intervalo hasta 4-4GHZ limite tarjeta NI USRP 2932 del sistema de antenas bocina piramidal.....	65
3.2. Pruebas con el analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight	66

3.2.1.	<i>Prueba con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.</i>	67
3.2.2.	<i>Prueba con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal Banda-S</i>	68
3.3.	Comparación de los dos sistemas radiantes directivos	70
3.4.	Implementación y pruebas y análisis del sistema SDRadar.	71
3.4.1.	<i>SDRadar implementado con el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.</i>	72
3.4.2.	<i>SDRadar implementado con el sistema de antenas bocina piramidal banda-S</i>	74
3.5.	Análisis de resultados	76

CAPÍTULO IV

4.	ESTUDIO ECONÓMICO	77
4.1.	Estudio económico del diseño y construcción de los sistemas radiantes directivos.	77
4.1.1.	<i>Estudio económico del Diseño de los sistemas radiantes directivos</i>	77
4.1.2.	<i>Estudio económico de la construcción de los sistemas radiantes directivos</i>	77
4.2.	Comparativa de los sistemas radiantes directivos construidos con los disponibles en el mercado.	79
4.3.	Comparativa de sistemas radares por hardware y SDRadar (Banda-S)	80
4.4.	Costo de equipos utilizados propiedad de la ESPOCH	81
	CONCLUSIONES	82
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Designaciones estándar IEEE para bandas de frecuencia radar	8
Tabla 1-2:	Tabla de especificaciones de frecuencia del analizador de espectros Anritsu MS2724C	38
Tabla 2-2:	Tabla de especificaciones de ancho de banda del analizador de espectros Anritsu MS2724C	39
Tabla 3-2:	Tabla de especificaciones de la USRP 2932 en Transmisión	40
Tabla 4-2:	Tabla de especificaciones de la USRP 2932 en Recepción	41
Tabla 5-2:	Parámetros establecidos para el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	44
Tabla 6-2:	Tabla de nombres, descripción y valores de cada elemento del diseño del arreglo de antenas	46
Tabla 7-2:	Tabla de parámetros de la antena bocina piramidal	52
Tabla 1-3:	Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro rotando el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip 360 grados en 72 pasos	60
Tabla 2-3:	Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro con el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip a una frecuencia central de 3.7GHZ	62
Tabla 3-3:	Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro rotando la antena bocina piramidal 360 grados en 72 pasos	64
Tabla 4-3:	Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro con la antena bocina piramidal a una frecuencia central de 3.7GHZ	66
Tabla 5-3:	Tabla de valores en dB obtenidos en el analizador de redes vectoriales de los sistemas radiantes directivos	70
Tabla 6-3:	Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro de los sistemas radiantes directivos	71
Tabla 1-4:	Tabla de precios de software y hardware para el diseño de los sistemas radiantes directivos	77

Tabla 2-4:	Tabla de precios de los materiales y elementos electrónicos para la construcción del sistema de arreglos parche 4x4 microstrip	78
Tabla 3-4:	Tabla de precios de los materiales y elementos electrónicos para la construcción del sistema de antenas bocina piramidal	78
Tabla 4-4:	Tabla de precios de los sistemas radiantes directivos bocina piramidal y arreglo parche 4x4 microstrip disponibles en el mercado	79
Tabla 5-4:	Tabla de precios de los sistemas radiantes directivos bocina piramidal y arreglo parche 4x4 microstrip	79
Tabla 6-4:	Tabla de precios de SDRadar implementado con el sistema de antenas bocina piramidal	80
Tabla 7-4:	Tabla de precios de SDRadar implementado con el sistema de arreglos de antenas parche 4x4 microstrip	80
Tabla 8-4:	Tabla de precios de sistemas radares de control de tráfico aéreo y control de clima	81
Tabla 9-4:	Tabla de precios de los equipos de microondas utilizados propiedad de la ESPOCH	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Sistema de detección “Radar”	5
Figura 2-1:	Densidad de potencia omnidireccional dispersa de manera geométrica.....	12
Figura 3-1:	Conexión entre la ecuacion 3-1 y 4-1	14
Figura 4-1:	Antena como dispositivo de transición.....	16
Figura 5-1:	Línea de transmisión equivalente de Thevenin de antena en modo de transmisión	16
Figura 6-1:	Configuración de antenas de cable (dipolo). (a) Antena dipolo, (b) Antena Bucle circular (cuadrado), (c) Antena helicoidal.....	17
Figura 7-1:	Configuración de antenas de apertura. (a) Antena corneta piramidal, (b) Antena corneta cónica, (c) Guía de onda rectangular.	18
Figura 8-1:	Formas representativas de elementos de parche microstrip.....	18
Figura 9-1:	Antenas microstrip. (a) parche rectangular, (b) parche circular.....	19
Figura 10-1:	Configuraciones típicas de matriz de cable, apertura y microstrip.....	19
Figura 11-1:	Sistema de coordenadas para análisis de antenas.....	21
Figura 12-1:	Patrón de radiación. (a) Patrón de campo normalizado bidimensional escala lineal, (b) patrón de potencia escala lineal, (c) patrón de potencia en dB.....	21
Figura 13-1:	Patrones principales de los planos E y H para una antena bocina piramidal.....	22
Figura 14-1:	Patrón antena omnidireccional.....	23
Figura 15-1:	Regiones de campo de una antena. (a) región reactiva de campo cercano, (b) región radiante de campo cercano (Fresnel), (c) región de campo lejano (Fraunhofer).....	24
Figura 1-2:	Interface CST STUDIO Suite.....	32
Figura 2-2:	CST Studio. (a)Inicio HFFS, (b) Interface HFSS.....	33
Figura 3-2:	Inicio e Interface Labview.....	34

Figura 4-2: Plotter ProtoMat LPKF S103.....	35
Figura 5-2: Keysight Vector Network Analyzer E5071C-2K5.....	37
Figura 6-2: Analizador de espectros Anritsu MS2724C.....	38
Figura 7-2: Tarjeta NI USRP 2932.....	40
Figura 8-2: Arreglo plano MxN.....	42
Figura 9-2: Parche. (a) vista superior (conductor), (b) vista lateral(sustrato).....	43
Figura 10-2: Diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a) Vista frontal, (b) vista lateral (altura h del sustrato)	45
Figura 11-2: Vista frontal del puerto de alimentación del Arreglo de antenas.....	45
Figura 12-2: Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a)Vista frontal parcial del Arreglo de antenas 4 parches, (b) vista frontal parcial del arreglo de antenas 2 parches.....	45
Figura 13-2: Diseño del arreglo de antenas microstrip en CST Studio.	46
Figura 14-2: Simulación en Fr4 arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a)vista frontal del arreglo de antenas, (b)vista posterior- tierra.....	47
Figura 15-2: Antena bocina piramidal. (a) Sistema de coordenadas de la antena bocina piramidal, (b) antena bocina sectorial plano E, (c) antena sectorial plano H.....	50
Figura 16-2: Diseño acotado de la antena bocina piramidal	52
Figura 17-2: Diseño de la antena piramidal implementado en el software HFSS	53
Figura 18-2: Lóbulo de radiación en campo lejano del diseño de la antena piramidal banda-S.....	54
Figura 19-2: Materiales y elementos electrónicos. (a) Placa(baquelita) FR4, (a) conector SMA Hembra, (c) kit brocas fresas 0.1mm-3.7mm.....	55
Figura 20-2: Diseño a construir del arreglo de antenas parche en formato .dxf visualizado en AutoCAD	55
Figura 21-2: Proceso de freseo del arreglo de antenas con el Plotter ProtoMat LPKF S103. (a) ubicación y ajuste de brocas, (b)Inicio del freseo (c) resultado parcial	55
Figura 22-2: Sistema de arreglo de antenas parche 4x4 microstrip construidas	56

Figura 23-2: Kit sistema radiante directivo arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S	56
Figura 24-2: Plantilla de corte antena bocina piramidal formato .dxf, parte 1 (a), parte 2 (b)	56
Figura 25-2: Proceso de corte placa FR4 de plantillas antena bocina piramidal, inicio de corte(a), corte terminado de la plantilla 1(b), piezas listas para soldar(c).....	57
Figura 26-2: Antena bocina piramidal banda-S. (a) vista inferior, (b) vista superior, (c) vista lateral, (d) vista interna	57
Figura 27-2: Kit sistema radiante directivo bocina piramidal banda-S.....	58
Figura 1-3: Pruebas con el analizador de espectro MS2724C ANRITSU de los sistemas radiantes directivos	59
Figura 2-3: Pruebas con el generador de señales ANRITSU de los sistemas radiantes directivos.....	59
Figura 3-3: Pruebas con el analizador de espectro rotando la antena 360 grados el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S	60
Figura 4-3: Pruebas con el analizador de espectro rotando la antena 360 grados la antena bocina piramidal banda-S.....	63
Figura 5-3: Pruebas con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.....	67
Figura 6-3: Prueba 1 con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S	67
Figura 7-3: Prueba 2 con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.....	68
Figura 8-3: Pruebas con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal banda-S.....	69
Figura 9-3: Prueba 1 con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal banda-S.....	69
Figura 10-3: Prueba 2 con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal banda-S	70

Figura 11-3: Implementación SDRadar. (a) arreglo de antenas parche 4x4 microstrip, (b) prueba reflejando en pizarrón laboratorio microondas, (c) antenas bocina piramidal..... 71

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Diagrama de bloques radar simple.....	6
Gráfico 2-1:	Diagrama de bloques concepto SDR	27
Gráfico 1-2:	Parámetros de Scattering S11 (-27.987dB) del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.	48
Gráfico 2-2:	Ganancia (18.07 dBi) del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	48
Gráfico 3-2:	Diagrama de radiación del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a) diagrama polar, (b) diagrama 3D en dBi	49
Gráfico 4-2:	Resultado de los parámetros de scattering S11 (-33.982db) del diseño de la antena piramidal.....	53
Gráfico 5-2:	Ganancia resultante (17.896dBi) de la simulación del diseño de la antena piramidal.....	54
Gráfico 5-3:	Diagrama de bloques de SDRadar (Radar definido por software)	28
Gráfico 6-3:	Patrón de radiación cartesiano del sistema de arreglo de antenas parche 4x4 microstrip Banda-S	61
Gráfico 2-3:	Patrón de radiación polar del sistema de arreglo de antenas parche 4x4 microstrip Banda-S	62
Gráfico 3-3:	Patrón de transmisión del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	63
Gráfico 4-3:	Patrón de radiación cartesiano del sistema de antenas bocina piramidal Banda-S	65
Gráfico 5-3:	Patrón de radiación polar del sistema de antenas bocina piramidal Banda-S	65
Gráfico 6-3:	Patrón de transmisión del sistema de antenas bocina piramidal banda-S	66
Gráfico 7-3:	Resultados SDRadar reflejado en una pared, (a) señal fmcw recibida(tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama	72
Gráfico 8-3:	Resultados SDRadar reflejado en un pizarrón, (a) señal fmcw recibida (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama	73
Gráfico 9-3:	Resultados SDRadar reflejado en una superficie metálica, (a) señal fmcw recibida (tiempo), (b)respuesta en frecuencia, (c) radargrama	74
Gráfico 10-3:	Resultados SDRadar reflejado en la pared, (a) señal fmcw recibida (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama	75
Gráfico 11-3:	Resultados SDRadar reflejado en el pizarrón, (a) señal fmcw recibida (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama	75

Gráfico 12-3: Resultados SDRadar reflejado en el pizarrón, (a) señal fmcw recibida (tiempo),
(b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama 76

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PRUEBAS Y MEDICIONES CON EL ANALIZADOR DE ESPECTROS Y GENERADOR DE SEÑALES

ANEXO B: PRUEBAS Y MEDICIONES CON EL ANALIZADOR DE REDES VECTORIALES

ANEXO C: CÓDIGO LABVIEW PARA GENERAR LA SEÑAL FMCW

ANEXO D: CÓDIGO LABVIEW INTERFACE SDRADAR.

RESUMEN

Se planteó dos tipos de sistemas radiantes directivos para su diseño y construcción: primero el arreglo de antenas tipo parche 4x4 microstrip y segundo la antena bocina piramidal, operando cada uno en la banda-S a 3.7 GHz. Para el diseño de los dos sistemas radiantes se realizó en base a software, el arreglo de antenas utilizando el CST Studio y para la antena bocina piramidal usando el Ansoft HFSS. La construcción de las antenas se efectuó utilizando la CNC LPKF S103, para el arreglo de antenas con un proceso de freseo y la bocina piramidal con cortes de las plantillas diseñadas para su ensamblaje. Las pruebas de los dos sistemas se realizaron con el analizador de espectros a una distancia de 4.5m y el analizador de redes vectoriales (VNA), para caracterizar sus parámetros (Dispersión, frecuencia y patrón de radiación). En el arreglo de antenas se obtuvo un parámetro de dispersión de -34dB y en el sistema bocina piramidal -24 dB. Con los valores obtenidos en las pruebas realizadas de los dos sistemas se efectuó la comparación de estos tomando en cuenta cada uno de sus parámetros, dando como resultado que el sistema de arreglo de antenas brinda mayores prestaciones que la bocina piramidal. Se implementó el SDRadar con la tarjeta NI USRP 2932 y con cada uno de los sistemas construidos a una distancia de 3.5 metros, cada prueba realizada con tres elementos reflejantes del laboratorio de microondas. Se concluye que los dos sistemas construidos tienen un bajo costo económico y son aptos para sistemas SDRadar en la banda-S, para ser utilizados en investigaciones en el laboratorio de microondas. Se recomienda previo al diseño y construcción de antenas considerar los parámetros y limitaciones de cada equipo a utilizar, además de los materiales y elementos electrónicos disponibles en el mercado.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <RADAR DEFINIDO POR SOFTWARE (SDRADAR)>, < SISTEMA RADIANTE DIRECTIVO>, <CARACTERIZACIÓN DE ANTENAS>, <ANTENA BOCINA PIRAMIDAL>, <ARREGLO DE ANTENAS>.

REVISADO

10 MAR 2020

Ing. Jonathan Parreño Uquillas, MBA
ANALISTA DE BIBLIOTECA II

SUMMARY

Two types of directive radiant systems were proposed for its design and construction: first, the arrangement of 4x4 micro strip patch type antennas and second, the pyramidal horn antenna, operating each in the 3.7 GHz S-band. For the design of the two radiant systems, the antenna arrangement was made using the CST Studio and for the pyramid horn antenna using the Ansoft HFSS. The construction of the antennas was carried out using the CNC LPKF S103, for the arrangement of antennas with a milling process and the pyramidal horn with cuts of the templates designed for assembly. The tests of the two systems were carried out with the spectrum analyzer at a distance of 4.5m and the vector network analyzer (VNA), to characterize their parameters (dispersion, frequency and radiation pattern). In the antenna array, a dispersion parameter of -34dB was obtained and in the pyramid horn system -24 dB. With the values obtained in the tests carried out on the two systems, the comparison of these was made, taking into account each of their parameters, resulting in the antenna array system offering greater benefits than the pyramid horn. SDRadar was implemented with the NI USRP 2932 card and with each of the systems built at a distance of 3.5 meters, each test performed with three reflective elements from the microwave laboratory. It is concluded that the two systems built have a low economic cost and are suitable for SDRadar systems in the S-band, to be used in investigations in the microwave laboratory. It is recommended prior to the design and construction of antennas to consider the parameters and limitations of each equipment to be used, in addition to the materials and electronic elements available on the market.

Key words: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <RADAR DEFINED BY SOFTWARE (SDRADAR)>, <RADIANT MANAGEMENT SYSTEM>, <ANTENNA CHARACTERIZATION>, <PIRAMIDAL HORN ANTENNA>, <ANTENNA ARRAY>.



INTRODUCCIÓN

Desde los inicios del siglo XX, se han desarrollado notablemente dispositivos y servicios de telecomunicaciones, así como también de teledetección, inicialmente creado para aplicaciones militares en la primera y segunda guerra mundial, emprendiendo la carrera en el desarrollo de sistemas radares, teniendo utilidad en diversos campos como el topográfico, transporte, bélico, académico, entre otros.

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal el diseño, construcción e implementación de dos sistemas radiantes directivos, para ser utilizados en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) aplicados a la tecnología SDRadar a un bajo costo. El método científico fue el idóneo para cumplir los objetivos propuestos, la investigación bibliográfica proporciono datos, características, parámetros, entre otros para el diseño de los dos sistemas radiantes directivos en la banda S para radares a una frecuencia de 3.7 GHz ,optando para esta esquematización el arreglo de antenas microstrip de 4x4 parches y bocina piramidal , la investigación descriptiva se manejó para la delineación paso a paso en el proceso de diseño y construcción de los dos sistemas radiantes y la investigación de campo ya que se requiere realizar pruebas, mediciones y comparaciones.

Posteriormente, a las pruebas y mediciones en los dispositivos como el analizador de redes vectoriales, analizador de espectros, generador de señales y la tarjeta USRP para aplicación en la tecnología SDRadar propiedad de la ESPOCH en el laboratorio de microondas, se presentan los resultados y se realiza el análisis, el presente trabajo se finaliza con las conclusiones y las respectivas recomendaciones.

Esta investigación deja un aporte a la investigación de la ESPOCH, ya que al realizar pequeñas variaciones en los dispositivos de radio definido por software se tiene una amplia gama de aplicaciones en los sistemas radares.

ANTECEDENTES

Hertz Heinrich Rudolf descubrió en 1887 la propagación y reflexión de las ondas electromagnéticas a través del espacio libre. Estudios y experimentos llevados a cabo posteriormente lograron la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas con una antena

transmisora y una receptora dando origen al desarrollo de lo que en el presente se conoce como sistemas radar.

En la transmisión y recepción en los sistemas radares los dispositivos radiantes son un elemento principal para la implementación de estos. Los sistemas radiantes directivos (también llamados unidireccionales o direccionales) son capaces de concentrar la mayor parte de la energía radiada de manera localizada, en donde su lóbulo de radiación principal es la zona donde la radiación es máxima, aumentando así la potencia emitida hacia el receptor desde el sistema transmisor evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas, ideales para los sistemas radares.

Existe una gran gama de aplicaciones de sistemas radar, hoy en día se extienden estos sistemas en diversas áreas de estudio, inicialmente se lo desarrollo para propósitos militares en la segunda guerra mundial ,pero el desarrollo de esta tecnología en el ámbito civil es de un alto costo económico , con esta dificultad se da origen a la tecnología SDRadar un sistema versátil y de bajo costo ya que todas las funciones de un sistema radar es procesado mediante software , tales como la generación de la señal , modulación, filtrado, demodulación , entre otros.

En la actualidad existen varios módulos para realizar investigaciones como el Universal Software Radio Peripheral (USRP) que es un periférico de bajo costo diseñado para trabajar junto con una computadora a través de una FPGA, bajo el concepto de SDRadar se han creado las tarjetas USRP, las cuales son distribuidos por diferentes empresas como National Instrument y la ETTUS RESEARCH, cada una de estas tarjetas con diferentes características y a su vez limitaciones en resolución por el rango de ancho de banda que vienen establecidas por su respectivo fabricante.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La falta de sistemas radiantes específicamente directivos, para ser utilizados en la implementación de laboratorios, trabajos de titulación o investigación en la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH conlleva a que no se perfeccione el conocimiento en el campo práctico de las telecomunicaciones en el área de la teledetección.

Por sus altos costos o falta de disponibilidad en el mercado hacen difícil la adquisición de estos sistemas radiantes directivos, teniendo en cuenta que la ESPOCH cuenta con equipos de microondas y telecomunicaciones compatibles y siendo complemento e indispensables estos sistemas para su utilización e implementación práctica.

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Qué son y para qué sirven los sistemas radiantes directivos?

¿Cuáles son los requerimientos que deben cumplir estos sistemas a diseñar, construir e implementar?

¿Los sistemas radiantes serán de bajo costo implementados con la tecnología SDRadar?

¿Cuáles son los resultados de la implementación con los equipos de microondas de propiedad de la ESPOCH con los dos sistemas radiantes directivos con la tecnología SDRadar?

JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto tecnológico aportara un análisis exhaustivo de dos sistemas radiantes directivos desde su diseño hasta su implementación, los parámetros objeto de estudio serán anchos de banda, frecuencia de operación, potencia de transmisión, interferencias y resolución radar aplicado con la tecnología SDRadar con los equipos de microonda y telecomunicaciones de propiedad de la ESPOCH.

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

El presente trabajo tecnológico aportara un análisis exhaustivo de dos sistemas radiantes directivos desde su diseño, construcción hasta su implementación, los parámetros objeto de estudio serán parámetros de dispersión “scattering”, coeficientes de transmisión, tipo de sistema radiante, ganancia, frecuencia central, aplicado con la tecnología SDRadar con los equipos de microonda y telecomunicaciones de propiedad de la ESPOCH.

Ferrando (2002, p.22) cita, que la directividad de un sistema 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 esa misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena. Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

Por lo tanto, para la transmisión y recepción de las señales existen varios dispositivos para la teledetección , con sus respectivas características a precios altos, es por eso que se pretende utilizar dos sistemas radiantes directivos aplicados a la tecnología SDRadar , donde se proyecta

impulsar el campo investigativo en la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH en el área de los sistemas radares, elaborando estos dispositivos tecnológicos a los requerimientos del radar definido por software para ser utilizado por los investigadores en esta área.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

La unión de los sistemas radiantes directivos, software y un Dispositivo de Radio Definido por Software USRP permiten la creación de un sistema radar de bajo costo conocido como la tecnología SDRadar, con múltiples aplicaciones como detección de objetivos de largo alcance, control del tráfico vehicular, militar, entre otros esto implementado y probado con equipos del laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica propiedad de la ESPOCH.

Estos sistemas radiantes tienen como propósito ser utilizados en el Laboratorio de microondas, así también pueden ser usados en ambientes externos con los parámetros requeridos para ser aplicados a la tecnología SDRadar, por medio de simulaciones se analiza y evalúa los resultados, para su posterior construcción e implementación y pruebas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir e implementar dos sistemas radiantes directivos aplicados a la tecnología SDRadar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir una antena directiva tipo bocina con el software Ansoft HFSS para sistemas SDRadar.
- Diseñar y construir una antena directiva tipo array microstrip con el software Ansoft Designer para sistemas SDRadar.
- Comparar las antenas directivas bocina y array microstrip mediante pruebas con el analizador de espectro para comprobar cuál es la más idónea para el sistema SDRadar.
- Implementar el sistema SDRadar con la tarjeta USRP B210, con el software GNU Radio y Matlab con la antena bocina y array microstrip respectivamente.
- Realizar las pruebas y analizar los resultados con el sistema SDRadar implementado en un ambiente de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes con elementos reflectivos del mismo.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Sistemas Radares

1.1.1. Definición

Un sistema Radar “Radio Detection and Ranging”, (Detección y Medición de Distancias por Radio) consiste en un sistema estructurado por un transmisor y un receptor de radio, donde se transmiten los pulsos de campos electromagnéticos, se dispersan (rechazado o con eco) desde un objeto y retornan al receptor. El tiempo se mide desde la irradiación del pulso transmitido hasta la recepción del pulso disperso. Las ondas de radio transmitidas viajan a través de un medio de transmisión en este caso aire aproximadamente a la velocidad de la luz. Midiendo el retraso de tiempo se determina el rango del objeto detectado. En la figura 1-1 se muestra un diagrama completo de un sistema de detección Radar. (Charvat, 2014,p.1)

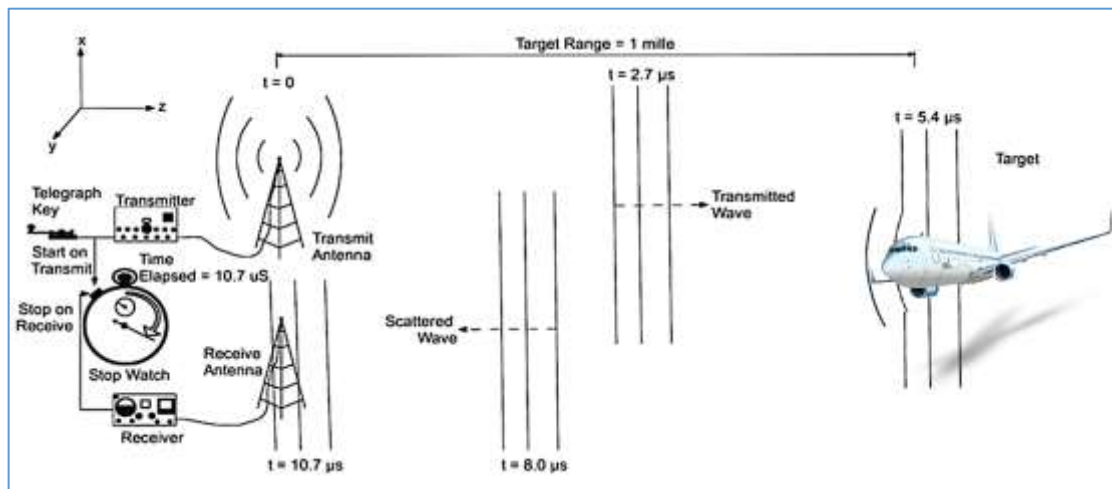


Figura1-1. Sistema de detección “Radar”.

Fuente:(Charvat, 2014,p.1)

El radar es un sensor electromagnético con el objetivo de detectar objetos reflectantes, cuya operación se resume en los siguientes ítems.

- Los sistemas radares irradian ondas de radio electromagnéticas de una antena para propagarse en el espacio.
- Parte de la energía radiada es obstruida por un objeto reflectante, llamado objetivo, ubicado a cierta distancia del radar.

- La energía interceptada por el objetivo es reflejada en varias direcciones.
- Parte de la energía reflejada (eco) es devuelta y recibida por la antena del sistema radar.
- Posteriormente a la amplificación por el receptor y el adecuado procesamiento de la señal, se toma una decisión a la salida del receptor en cuanto si está o no presente una señal útil de eco del objetivo, en ese instante se adquiere la ubicación del objetivo y otra información adicional de este.(Skolnik, 2013,p.1.1)

1.1.2. Partes básicas de un radar

En el gráfico 1-1 se presenta un diagrama de bloques, que muestra los subsistemas básicos que generalmente se encuentran en un sistema radar, siendo IF la frecuencia intermedia.

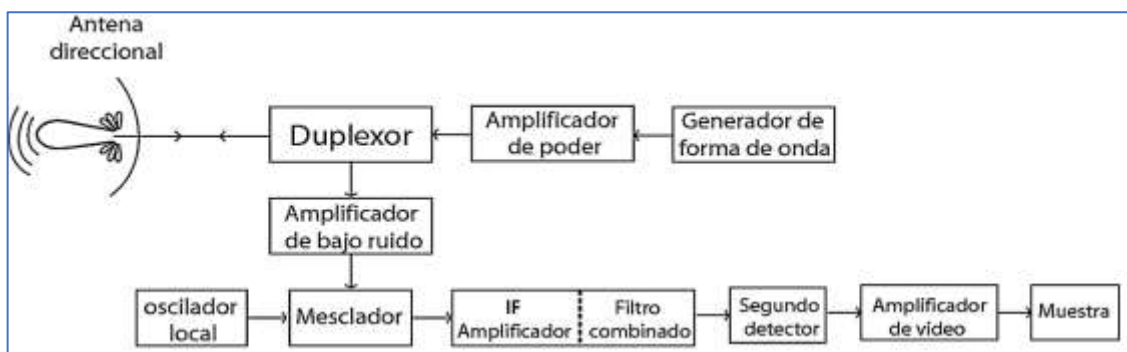


Gráfico 1-1. Diagrama de bloques radar simple.

Fuente:(Skolnik, 2013,p.1.3)

En la parte superior emplea un amplificador de potencia como transmisor y en la parte inferior un receptor superheterodino. A continuación, se describe los principales componentes del sistema radar simple.

- **El transmisor** se muestra como un amplificador de potencia que genera la forma de onda de radio adecuada para cumplir el objetivo del sistema, teniendo potencias aproximadas desde los milivatios hasta los megavatios (la potencia promedio es un indicador de la capacidad del rendimiento del sistema radar que su potencia máxima). La mayoría de sistemas radares utilizan una forma de onda de pulso corta con el objetivo que con una sola antena se pueda usar en una base de tiempo compartido para la transmisión y recepción.
- **La función del duplexor** es permitir el uso de una sola antena resguardando el receptor sensible de que se quemara en el momento que el transmisor está encendido dirigiendo la señal obtenida (eco) recibida en el receptor en lugar del transmisor.
- **La antena** es el dispositivo de propagación que permite que las ondas de radio se transmitan en el espacio y posteriormente la recolección de estas ondas (eco) al recibirlas. Frecuentemente se utiliza una antena directiva, un dispositivo que permite que la energía radiada se transmita en un haz estrecho concentrando la potencia, permitiendo la determinación de la dirección

hacia el objetivo. La antena además que concentra la energía en la transmisión y recoge la energía del eco en la recepción, actúa como un filtro espacial proporcionando una resolución angular y otras capacidades.

- **El receptor** es el encargado de amplificar la señal recibida (débil, distorsionada), a un nivel a cuál se pueda detectar su presencia. El ruido es la limitación máxima de un sistema radar, para la toma de una decisión confiable en la detección y extraer información sobre el objetivo, se debe tener en cuenta para asegurar que el receptor tenga el mínimo ruido.
- **En las frecuencias**, generalmente utilizadas por los sistemas radares, el ruido que afecta el rendimiento de este por lo general deriva de la primera etapa del receptor, mostrado en el grafico 1-1 siendo este el amplificador de bajo ruido.
- **El procesador de señales**, que se encuentra en la parte IF (Si) del procesador del receptor, es la parte del receptor que procesa las señales deseadas de las no deseadas, que entorpecen la detección, en este proceso se incluye el filtro adaptado que maximiza la relación señal-ruido de salida, además del procesamiento adicional de tres señales el procesamiento Doppler maximizando la relación señal-desorden de objetos en movimiento, cuando el desorden de la señal es mayor que el ruido del receptor. La decisión en la detección del objetivo se toma en la salida del receptor, se declara que un objeto es detectado cuando la salida del receptor excede un umbral predeterminado, de lo contrario si el umbral se establece extremadamente bajo, el ruido del receptor puede causar falsas alarmas excesivas, si el umbral esta extremadamente alto se pueden perder las detecciones de algunos objetos, que de otro modo se detectarían. Para determinar el correcto criterio del nivel del umbral de decisión es establecer este en un promedio para que produzca una tasa media predeterminada aceptable de falsas alarmas causadas por el ruido generado por el receptor. Posteriormente a la toma de decisión de detección, se puede determinar la trayectoria del objetivo, donde la trayectoria es el lugar geométrico de las ubicaciones del objetivo en función del tiempo. (Skolnik, 2013, pp1.2-1.5)

1.1.3. Bandas de frecuencias específicos para radar.

De acuerdo a las aplicaciones radar se han asignado frecuencias específicas para utilizar el espectro electromagnético. La frecuencia de trabajo del radar se elige considerando ciertos factores como: propagación, resolución espacial, materiales de penetración, interferencias electromagnéticas, limitaciones de ancho de banda e interferencias de radiofrecuencia. No siempre es conveniente utilizar el rango de frecuencia numérico exacto sobre el que opera un tipo particular de radar. Con muchos radares militares, el rango exacto de frecuencia de funcionamiento de un radar generalmente no se revela. Por lo tanto, el uso de letras para designar las bandas de operación del radar ha sido muy útil. En la tabla 1-1 se resume la nomenclatura de las bandas estandarizado oficialmente por el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y

Electrónicos), además el rango de frecuencias nominal y las frecuencias específicas para radares. (Skolnik, 2013,p.1.13)

Tabla 1-1: Designaciones estándar IEEE para bandas de frecuencia radar.

Designación de banda	Rango de Frecuencias Nominal	Rangos de Frecuencias Específicos para Radar Basados en Asignaciones de Frecuencia ITU para la Región 2
HF	3 MHz – 30 MHz	
VHF	30 MHz – 300 MHz	138 MHz – 144 MHz 216 MHz – 225 MHz
UHF	300 MHz – 1000 MHz	420 MHz – 450 MHz 890 MHz – 942 MHz
L	1000 MHz – 2000 MHz	1215 MHz – 1400 MHz
S	2000 MHz – 4000 MHz	2300 MHz – 2500 MHz 2700 MHz – 3700 MHz
C	4000 MHz – 8000 MHz	5250 MHz – 5925 MHz
X	8000 MHz – 12000 MHz	8500 MHz – 10680 MHz
Ku	12 GHz – 18 GHz	13.4 GHz – 14 GHz 15.7 GHz – 17.7 GHz
K	18 GHz – 27 GHz	24.05 GHz – 24.25 GHz
Ka	27 GHz – 40 GHz	33.4 GHz – 36 GHz
V	40 GHz – 75 GHz	59 GHz – 64 GHz
W	75 GHz – 110 GHz	76 GHz – 81 GHz 92 GHz – 100 GHz
Mm	110 GHz – 300 GHz	126 GHz – 142 GHz 144 GHz – 149 GHz 231 GHz – 235 GHz 238 GHz – 248 GHz

Fuente: (Skolnik, 2013,p.1.13)

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) asigna partes específicas del espectro electromagnético para uso de sistemas radares como se muestra en la tercera columna de la tabla 1-1, que se aplica a la Región 2 de la UIT que incluye Sudamérica y América del Norte. Se producen ligeras diferencias en las otras dos regiones de la UIT. Por lo tanto, un radar de banda L solo puede funcionar dentro del rango de frecuencia de 1215 MHz a 1400 MHz, e incluso dentro de este rango, puede haber restricciones. Algunas de las bandas UIT indicadas tienen un uso restringido; por ejemplo, la banda entre 4.2 y 4.4 GHz está reservada (con pocas excepciones) para altímetros de radar en el aire. No hay asignaciones oficiales de la UIT para el radar en la banda de HF, pero la mayoría de los radares de HF comparten frecuencias con otros servicios electromagnéticos. La designación de banda de letra para los radares de onda milimétrica es mm y hay varias bandas de frecuencia asignadas al radar en esta región. Aunque la descripción oficial de la UIT de las ondas milimétricas es de 30 a 300 GHz, en realidad, la tecnología de los radares en la banda K_A está mucho más cerca de la tecnología de las frecuencias de microondas que de la tecnología de la banda W. Los que trabajan en este campo a menudo consideran que las frecuencias de radar de onda milimétrica tienen un límite inferior de 40 GHz en lugar del límite inferior "legal" de 30 GHz en reconocimiento de la diferencia significativa en tecnología y aplicaciones que es característica de la onda milimétrica. Las microondas no se han definido en

este estándar, pero este término generalmente se aplica a los radares que operan desde la banda UHF a K_A. (Skolnik, 2013,p.1.13)

1.1.4. Efecto de la frecuencia de operación (banda) en el radar.

Los sistemas radares han operado a frecuencias bajas desde 2 MHz (justo por encima de la banda de transmisión de AM) y tan altas como varios cientos de GHz (región de onda milimétrica). Por lo general, las frecuencias de los sistemas radares van desde un rango de 5 MHz a más de 95 GHz. Siendo esta una extensión muy grande de frecuencias, por lo que se debe esperar que la tecnología, las capacidades y las aplicaciones del radar varíen dependiendo del rango de frecuencia. Los radares en una banda de frecuencia tienen capacidades y características diferentes a los radares en otras bandas de frecuencia. En general, es más fácil lograr un largo alcance en las frecuencias más bajas porque es más fácil obtener transmisores de alta potencia y antenas físicamente grandes en las frecuencias más bajas. En las frecuencias de radar más altas, es más fácil lograr mediciones precisas de rango y ubicación porque las frecuencias más altas proporcionan un ancho de banda más amplio (que determina la precisión del rango y la resolución del rango), así como antenas de haz más estrechas (que determinan la precisión del ángulo y la resolución del ángulo).(Skolnik, 2013,p.1.14)

1.1.4.1. Banda S (2.7 a 3.7 GHz).

Banda utilizada para la implementación de radares de vigilancia aérea, marítima, tráfico entre otros. Si se desea un radar 3D (uno que determine el alcance, el ángulo de acimut y el ángulo de elevación), se puede lograr en la banda S. Sabiendo que la vigilancia de largo alcance se realiza mejor a bajas frecuencias y la medición precisa de la ubicación del objetivo se realiza mejor a altas frecuencias. Si solo se puede usar un solo radar que funcione dentro de una sola banda de frecuencia, entonces la banda S es ideal. A veces también es aceptable usar la banda C como opción para un radar que realiza ambas funciones. El radar de vigilancia aérea en el aire AWACS también funciona en la banda S y el radar E2 AEW de la Marina de los EE. UU. El radar meteorológico Nexrad funciona en la banda S, siendo una buena frecuencia para la observación del clima porque una frecuencia más baja produciría una señal de eco de radar mucho más débil de la lluvia (ya que el eco de radar de la lluvia varía como la cuarta potencia de la frecuencia), y una frecuencia más alta produciría la atenuación de la señal a medida que se propaga a través de la lluvia y no permitiría una medición precisa de la tasa de lluvia.

1.1.5. Tipos de sistemas radares.

Aunque no existe una única forma de caracterizar un radar, se expondrá a continuación los tipos de radares por su característica principal.

- *Radar de pulso*
- *Radar de alta resolución*
- *Radar de compresión de pulso*
- *Radar de vigilancia*
- *Indicación de blanco móvil (MTI)*
- *Radar Doppler de pulso*
- *Radar de rastreo.*
- *Radar de imágenes*
- *Radar aerotransportado de observación lateral (SLAR).*
- *Radar de apertura sintética (SAR).*
- *Radar de apertura sintética inversa (ISAR).*
- *Radar de control de armas.*
- *Radar de orientación*
- *Radar meteorológico*
- *Radar meteorológico Doppler.*
- *Reconocimiento de objetivos.*
- *Radar multifuncional.* (Skolnik, 2013,pp1.5-1.7)

Además de los tipos de radares ya expuestos existe el tipo de radar CW, esos sistemas son los más utilizados para aplicaciones de detección de objetos tanto en aeronáutica, marina, transporte y clima, además de ser utilizados en sistemas de radares definidos por software, así también de este tipo de radar se deriva el FMCW ofreciendo mejores soluciones en ciertas áreas a diferencia del radar CW a continuación, se describen sus características.

- *Radar de onda continua (CW)*

Este es un tipo de radar que primero transmite ondas continuas, se reflejan las y recibe, teniendo estas una forma sinusoidal. Una de las características de este radar es la posibilidad de medir la distancia del objetivo, siendo esta dependiente de la longitud de la banda, teniendo en cuenta que esta debe ser amplia y se aplica a la portadora una marca temporal, para determinar el tiempo de transmisión y de recepción, mientras menos corto sea el tiempo será mejor la medición. El espectro de la transmisión de onda continua se puede modular tanto en frecuencia como en

amplitud. Casi siempre usa el cambio de frecuencia Doppler para detectar objetivos en movimiento o para medir la velocidad relativa de un objetivo.

Este radar tiene como ventajas principales: su aparente simplicidad de implementación, la radiación del potencial mínimo en el espectro transmitido solucionando el problema de radio interferencia, además simplifica la preselección de las microondas, filtrado, entre otros. Otra ventaja es la habilidad de operar sin la ambigüedad de velocidad, objetivos a cualquier rango, con casi todas las velocidades.

- *Radar FM-CW*

Este radar CW de frecuencia modulada ofrece una solución para el diseño del radar de corto alcance de banda ancha, teniendo en cuenta que no necesita pulsos, sino que transmite y recibe continuamente. El análisis de Fourier de los valores recibidos aumenta considerablemente la sensibilidad. El Radar FMCW es de un bajo costo y solo requiere un mezclador de frecuencia y un oscilador de frecuencia modulada (FM). Es ideal para sistemas de radar de corto alcance de bajo costo, amplio ancho de banda y de alta sensibilidad. El radar FMCW provee información análoga en el dominio de la frecuencia que inmediatamente debe procesarse para determinar el alcance del objetivo. A continuación, se describen sus características:

- Alta precisión en la medición de rango.
- El procesamiento de la señal después del mezclado se realiza en un rango de baja frecuencia, simplificando considerablemente la realización de los circuitos de procesamiento.
- Capacidad de medir simultáneamente el rango y velocidad relativa del objetivo.
- Capacidad de medir rangos pequeños de un objetivo (el rango mínimo medido es comparable a la longitud de onda transmitida). (Skolnik, 2013,p.415).

1.1.6. Ecuación del radar

La ecuación del radar constituye las dependencias físicas de la potencia de transmisión, proporcionando un modelo matemático desde la propagación de las ondas emitidas hasta la recepción de las señales de retorno, además esta ecuación permite determinar el desempeño del radar.

A. Argumentación - Derivación

Sabiendo que las ondas electromagnéticas se propagan bajo condiciones ideales, es decir sin dispersión. Si la señal de alta frecuencia es transmitida por un radiador isotrópico, la señal se

propaga uniformemente de manera omnidireccional (en todas las direcciones). Las áreas con la misma densidad de energía forman esferas ($A = 4\pi R^2$) alrededor del radiador. La misma cantidad de energía se propaga hacia la parte exterior en una superficie esférica incrementada, en un radio esférico incrementado, como muestra la figura 2-1 la densidad de potencia omnidireccional disminuye en la medida que se esparce el haz de manera geométrica. (Wolff, 2010)

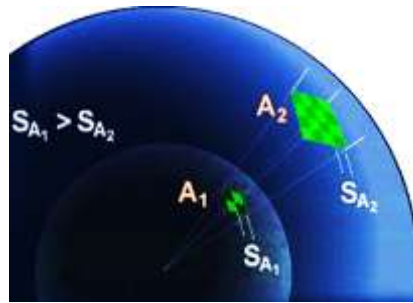


Figura 2-1. Densidad de potencia omnidireccional dispersa de manera geométrica.

Fuente:(Wolff, 2010).

La densidad de energía en la superficie de una esfera es inversamente proporcional al radio de la esfera, por lo tanto, a medida que aumenta la distancia de la fuente, la densidad de la potencia decrece, dando como resultado la fórmula que se muestra en la ecuación 1-1 para calcular la Densidad de Potencia Omnidireccional S_u .

$$S_u = \frac{P_s}{4\pi R_1^2} \quad (1-1)$$

Dónde:

P_s = Potencia transmitida [W]
 S_u = Densidad de Potencia Omnidireccional
 R_1 = Rango de la Antena - Objetivo [m]

Teniendo en cuenta que un segmento esférico emite igual radiación omnidireccional (en todas las direcciones, a una potencia de transmisión constante), si la potencia transmitida es redistribuida para suministrar más radiación en una dirección, entonces, esto resulta en un incremento de la densidad de la potencia en la dirección de la radiación. Esta ganancia es obtenida direccionando la potencia radiada, se expresa la ecuación 2-1 partiendo de la definición de la densidad de potencia direccional.

$$S_g = S_u G \quad (2-1)$$

Dónde:

$S_g =$ Densidad de la Potencia Direccional.

$S_u =$ Densidad de Potencia Omnidireccional.

$G =$ Ganancia de Antena.

En la práctica las antenas de los sistemas radares no son las que “irradian parcialmente” los radiadores isotrópicos. Las antenas del sistema radar deben tener un aumento de la antena de hasta 30 o 40 dB y tener un ancho pequeño de haz. (Ejemplo: Antena parabólica de plato o antena con arreglos de fase).

La detección de un objetivo no depende únicamente de la densidad de potencia en la ubicación del objetivo, si no también, se debe tener en cuenta la cantidad de potencia reflejada desde el objetivo hacia el radar. Para definir la potencia reflejada útil, es necesario conocer la sección transversal del radar σ , la cual depende de numerosos factores, concluyendo que un área más grande refleja más energía que un área más pequeña.

Partiendo de esto: La potencia reflejada P_r en un radar, depende de la densidad de la potencia S_u , el aumento de ganancia G de la antena y de la sección transversal variable del radar σ , en la ecuación 3-1 se describe el desarrollo de la fórmula de la potencia reflejada (en el sitio de recepción).

$$P_r = \frac{P_s}{4\pi R_1^2} G\sigma \quad (3-1)$$

Dónde:

$P_r =$ Potencia reflejada [W].

$\sigma =$ Sección transversal del radar [m^2].

$R_1 =$ Rango, distancia antena - objetivo [m].

Simplemente, un objetivo puede ser visto como un radiador debido a su potencia reflejada. En cuyo caso la potencia reflejada P_r es la potencia emitida.

Sabiendo que los ecos se encuentran en las mismas condiciones que la potencia transmitida en el sistema radar, la densidad de potencia producida en el receptor S_e está dada por:

$$S_e = \frac{P_r}{4\pi R_2^2} \quad (4-1)$$

Dónde:

$S_e =$ Densidad de potencia reflejada (en el sitio de recepción)

$P_r =$ Potencia reflejada [W]

$R_2 =$ Rango objetivo – antena [m]

En la figura 3-1 de muestra la relación grafica entre la ecuación 3-1 y 4-1.

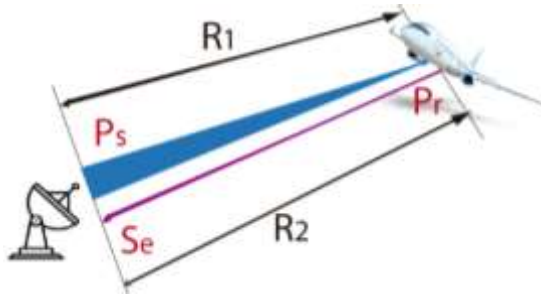


Figura 3-1. Conexión entre la ecuación 3-1 y 4-1.
Fuente:(Wolff, 2010).

La potencia recibida P_E en la antena del radar, como se señala en la ecuación 5-1, depende de la densidad de la potencia en el espacio de recepción S_e , y la apertura efectiva de antena A_W .

$$P_E = S_e A_W \quad (5-1)$$

Dónde:

$P_E =$ Potencia recibida [W]

$A_W =$ Apertura efectiva de antena [m^2]

La apertura efectiva de antena en el sistema radar se deriva del hecho de que una antena sufre pérdidas, por lo tanto, la potencia recibida en la antena del sistema radar no es igual a la potencia de entrada. En general, la eficiencia de la antena es aproximadamente de 0,6 a 0,7 (Eficiencia K_a).

Aplicada al área geométrica de la antena, en la ecuación 6-1 se expresa la apertura efectiva de la antena.

$$A_W = A K_a \quad (6-1)$$

Dónde:

$A_W =$ Apertura efectiva de la antena [m^2]

$A =$ Área geométrica de la antena [m^2]

$K_a =$ Eficiencia

La potencia recibida P_E como se presenta en la ecuación 7-1 puede ser calculada sustituyendo la ecuación 6-1 en la ecuación 5-1.

$$P_E = S_e A K_a \quad (7-1)$$

A partir de la ecuación 7-1 se obtiene la ecuación 8-1 en función de P_r sustituyendo S_e de la ecuación 4-1

$$P_E = \frac{P_r}{4\pi R_2^2} A K_a \quad (8-1)$$

La transmisión de ondas útiles como reflejadas (ecos) han sido vistas separadamente. Como próximo paso se puede considerar ambas, tanto la señal transmitida como la reflejada: ya que R_2 (objetivo - antena) es la distancia R_1 (antena - objetivo), entonces la ecuación 9-1a exhibe la sustitución de la ecuación 3-1 en la ecuación 8-1 y en la ecuación 9-1b la igualación de las distancias $R_2 = R_1$.

$$P_E = \frac{\frac{P_s}{4\pi R_1^2} G \sigma}{4\pi R_2^2} A K_a \quad (9-1a)$$

$$P_E = \frac{P_s G \sigma}{(4\pi)^2 R^4} A K_a \quad (9-1b)$$

La ecuación 10-1 muestra la ganancia de la antena G en función de la longitud de onda λ .

$$G = \frac{4\pi A K_a}{\lambda^2} \quad (10-1)$$

Partiendo de la ecuación de 9-1b se sustituye en esta la fórmula del área A de la antena, como se presenta la ecuación 11-1 posterior a simplificar la expresión obtenida.

$$P_E = \frac{P_s G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (11-1)$$

Despejando el rango R , de la ecuación 11-1, se expresa en la ecuación 12-1 la ecuación clásica del radar.

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_e (4\pi)^3}} \quad (12-1)$$

Para un sistema radar, la mayoría de los parámetros (P_s , G , λ) pueden ser considerados como una constante, ya que estos son sólo parámetros variables en rangos muy pequeños. La sección transversal del radar, por otro lado, varía en gran medida (para propósitos prácticos se puede asumir 1 m^2). (Wolff, 2010)

1.2. Antenas (Sistemas Radiantes)

La definición estándar en términos del IEEE y el Diccionario Webster's definen una antena como “un medio o dispositivo generalmente metálico (como una varilla o cable) para irradiar o recibir ondas de radio”. En otras palabras, la antena es la estructura de transición entre el espacio libre y

un dispositivo de guía como se muestra en la figura 4-1. El dispositivo de guía o línea de transmisión puede tomar la forma de una línea coaxial o una tubería hueca (guía de onda), y se utiliza para transportar energía electromagnética desde la fuente de transmisión a la antena, o desde la antena al receptor. (Balanis, 2012,p.1)

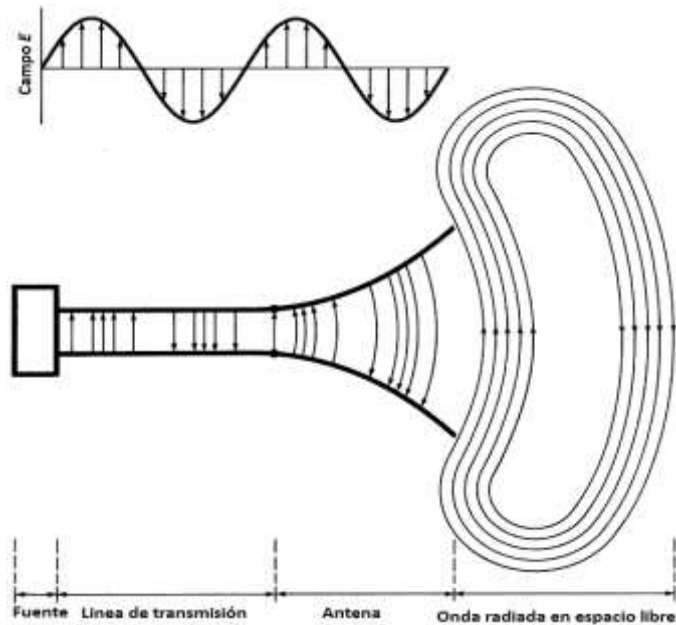


Figura 4-1. Antena como dispositivo de transición

Fuente: (Balanis, 2012,p.2)

Una línea de transmisión equivalente de Thevenin del sistema de antena de la Figura 4-1 en el modo de transmisión se muestra en la Figura 5-1 donde la fuente está representada por un generador ideal, la línea de transmisión está representada por una línea con impedancia característica Z_c , y la antena está representada por una carga Z_A [$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$] conectada a la línea de transmisión.

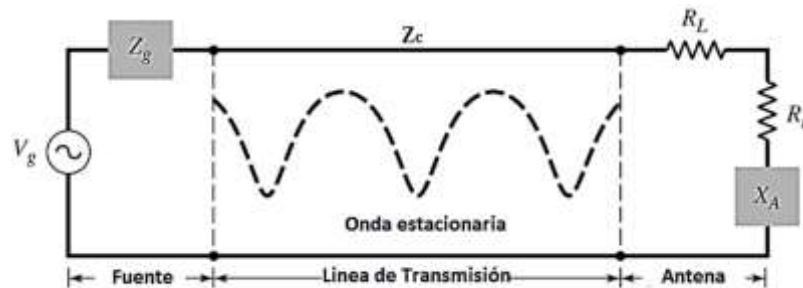


Figura 5-1. Línea de transmisión equivalente de Thevenin de antena en modo de transmisión.

Fuente: (Balanis, 2012,p.3)

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A \quad (13-1)$$

Dónde:

Z_A = impedancia de la antena (carga)

Z_c = impedancia característica

Z_g = impedancia de la fuente

V_g = voltaje de la fuente

R_L = resistencia de carga (conducción y las pérdidas dieléctricas)

X_A = reactancia

R_r = resistencia de radiación

La resistencia de carga R_L se usa para representar la conducción y las pérdidas dieléctricas asociadas con la estructura de la antena, mientras que R_r , conocida como resistencia a la radiación, se usa para representar la radiación de la antena. La reactancia X_A se usa para representar la parte imaginaria de la impedancia asociada con la radiación de la antena. (Balanis, 2012,p.3)

1.2.1. Tipos de antenas.

A. Antena de cable (Dipolo)

Las antenas de cable (dipolo) son fáciles de implementar y se ven prácticamente en todas partes: en automóviles, edificios, barcos, aviones, naves espaciales, etc. Hay varias formas de antenas de cable, como un cable recto (dipolo), bucle y hélice que se muestran en la Figura 6-1. Las antenas de bucle no solo necesitan ser circulares. Pueden tomar la forma de un rectángulo, un cuadrado, una elipse o cualquier otra configuración. El bucle circular es el más común debido a su simplicidad en la construcción. (Balanis, 2012,pp 3-4)

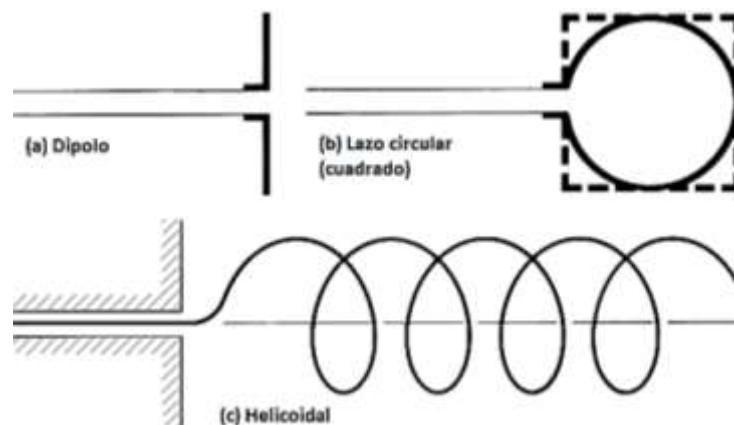


Figura 6-1. Configuración de antenas de cable (dipolo). (a) Antena dipolo, (b) Antena Bucle circular (cuadrado), (c) Antena helicoidal.

Fuente: (Balanis, 2012,pp 4-5)

B. Antenas de apertura

Las antenas de apertura pueden ser más familiares debido a la creciente demanda de formas más sofisticadas de antenas y la utilización de frecuencias más altas. Algunas formas de antenas de apertura se muestran en la Figura 7-1. Las antenas de este tipo son muy útiles para aplicaciones de aeronaves y naves espaciales, porque pueden montarse fácilmente en la cubierta de la aeronave o nave espacial. Además, pueden cubrirse con un material dieléctrico para protegerlos de las condiciones peligrosas del medio ambiente. (Balanis, 2012,pp 4-5)



Figura 7-1. Configuración de antenas de apertura. (a) Antena corneta piramidal, (b) Antena corneta cónica, (c) Guía de onda rectangular.

Fuente: (Balanis, 2012,p.5)

C. Antenas Microstrip (microcinta)

Estas antenas consisten en un parche metálico sobre un sustrato conectado a tierra. El parche metálico puede tomar muchas configuraciones diferentes, como se muestra en la Figura 8-1. Sin embargo, los parches rectangulares y circulares, que se muestran en la Figura 9-1, son los más populares debido a la facilidad de análisis y fabricación, y sus características de radiación atractivas. Las antenas de microstrip son compatibles con superficies planas y no planas, simples y económicas de fabricar utilizando tecnología moderna de circuito impreso, mecánicamente robustas cuando se montan en superficies rígidas, compatibles con diseños MMIC y muy versátiles en términos de frecuencia resonante, polarización, patrón e impedancia. Estas antenas se pueden montar en la superficie de aviones de alto rendimiento, naves espaciales, satélites, misiles, automóviles e incluso dispositivos móviles. (Balanis, 2012,pp 4-6)

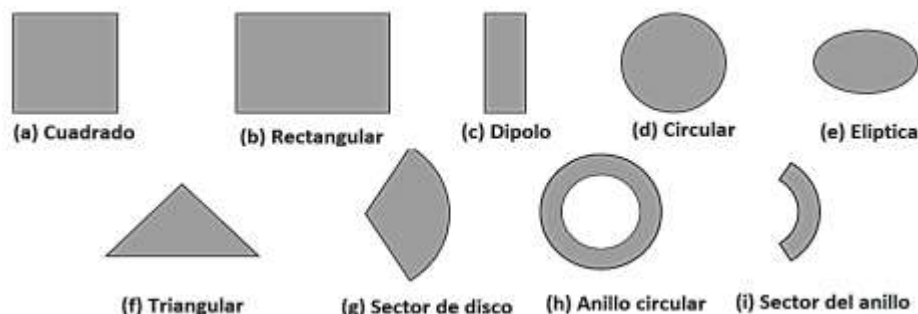


Figura 8-1. Formas representativas de elementos de parche microstrip

Fuente: (Balanis, 2012,p.813)

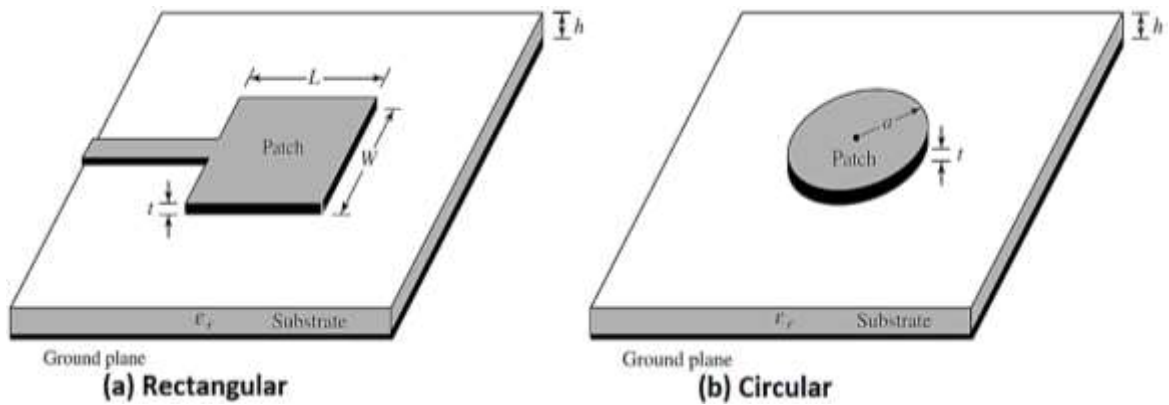


Figura 9-1. Antenas microstrip. (a) parche rectangular, (b) parche circular.
Fuente: (Balanis, 2012,p.6)

D. Arreglo de Antenas (Matriz)

Muchas aplicaciones requieren características de radiación que pueden no ser alcanzables por un solo elemento. Sin embargo, puede ser posible que un conjunto de elementos radiantes en una disposición eléctrica y geométrica (una matriz) dé como resultado las características de radiación deseadas. La disposición de la matriz puede ser tal que la radiación de los elementos se suma para dar un máximo de radiación en una dirección o direcciones particulares, mínimo en otros, o de otra manera, según se desee. En la figura 10-1 se muestran ejemplos típicos de matrices. Por lo general, el conjunto de términos se reserva para una disposición en la que los radiadores individuales están separados, como se muestra en las Figuras 10-1 (a – c). Sin embargo, el mismo término también se usa para describir un conjunto de radiadores montados en una estructura continua, como se muestra en la Figura 10-1 (d). (Balanis, 2012,pp 5-7)

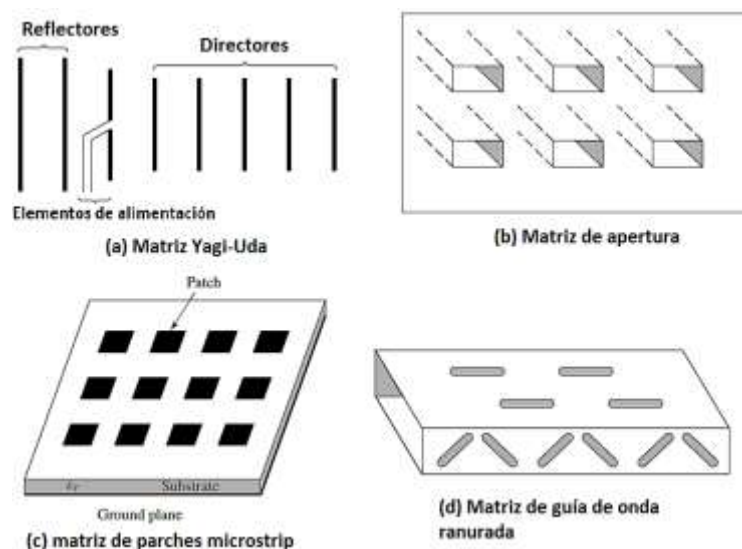


Figura 10-1. Configuraciones típicas de matriz de cable, apertura y microstrip

Fuente: (Balanis, 2012,p.7)

E. Antenas reflectoras

El éxito en la exploración del espacio exterior ha dado como resultado el avance de la teoría de antenas. Debido a la necesidad de comunicarse a grandes distancias, se tuvieron que utilizar formas sofisticadas de antenas para transmitir y recibir señales que debían recorrer millones de millas. Una forma de antena muy común para tal aplicación es un reflector parabólico. Tales grandes dimensiones son necesarias para lograr la alta ganancia requerida para transmitir o recibir señales después de millones de millas de viaje. Otra forma de reflector, aunque no es tan común como el parabólico, es el reflector de esquina.(Balanis, 2012,p.6)

F. Antenas de lentes

Las lentes se utilizan principalmente para colimar energía divergente incidente para evitar que se propague en direcciones no deseadas. Al moldear adecuadamente la configuración geométrica y elegir el material apropiado de las lentes, pueden transformar varias formas de energía divergente en ondas planas. Se pueden usar en la mayoría de las mismas aplicaciones que los reflectores parabólicos, especialmente a frecuencias más altas. Sus dimensiones y peso se vuelven extremadamente grandes a frecuencias más bajas. Las antenas de lentes se clasifican según el material con el que están construidas, o según su forma geométrica. En resumen, una antena ideal es aquella que irradiará toda la potencia que se le entrega desde el transmisor en la dirección o direcciones deseadas. En la práctica, sin embargo, tales actuaciones ideales no pueden lograrse, pero pueden abordarse de cerca. Hay varios tipos de antenas disponibles y cada tipo puede tomar diferentes formas para lograr las características de radiación deseadas para la aplicación particular.(Balanis, 2012,p.7)

1.2.2. Patrón de radiación

Se define como "una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región de campo lejano y se representa como una función de las coordenadas direccionales. Las propiedades de radiación incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización". La propiedad de radiación que más preocupa es la distribución espacial bidimensional o tridimensional de la energía radiada en función de la posición del observador a lo largo de una trayectoria o superficie de radio constante exhibido en la figura 11-1 como un conjunto conveniente de coordenadas.(Balanis, 2012,pp 27-28)

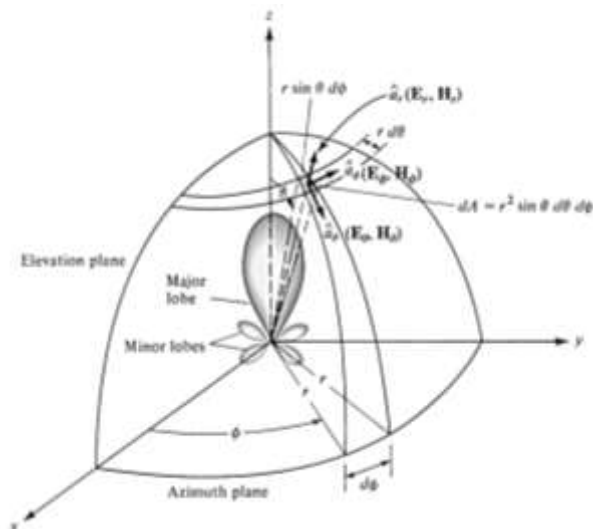


Figura 11-1. Sistema de coordenadas para análisis de antenas.
Fuente: (Balanis, 2012,p.28)

Una traza del campo eléctrico o magnético recibido en un radio constante se llama patrón de amplitud de campo. Por otro lado, un gráfico de la variación espacial de la densidad de potencia a lo largo de un radio constante se denomina patrón de amplitud de potencia. A menudo, los patrones de campo y potencia se normalizan con respecto a su valor máximo, produciendo patrones de campo y potencia normalizados. Además, el patrón de potencia generalmente se traza en una escala logarítmica o más comúnmente en decibelios (dB). Esta escala es usualmente deseable porque una escala logarítmica puede acentuar con más detalles aquellas partes del patrón que tienen valores muy bajos, designados como lóbulos menores. Para una antena, como se muestra en la figura 12-1(a-b) se describen las siguientes características de los diferentes patrones:

- El patrón de campo (en escala lineal) generalmente representa una gráfica de la magnitud del campo eléctrico o magnético en función del espacio angular.
- El patrón de potencia (en escala lineal) generalmente representa una gráfica del cuadrado de la magnitud del campo eléctrico o magnético en función del espacio angular.
- El patrón de potencia (en dB) representa la magnitud del campo eléctrico o magnético, en decibelios, en función del espacio angular.(Balanis, 2012,pp 28-29)

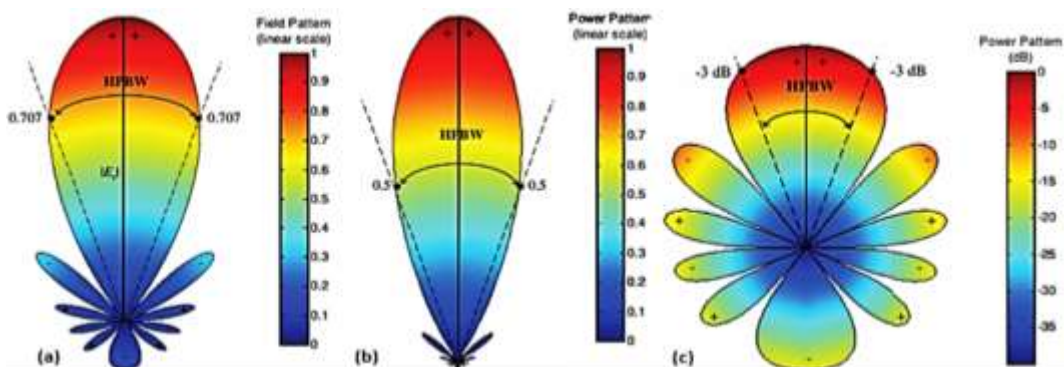


Figura 12-1. Patrón de radiación. (a) Patrón de campo normalizado bidimensional escala lineal, (b) patrón de potencia escala lineal, (c) patrón de potencia en dB.
Fuente: (Balanis, 2012,p.29)

1.2.2.1. Patrones isotrópicos, direccionales y omnidireccionales

A. Radiador isotrópico

Se define como "una antena hipotética sin pérdidas que tiene igual radiación en todas las direcciones". Aunque es ideal y no físicamente realizable, a menudo se toma como referencia para expresar las propiedades directivas de las antenas reales.

B. Antena direccional

Es aquella que tiene la propiedad de irradiar o recibir ondas electromagnéticas de manera más efectiva en algunas direcciones que en otras. Este término generalmente se aplica a una antena cuya directividad máxima es significativamente mayor que la de un dipolo de media onda". En la Figuras 13-1 se muestra un patrón direccional. (Balanis, 2012,pp 32-33)

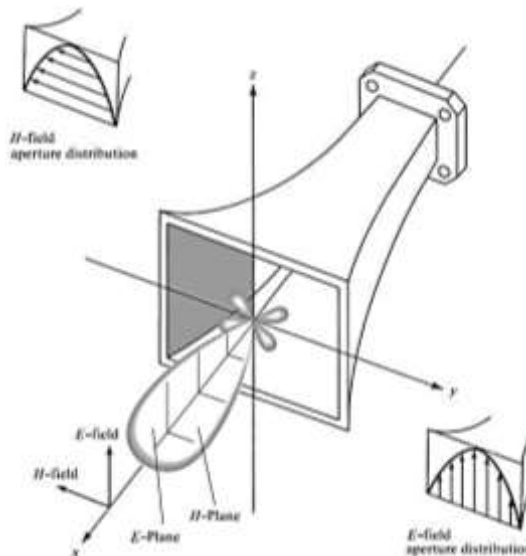


Figura 13-1. Patrones principales de los planos E y H para una antena bocina piramidal

Fuente: (Balanis, 2012,p.32)

C. Patrón omnidireccional

Se ve que el patrón en la Figura 14-1 no es direccional en el plano de acimut [$f(\phi), \theta = \pi/2$] y direccional en el plano de elevación [$g(\theta), \phi = \text{constante}$, designando este patrón como omnidireccional y se define como uno "que tiene un patrón esencialmente no direccional en un plano dado (en este caso en acimut) y un patrón direccional en cualquier plano ortogonal (en este caso en elevación)". Un patrón omnidireccional es entonces un tipo especial de patrón direccional.(Balanis, 2012,p.33)

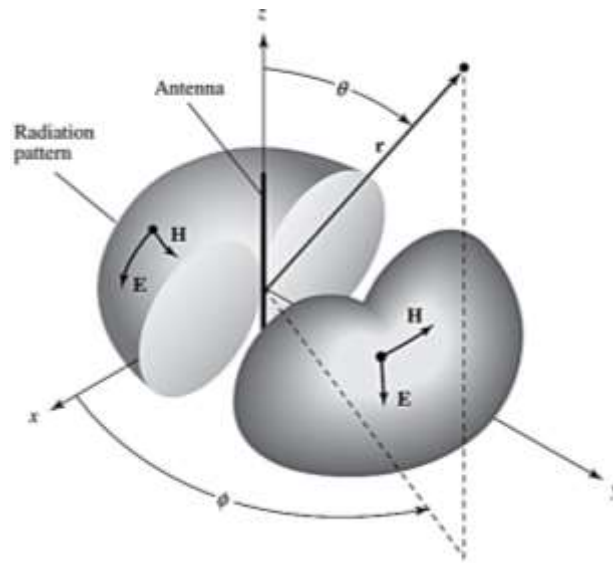


Figura 14-1. Patrón antena omnidireccional
Fuente: (Balanis, 2012,p.33)

1.2.2.2. Regiones de campo

El espacio que rodea una antena generalmente se subdivide en tres regiones: (a) regiones reactivas de campo cercano, (b) radiantes de campo cercano (Fresnel) y (c) regiones de campo lejano (Fraunhofer) como se muestra en la Figura 15-1(a-b). Estas regiones están designadas para identificar la estructura de campo en cada una. Aunque no se observan cambios abruptos en las configuraciones de campo a medida que se cruzan los límites, existen diferencias claras entre ellos.

A. La región reactiva de campo cercano

Se define como "la porción de la región de campo cercano que rodea inmediatamente a la antena en la que predomina el campo reactivo". Para la mayoría de las antenas, el límite exterior de esta región se considera comúnmente existente a una distancia $R < 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$ desde la superficie de la antena, donde λ es la longitud de onda y D es la dimensión más grande de la antena. "Para un dipolo muy corto, o un radiador equivalente, el límite exterior comúnmente se considera que existe a una distancia $\lambda/2\pi$ de la superficie de la antena".

B. La región de campo cercano radiante (Fresnel)

Se define como "esa región del campo de una antena entre la región reactiva de campo cercano y la región de campo lejano en la que predominan los campos de radiación y en la que la distribución del campo angular depende de la distancia desde la antena. Si la antena tiene una dimensión máxima que no es grande en comparación con la longitud de onda, esta región puede no existir.

Para una antena enfocada en el infinito, la región de campo cercano radiante a veces se denomina región de Fresnel por analogía con la terminología óptica. Si la antena tiene una dimensión total máxima que es muy pequeña en comparación con la longitud de onda, es posible que esta región de campo no exista". Se considera que el límite interno es la distancia $R \geq 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$ y el límite externo la distancia $R < 2D^2/\lambda$ donde D es la dimensión más grande de la antena. Este criterio se basa en un error de fase máximo de $\pi/8$. En esta región, el patrón de campo es, en general, una función de la distancia radial y el componente del campo radial puede ser apreciable.

C. La región de campo lejano (Fraunhofer)

Se define como "esa región del campo de una antena donde la distribución del campo angular es esencialmente independiente de la distancia desde la antena. Si la antena tiene una dimensión global máxima D , la región de campo lejano se considera que existe a distancias mayores que $2D^2/\lambda$ desde la antena, siendo λ la longitud de onda. Los patrones de campo lejano de ciertas antenas, como las antenas reflectoras multihaz, son sensibles a las variaciones de fase en sus aperturas. Para estas antenas $2D^2/\lambda$ puede ser inadecuado. En los medios físicos, si la antena tiene una dimensión total máxima, D , que es grande en comparación con $\pi/|\gamma|$, la región de campo lejano puede tomarse para comenzar aproximadamente a una distancia igual a $|\gamma| D^2/\pi$ antena, γ siendo la constante de propagación en el medio. (Balanis, 2012, pp 34-35)

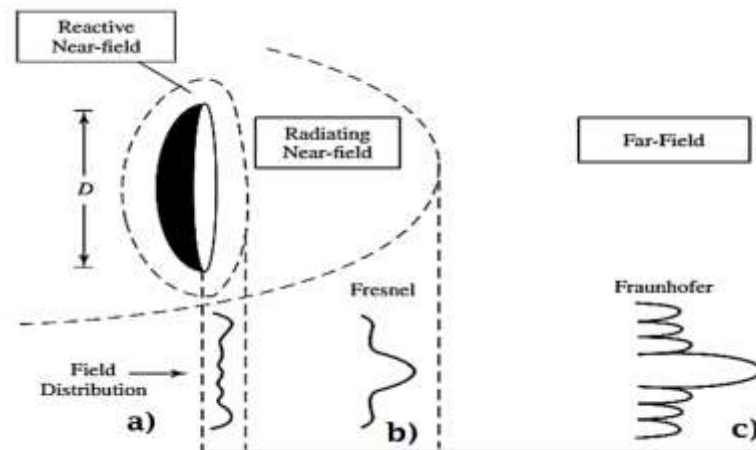


Figura 15-1. Regiones de campo de una antena. (a) región reactiva de campo cercano, (b) región radiante de campo cercano (Fresnel), (c) región de campo lejano (Fraunhofer).

Fuente: (Balanis, 2012, p.35)

1.2.3. Directividad

La directividad de una antena se define como "La relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena y la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones. La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . Si no se especifica la dirección, la dirección de la intensidad de radiación máxima está

implícita". Dicho de manera más simple, la directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación de su intensidad de radiación en una dirección dada sobre la de una fuente isotrópica. En forma matemática, se describe como:

En la ecuación 14-1 se detalla la intensidad de radiación de una fuente isotrópica como:

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (14-1)$$

La ecuación de la directividad se expone en la ecuación 15-1, posteriormente se obtiene la ecuación 16-1 de la directividad en función de la *intensidad de radiación de la fuente isotrópica* sustituyendo la ecuación 14-1 en la 15-1.

$$D = \frac{U}{U_0} \quad (15-1)$$

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (16-1)$$

Dónde:

D = directividad (sin dimensiones)

D_0 = directividad máxima (sin dimensiones)

U = intensidad de radiación (W / unidad de ángulo sólido)

U_{max} = intensidad de radiación máxima (W / unidad de ángulo sólido)

U_0 = intensidad de radiación de la fuente isotrópica (W / unidad de ángulo sólido)

P_{rad} = potencia radiada total (W)

Si no se especifica la dirección, implica la dirección de la intensidad máxima de radiación en la ecuación 17-1 se muestra la directividad máxima.

$$D_{max} = D_0 = \frac{U|_{max}}{U_0} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (17-1)$$

Para una fuente isotrópica, es muy obvio a partir de (14-1) o (15-1) que la directividad es la unidad ya que U , U_{max} y U_0 son todos iguales entre sí. Para antenas con componentes de polarización ortogonal, se define la directividad parcial de una antena para una polarización dada en una dirección dada como "esa parte de la intensidad de radiación correspondiente a una polarización dada dividida por la intensidad de radiación total promediada en todas las direcciones". Definición de la directividad parcial, luego en una dirección dada "la directividad total es la suma de las directividades parciales para dos polarizaciones ortogonales cualesquiera". Para un sistema de coordenadas esféricas en la ecuación 18-1 se expresa la directividad máxima total D_0 para los componentes ortogonales θ y ϕ de una antena.

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (18-1)$$

En las ecuaciones 19-1(a-b) se exhiben las directividades parciales D_θ y D_ϕ .

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (19-1a)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (19-1b)$$

Dónde:

U_θ = intensidad de radiación en una dirección dada contenida en el componente de campo θ

U_ϕ = intensidad de radiación en una dirección dada contenida en el componente de campo ϕ

$(P_{rad})_\theta$ = potencia radiada en todas las direcciones contenidas en el componente de campo θ

$(P_{rad})_\phi$ = potencia radiada en todas las direcciones contenidas en el componente de campo ϕ

(Balanis, 2012, pp 44-45).

Software Defined Radio (SDR)

1.2.4. Definición SDR

SDR por sus siglas “Radio Definida por Software” (en inglés Software Defined Radio), proporciona una funcionalidad de radio muy flexible evitando el uso de dispositivos y circuitos analógicos fijos, específicos del sistema de radio. SDR es un sistema que se basa en el procesamiento de señales digitales, basado en software siendo este su principal característica, donde los componentes de hardware como filtros, mezcladores, detectores, moduladores, demoduladores, entre otros, son implementados en software, utilizando un ordenador, además de componentes de radio frecuencia (RF) y parámetros configurables por software, siendo una plataforma de radio flexible y genérica que opera en los principales anchos de banda en un extenso rango de frecuencias, utilizando diversos tipos de modulaciones.

El desarrollo de estructuras SDR y hardware virtuales que se están desarrollando actualmente. Inicialmente, se prevé que SDR sea una solución prometedora para problemas de interoperabilidad, conectividad global sin problemas, estándares múltiples y modos múltiples. También en paralelo, la funcionalidad de los dispositivos inalámbricos aumenta y se vuelven cada vez más sofisticados, SDR se ha propuesto principalmente para realizar dispositivos inalámbricos multimodo y multiestándar, en el gráfico 2-1 se muestra cada uno de los procesos de un sistema SDR. (Arslan, 2007, pp. 109-112)

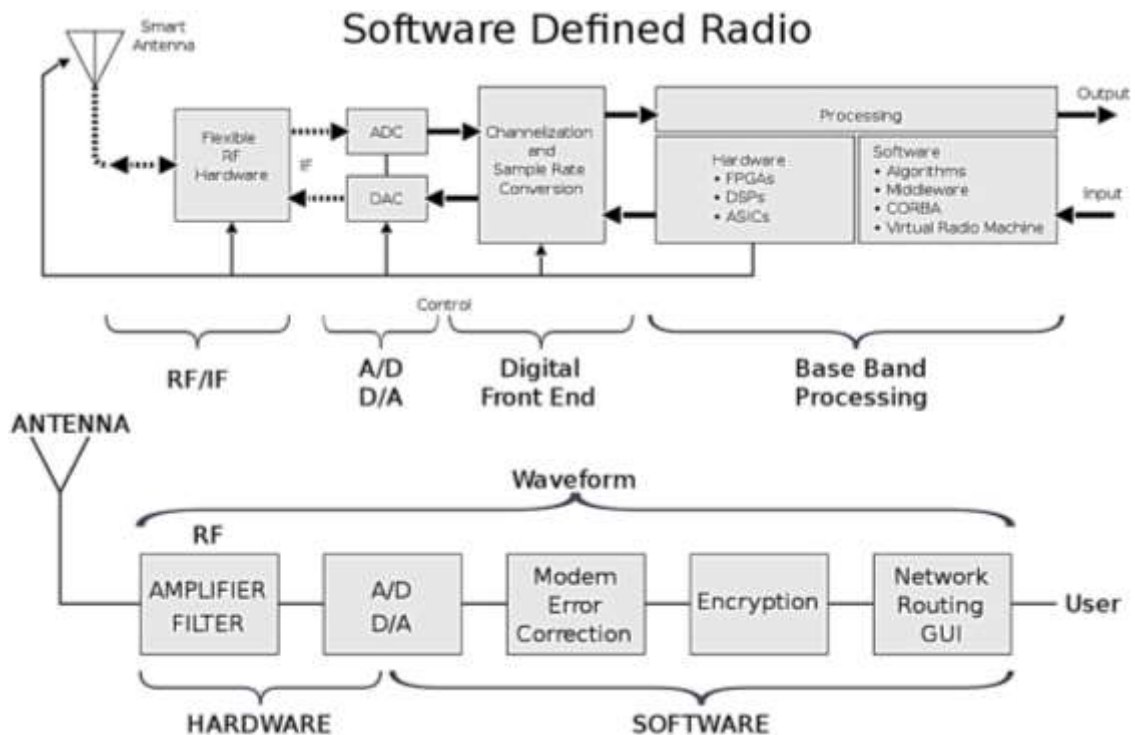


Gráfico 2-1. Diagrama de bloques concepto SDR

Fuente: (Topituuk, 2009).

1.2.5. *Software Defined Radar (SDRadar)*

El radar definido por software (SDRadar), es un tipo especial de sistema, versátil en operaciones y componentes, originalmente en sistemas radares implementados con hardware específico, es decir, mezcladores, filtros, moduladores y demoduladores, en este sistema estas operaciones se desarrollan en términos de módulos de software, cada fase mostrada en el gráfico 3-1. Este medio conlleva numerosas ventajas como:

- Capacidad de crear un "radar multipropósito"
- Capacidad de reutilizar hardware
- Fácil implementación del procesamiento de señales
- Reducción considerable de los costos de producción. (Costanzo et al., 2014)
- Los módulos configurados por software permiten realizar rápidamente prototipos y probar o validar radares avanzados de elección con un conjunto común de hardware disponible.
- Gran disponibilidad de módulos de radio definidos por software. Por lo tanto, esto ahorrará una gran cantidad de presupuesto y de dinero, debido a la facilidad en la integración de los módulos listos.
- Ideal para el análisis de señales de radio con un ancho de banda amplio.

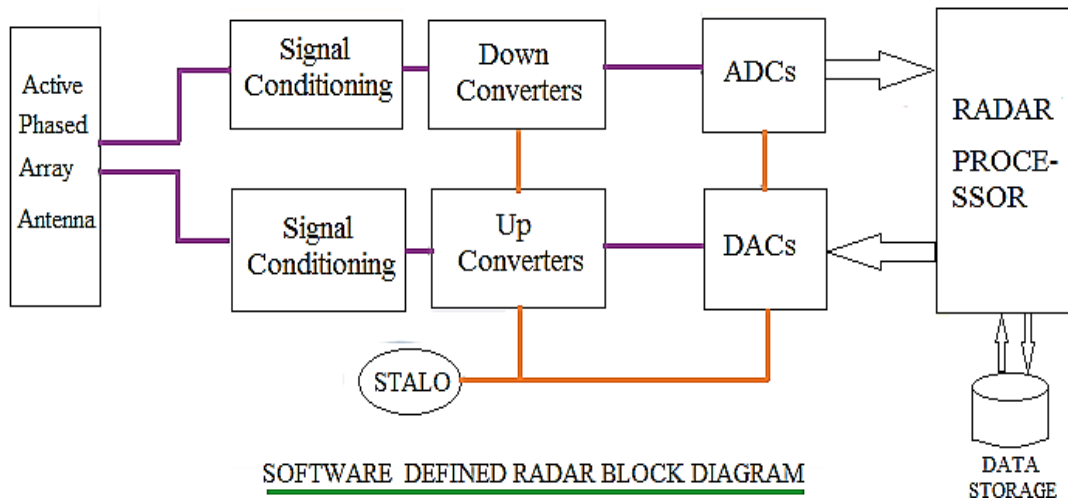


Gráfico 3-1. Diagrama de bloques de SDRadar (Radar definido por software).
Fuente: (WirelessWorld,2012)

Sección RF – Microondas

consta de módulos de acondicionamiento de señal, convertidores ascendentes y convertidores descendentes, osciladores locales y antena de matriz activa por fases.

- Módulos de acondicionamiento de señal: son canales múltiples que realizan operaciones en señal analógica.
- Convertidores ascendentes: son DUC, es decir, convertidores digitales ascendentes.
- Convertidores reductores: son DDC, es decir, convertidores reductores digitales.
- Osciladores locales: son osciladores locales altamente estables. Se utilizan para proporcionar una sincronización muy estrecha entre DUC, DDC, DAC y ADC.
- Antena de matriz en fase activa: esta matriz de antena se encarga de la transmisión y recepción de múltiples señales de radio.

Sección IF / Banda base

Consiste en ADC y DAC de muestra alta. Los ADC / DAC admiten un ancho de banda de señal de entrada amplio. Los ADC / DAC de alta frecuencia de muestreo se pueden usar para diseños de transmisor de muestreo directo y receptor de muestreo directo.

- ADC: realiza conversión de analógico a digital. Procesa los datos recibidos convertidos. La salida de datos de ADC se entrega al procesador para su posterior procesamiento.
- DAC: realiza una conversión digital a analógica. Procesa los datos de radar que se transmitirán y proporciona entrada a los convertidores ascendentes.

Procesador de radar y módulos de almacenamiento de datos.

- Procesador de radar: los complejos algoritmos de procesamiento de señal se desarrollan y portan en el procesador utilizado en el radar definido por software.
- Los módulos de almacenamiento de datos se encargan de proporcionar almacenamiento de resultados según los requisitos del usuario.

Dado que la plataforma del radar está completamente definida por software, puede cambiar fácilmente entre diferentes modos de operación simplemente modificando las formas de onda transmitidas y las tareas de procesamiento de señal. En los últimos años, el desarrollo de esta nueva tecnología de software y hardware abierto ha tenido un gran impacto en la comunidad de investigación. Muchos científicos e investigadores están centrando su atención en el sistema SDRadar, ya que muchos bancos de pruebas y aplicaciones se han desarrollado al considerar la placa base Universal Software Radio Peripheral (USRP) como base de hardware y GNU Radio, un proyecto de radio de código abierto definido por software, como herramienta de software para implementar aplicaciones SDRadar muy sofisticadas y de bajo costo. (Costanzo et al., 2014).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se expone las metodologías utilizadas para el diseño, construcción e implementación de los dos sistemas radiantes directivos aplicados a la tecnología SDRadar, en el que se explica los diferentes métodos de investigación y las técnicas usadas.

2.1. Metodología de la investigación.

El método científico es el ideal para la presente investigación, para el desarrollo de los objetivos propuestos.

2.1.1. Tipo de investigación.

Para el presente trabajo de titulación es pertinente utilizar más de un tipo de investigación, para su desarrollo ideal, siendo principalmente la investigación descriptiva, bibliográfica y de campo las elegidas para conseguir un óptimo resultado.

2.1.1.1. Investigación bibliográfica.

Este tipo de investigación es la ideal para el desarrollo del presente trabajo de titulación, ya que proporciona datos obtenidos en trabajos previos basados en la tecnología SDRadar, con la diferencia de los requerimientos en objetivos ya expuestos.

Posteriormente se recabó información acerca de las tecnologías y dispositivos inmersos en esta investigación, los parámetros a tener en cuenta (diseños, construcciones, implementaciones, mediciones y comparaciones), para desarrollar con eficacia la investigación y desarrollo del trabajo de titulación.

2.1.1.2. Investigación descriptiva.

Para la descripción paso a paso del desarrollo de este trabajo de titulación este tipo de investigación es la ideal, describiendo como de realizaron los diseños, la construcción e implementación de los sistemas para cumplir los objetivos establecidos.

2.1.1.3. Investigación de campo.

Este tipo de investigación es indispensable ya que los objetivos de este trabajo de titulación requieren pruebas, mediciones y comparaciones utilizando dispositivos de caracterización de sistemas de propagación, análisis de radio frecuencias y aplicados a la tecnología SDRadar, recolectando muestras, datos y resultados de la implementación de los diferentes sistemas.

2.1.2. Técnicas de investigación

La técnica a utilizar en la investigación es la de campo, ya que las diferentes mediciones, toma de muestras y comparaciones son en tiempo real.

2.1.2.1. Población y Muestra

Conforme se realizaron las mediciones, cada una de estas se almacenan en una matriz, para esta investigación se utilizó estas muestras para su procesamiento y comparación, así determinar los objetivos del presente trabajo.

2.1.2.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La técnica utilizada es la observación directa, implementando el sistema SDRadar para obtener las muestras, mismas que son obtenidas exponiendo el sistema a varios materiales reflectivos de un ambiente de laboratorio, además cada sistema de radiación caracterizado mediante el analizador de redes vectoriales, para su respectiva comparación.

2.1.2.3. Técnicas de procesamiento y análisis de Datos

El procesamiento y comparación de las muestras obtenidas de las medicaciones del sistema radar en varios materiales se programaron utilizando el software Labview, en una matriz para su posterior análisis.

2.1.2.4. Validación y confiabilidad

Para la validación y constatación de cada medición se utilizó el medio manual, comprobando así las distancias medidas directamente mediante una cinta topográfica, obteniendo datos reales. Para la variación de materiales se utilizaron los de un ambiente de laboratorio como una placa metálica, una pared y un pizarrón.

2.1.3. Metodología del diseño y construcción de los sistemas radiantes directivos

A continuación, se detallan los pasos del proceso de diseño y construcción de los dos sistemas radiantes directivos.

- 1) Para el diseño del sistema arreglo de antenas parche MxN microstrip se analiza y establece los parámetros requeridos para SDRadar, además la esquematización se realiza en base a software utilizando el CST Studio.
- 2) El sistema de antenas bocina piramidal se diseña en base a software utilizando el Ansoft HFSS, previamente analizando y estableciendo los parámetros para ser implementado con SDRadar.
- 3) La construcción del sistema arreglo de antenas se realiza con el plotter de circuitos impresos CNC ProtoMat LPKF S103 propiedad de la ESPOCH para el freseo (desgaste del cobre de la placa FR4) de las antenas.
- 4) Para el sistema de antenas bocina piramidal se construye a partir de las plantillas exportadas del software de diseño, para ser cortadas por la CNC ProtoMat LPKF S103, y ensambladas para su terminado.
- 5) Una vez construidos los dos sistemas se protegen en sus respectivos contenedores y se obtienen los accesorios necesarios para su implementación o utilización.

2.1.4. Software y equipamiento (construcción y pruebas)

2.1.4.1. CST STUDIO Suite

Es un paquete de software de análisis 3D EM de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM), los tres pilares de CST son precisión, velocidad y facilidad de uso. Los solucionadores de campos electromagnéticos para aplicaciones en todo el espectro EM están contenidos dentro de una única interfaz de usuario en CST Studio Suite que se muestra en la figura 1-2. Los solucionadores se pueden acoplar para realizar simulaciones híbridas, brindando a los ingenieros la flexibilidad de analizar sistemas completos formados por múltiples componentes de una manera eficiente y directa.

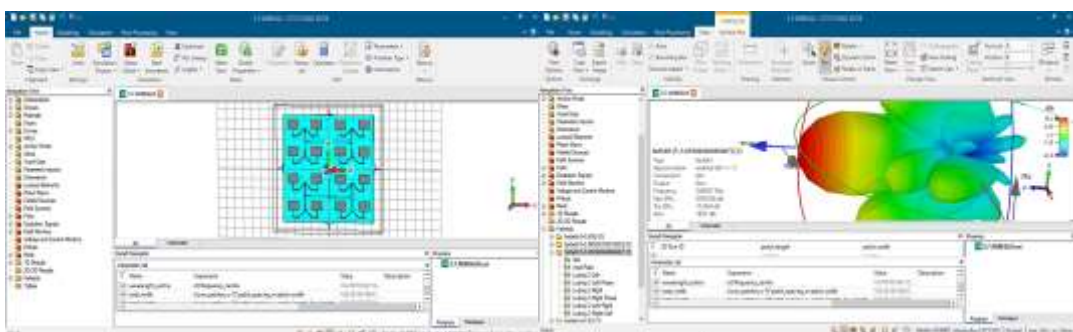


Figura 1-2. Interface CST STUDIO Suite
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

El codiseño con otros productos SIMULIA permite integrar la simulación EM en el flujo de diseño e impulsa el proceso de desarrollo desde las primeras etapas. Los temas comunes de análisis EM incluyen el rendimiento y la eficiencia de antenas y filtros, compatibilidad electromagnética e interferencia (EMC / EMI), exposición del cuerpo humano a campos EM, efectos electromecánicos en motores y generadores, y efectos térmicos en alta potencia.

CST Studio Suite se utiliza en empresas líderes de tecnología e ingeniería de todo el mundo. Ofrece considerables ventajas de producto a mercado, facilitando ciclos de desarrollo más cortos y costos reducidos. La simulación permite el uso de prototipos virtuales. El rendimiento del dispositivo se puede optimizar, identificar posibles problemas de cumplimiento y mitigarlos al principio del proceso de diseño, se puede reducir la cantidad de prototipos físicos necesarios y minimizar el riesgo de fallas y retiros de pruebas(Simulia, 2010).

2.1.4.2. ANSYS HFSS

ANSYS HFSS (simulador de estructura de alta frecuencia) es un software de simulación electromagnética (EM) 3D para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia como antenas, conjuntos de antenas, componentes de RF o microondas, interconexiones de alta velocidad, filtros, conectores, paquetes de circuitos integrados y placas de circuitos impresos. Los ingenieros de todo el mundo utilizan ANSYS HFSS para diseñar dispositivos electrónicos de alta frecuencia y alta velocidad que se encuentran en sistemas de comunicaciones, sistemas de radar, sistemas avanzados de asistencia al conductor ADAS), satélites, productos de Internet de las cosas (IoT) y otros RF y digitales de alta velocidad dispositivos. En la figura 2-2a se expone la portada de inicio del HFSS y en la figura 2-2b la interface de trabajo del HFSS.

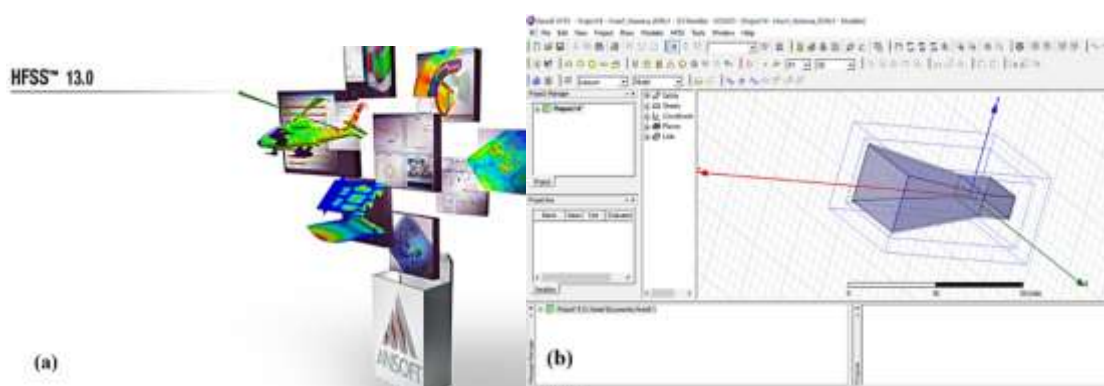


Figura 2-2. CST Studio. (a)Inicio HFSS, (b) Interface HFSS.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

HFSS emplea solucionadores versátiles y una GUI intuitiva para brindar un rendimiento incomparable y una visión profunda de todos sus problemas de EM 3D. A través de la integración

con las herramientas de dinámica térmica, estructural y de fluidos de ANSYS, HFSS proporciona un análisis multifísico potente y completo de productos electrónicos, asegurando su confiabilidad térmica y estructural. HFSS es sinónimo de precisión y confiabilidad estándar de oro para abordar los desafíos de EM 3D en virtud de su técnica de malla de adaptación automática y solucionadores sofisticados, que pueden acelerarse mediante la tecnología de computación de alto rendimiento (HPC).

El conjunto de simulación ANSYS HFSS consta de un conjunto integral de solucionadores para abordar diversos problemas electromagnéticos que varían en detalle y escala desde componentes de CI pasivos hasta análisis EM de escala extremadamente grande, como escenas de radar automotriz para sistemas ADAS. Su refinamiento de malla adaptable automático confiable le permite enfocarse en el diseño en lugar de perder tiempo determinando y creando la mejor malla. Esta automatización y precisión garantizada diferencia a HFSS de todos los demás simuladores EM, que requieren control manual del usuario y múltiples soluciones para garantizar que la malla generada sea adecuada y precisa. ANSYS HFSS es la principal herramienta EM para I + D y prototipos de diseño virtual. Reduce el tiempo del ciclo de diseño y aumenta la fiabilidad y el rendimiento.(ANSYS, 2015)

2.1.4.3. LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico, para el diseño de sistemas de control, adquisición de datos e instrumentación. Labview como se presenta en la figura 3-2, permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Permite diseñar especificando un sistema funcional, su diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. Labview es compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como Matlab. Tiene la ventaja que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).

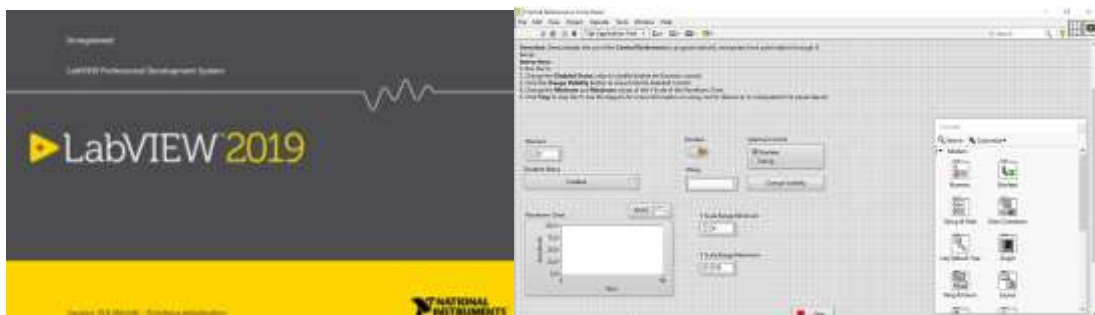


Figura 3-2. Inicio e Interface Labview
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Aplicaciones

Su mayor aplicación son sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser sistemas de monitoreo, procesos de control industrial y laboratorios para clases en universidades. Labview es muy utilizado en procesamiento digital de señales (wavelets, FFT, Total Distorsion Harmonic TDH), generación de señales, procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, automatización, manipulación de imágenes y audio, diseño de filtros digitales, entre otras, etc.(Roncancio & Cifuentes, 2000)

2.1.4.4. Plotter de circuitos impresos PCB ProtoMat LPKF S103

Fabricante: LPKF Laser & Electronics.

Este plotter presenta opciones para manejar la estructuración, el corte y muchas otras tareas de creación de prototipos para placas de una capa y multicapa. Maneja varias aplicaciones de creación de prototipos con facilidad. Sus capacidades de alta velocidad acomodan estructuras tan pequeñas como 100 μm , en la figura 4-2 se muestra el plotter ProtoMat LPKF S103 de circuitos impresos.(LPKF, 2019)



Figura 4-2. Plotter ProtoMat LPKF S103
Fuente: (LPKF, 2019)

A. Características del LPKF ProtoMat S103:

El ProtoMat S103 es el modelo más avanzado de la serie S. El sistema totalmente equipado es adecuado para todas las aplicaciones, incluidas las placas multicapa y RF. El limitador de profundidad de trabajo neumático sin contacto permite mecanizar sustratos con superficies delicadas. Es un sistema confiable y fácil de usar para una producción de prototipos rentable y de alta calidad, con un husillo de alta velocidad (60 000 rpm), resolución ultra fina (0,5 μm) y precisión ($\pm 0,02$ mm)

- Portaherramientas de liberación rápida simple
- Gabinete acústico para un funcionamiento silencioso

- Cambio automático de herramienta (15 herramientas)
- Ancho de fresado automático ajuste
- Reconocimiento fiducial óptico (cámara)
- La velocidad más alta disponible (100 000 rpm)
- Limitador de profundidad de trabajo neumático
- Mesa de vacío(LPKF, 2019)

B. Aplicaciones

LPKF ProtoMats son herramientas esenciales para desarrollo y producción de pequeños lotes de prototipos de PCB. Además, ProtoMats se puede utilizar para una variedad de aplicaciones además de "simplemente" estructurar placas de circuitos.

- Estructurando Placas de Circuito LPKF ProtoMats desintegra la estructura de PCB en el sustrato totalmente recubierto. Los husillos de alta velocidad que van de 60 000 a 100 000 rpm, una resolución tan fina como 0.25 μm (0.01 Mil) y una repetibilidad extremadamente alta aseguran estructuras ultrafinas. En aplicaciones de RF y microondas, el ProtoMat S103 muestra su alta velocidad de huso al máximo al lograr resultados de estructuración extremadamente limpios.
- Trabajando con Placas de Circuitos Flex y Rigid-flex
- Depaneling, eliminación de paneles.
- Grabado / Corte de plásticos y aluminio
- Fresado de plantillas de pasta de soldadura(LPKF, 2019)

2.1.4.5. Analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight

Fabricante: keysight Technologies

El VNA (vector network analyzer) o analizador de redes vectoriales es un dispositivo utilizado en telecomunicaciones ya que permite la caracterización de los dispositivos de RF, en concreto los parámetros de dispersión o “Scattering”. El analizador de redes vectoriales E5071C ENA de Keysight presentado en la figura 5-2, ofrece estándares de velocidad, precisión y versatilidad para el análisis de redes de RF. Diseñado con una amplia gama de capacidades de medición para satisfacer múltiples necesidades de análisis de red, el ENA ofrece eficiencia y flexibilidad tanto para aplicaciones de fabricación como de I + D en industrias como comunicación inalámbrica, automotriz, semiconductores y médica. El analizador E5071C-2K5 posee dos puertos de prueba de 300 kHz a 20 GHz con conector polarizado.



Figura 5-2. Keysight Vector Network Analyzer E5071C-2K5
Fuente: (Keysight, 2018)

A. Calibración del VNA

Es un proceso meticuloso para el óptimo desempeño del VNA, hay que tener en cuenta la impedancia a trabajar de 50 o 75 Ohms según su aplicación, este proceso depende el parámetro de scattering a medir.

El set de calibración incluye tres dispositivos de prueba:

- 1) OPEN (red abierta)
- 2) SHORT (red en corto circuito)
- 3) LOAD (red conectada)

Estos dispositivos se van conectando a los puertos de prueba sistemáticamente en orden, para que el VNA pueda comparar entre estos tres estados, para guardar estos datos en el registro respectivo, para que estos sean calibrados en el momento que se realice una modificación en la red de estudio.

B. Características

- Amplia cobertura de frecuencia: 9 kHz a 20 GHz
- Bajo ruido de rastreo: <0.004 dB rms a 70 kHz IFBW
- Amplio rango dinámico: > 123 dB
- Velocidad de medición rápida: 9 ms para 401 puntos con corrección de errores
- Estabilidad de alta temperatura: 0.005 dB / ° C 2 o 4 puertos, más configuración multipuerto flexible de hasta 22 puertos con E5092A
- El entorno de programación VBA incorporado permite un alto rendimiento y una personalización de la interfaz de usuario
- Potente análisis y corrección de errores.
- Caracterización avanzada de mezcladores (como la calibración del mezclador vectorial) y amplificadores con modo de desplazamiento de frecuencia (opcional)
- Caracterización avanzada de interconexiones seriales de alta velocidad con análisis de dominio de tiempo mejorado (opcional)

- Las actualizaciones están disponibles para todas las opciones de E5071C en cualquier momento.(Keysight, 2018)

2.1.4.6. Analizador de espectros MS2724C

Fabricante: Anritsu

El analizador de espectro portátil MS2724C de alto rendimiento de Anritsu mostrado en la figura 6-2, proporciona al profesional el rendimiento necesario para las mediciones más exigentes en entornos hostiles de RF y físicos. Ya sea para monitoreo de espectro, prueba de transmisión, análisis de interferencia, mediciones de RF y microondas, cumplimiento normativo o mediciones de redes inalámbricas y Wi-Fi, el Spectrum Master es el instrumento ideal para realizar mediciones rápidas y confiables, en las tablas 1-2 y 2-2 se presentan las especificaciones de frecuencia y ancho de banda respectivamente en el que opera el analizador de espectros Anritsu MS2724C.(Anritsu, 2013)



Figura 6-2. Analizador de espectros Anritsu MS2724C
Fuente:(Anritsu, 2013)

Frecuencia

Tabla 1-2: Tabla de especificaciones de frecuencia del analizador de espectros Anritsu MS2724C

Rango de frecuencia	9 kHz a 20 GHz (sintonizable a 0 Hz), preamplificador 100 kHz a 20 GHz
Resolución de sintonización	1 Hz
Rango de frecuencia	10 Hz a 20 GHz, incluido el rango cero
Tiempo de barrido	de 10 μ s a 600 segundos en intervalo cero
Precisión del tiempo de barrido	\pm 2% en cero

Fuente: (Anritsu, 2013)

Tabla 2-2: Tabla de especificaciones de ancho de banda del analizador de espectros Anritsu MS2724C

Ancho de banda de resolución (RBW)	1 Hz a 10 MHz en 1-3 secuencia $\pm 10\%$ (-3 dB de ancho de banda)
Ancho de banda de video (VBW)	1 Hz a 10 MHz en secuencia 1-3 (ancho de banda de -3 dB)
RBW con detección de cuasi-pico	200 Hz, 9 kHz, 120 kHz (ancho de banda de -6 dB)
VBW con detección de cuasi-pico automático	VBW está activado, RBW / VBW = 1

Fuente: (Anritsu, 2013)

Características Principales

- Analizador de interferencias: espectrograma, intensidad de señal, RSSI
- Rango dinámico: > 104 dB en 1 Hz RBW
- DANL: -160 dBm en 1 Hz RBW
- Ruido de fase: -100 dBc / Hz @ 10 kHz de compensación a 1 GHz
- Precisión de frecuencia: ± 25 ppb con GPS activado
- Ancho de banda de resolución de 1 Hz a 10 MHz (RBW)
- Trazas: Normal, retención máxima, retención mínima, promedio, número de promedios
- Detectores: pico, negativo, muestra, cuasi pico y verdadero valor eficaz
- Marcadores: 6, cada uno con un marcador Delta, o 1 referencia con 6 deltas
- Líneas de límite: hasta 40 segmentos con creación de sobres con un botón
- Trace Save-on-Event: cruce de línea límite o barrido completo (Anritsu, 2013)

2.1.4.7. Tarjeta NI USRP-2932

Fabricante: National Instruments

Dispositivo de SDR (Radio Definido por Software) USRP, la tarjeta NI USRP-2932 que se muestra en la figura 7-2, posee un ancho de Banda de 20 MHz, 400 MHz a 4.4 GHz, además GPS Incluido. El USRP-2932 es un transceptor de RF ajustable con un ADC (convertidor analógico-digital) de alta velocidad y un DAC (convertidor digital-analógico) para la transmisión de señales de banda base I y Q a una PC principal por un puerto Gigabit Ethernet, además se puede usar la NI USRP-2932 para las aplicaciones de comunicaciones: WiFi, WiMax, transceptores de banda S y transceptores de banda industrial, científica y médica (ISM) de 2.4 GHz.



Figura 7-2. Tarjeta NI USRP 2932
Fuente:(NATIONAL INSTRUMENTS, 2017)

Las soluciones de hardware y software de NI SDR impulsan la productividad, acortan el tiempo para obtener resultados y capacitan para diseñar tecnologías inalámbricas de próxima generación. Se pueden usar para una amplia variedad de aplicaciones que incluyen inteligencia de señales, comunicaciones militares, radar e investigación de comunicaciones. En aplicaciones e industrias como estas, los investigadores inalámbricos pueden aprovechar las herramientas de NI que se escalan desde sistemas de experimentación rentables para un solo usuario hasta sistemas MIMO masivos densamente capaces de acomodar cientos de radios y antenas. En software, NI proporciona flexibilidad y opciones de programación simplificada de FPGA de LabVIEW Communications System Design Suite a una amplia comunidad de software de código abierto a través de GNU Radio. En las tablas 3-2 y 4-2 se expone las especificaciones de transmisión y recepción respectivamente de la tarjeta NI USRP 2932. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019)

Transmisor

Tabla 3-2: Tabla de especificaciones de la USRP 2932 en Transmisión

Rango de frecuencia	400 MHz a 4.4 GHz	
Saltos de frecuencia	<1 kHz	
Potencia máxima de salida (P_{out})	50 mW a 100mw	(17 dBm a 20 dBm)
Rango de ganancia	0 dB a 31 dB	
Saltos de ganancia	0.5 dB	
Máximo ancho de banda instantáneo en tiempo real	16-bit ancho de muestra	20 MHz
	8-bit ancho de muestra	40 MHz
Velocidad máxima de muestra I / Q	16-bit ancho de muestra	25 MS/s
	8-bit ancho de muestra	50 MS/s
Convertidor digital a analógico (DAC)	2 canales, 400 MS/s, 16 bit	
Rango dinámico libre de espurios DAC (sFDR)	80 dB	

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017)

Receptor

Tabla 4-2: Tabla de especificaciones de la USRP 2932 en Recepción

Rango de frecuencia	400 MHz to 4.4 GHz	
Salto de frecuencia	<1 kHz	
Rango de ganancia	0 dB to 31.5 dB	
Salto de Ganancia	0.5 dB	
Potencia de entrada máxima (P_{in})	0 dBm	
Figura de ruido	5 dB to 7 dB	
Máximo ancho de banda instantáneo en tiempo real	16-bit ancho de muestra	20 MHz
	8-bit ancho de muestra	40 MHz
Velocidad máxima de muestra I / Q	16-bit ancho de muestra	25 MS/s
	8-bit ancho de muestra	50 MS/s
Convertidor analógico - digital (ADC)	2 canales, 100 MS/s, 14 bit	
ADC sFDR	88 dB	

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017)

La potencia de salida resultante del ajuste de ganancia varía en la banda de frecuencia y entre los dispositivos. El ancho de banda instantáneo depende de muchos factores, incluidos, entre otros, la configuración de la red y el rendimiento de la computadora host. El rendimiento de datos real puede depender del conjunto de chips. La frecuencia de muestreo I / Q depende de muchos factores, incluidos, entre otros, la configuración de red y el rendimiento de la computadora host. El rendimiento de datos real puede depender del conjunto de chips. La amplitud de la señal recibida que resulta del ajuste de ganancia varía en la banda de frecuencia y entre dispositivos.(NATIONAL INSTRUMENTS, 2017).

2.1.5.

2.1.6. *Diseño de los sistemas Radiantes Directivos*

Las antenas se diseñaron teniendo en cuenta varios parámetros según el sistema radiante, para el tipo arreglo de antenas parche MxN microstrip se analizó el número de parches, ganancia, directividad, impedancia, el dieléctrico, materiales de construcción, además la frecuencia central, entre otros parámetros, para el sistema radiante tipo bocina piramidal se tomó en cuenta parámetros tales como el tipo de adaptador de guía de onda, las especificaciones en el campo eléctrico y magnético, materiales de construcción, frecuencia central, etc. En los dos sistemas además de operar a la misma frecuencia central se tomó en cuenta las limitaciones de cada equipo (tarjeta USRP 2932, analizador de redes vectoriales, plotter LPKF S103 y analizador de espectro)

2.1.5.1. *Arreglo de antenas parche M x N Microstrip*

El patrón de radiación de un solo elemento es relativamente amplio, y cada elemento proporciona valores bajos de directividad (ganancia). En muchas aplicaciones, es necesario diseñar antenas

con características muy directivas (ganancias muy altas) para satisfacer las demandas de la comunicación a larga distancia, ampliar las dimensiones de elementos individuales a menudo conduce a características más directivas. Otra forma de agrandar las dimensiones de la antena, sin aumentar necesariamente el tamaño de los elementos individuales, es formar un conjunto de elementos radiantes en una configuración eléctrica y geométrica, esta nueva antena está formada por elementos múltiples que se conoce como una matriz, siendo en la mayoría de los casos, los elementos idénticos.

El campo total de la matriz está determinado por la suma vectorial de los campos irradiados por los elementos individuales, esto supone que la corriente en cada elemento es la misma que la del elemento aislado. Para proporcionar patrones muy directivos, es necesario que los campos de los elementos de la matriz interfieran constructivamente (sumen) en las direcciones deseadas e interfieran destructivamente (se cancelen entre sí) en el espacio restante. (Balanis, 2012,p.283)

2.1.6.7.1. *Diseño del arreglo de antenas parche 4 x 4 Microstrip*

Se optó por el sistema radiante tipo matriz o arreglo de antenas parche MxN microstrip como se muestra en la figura 8-2, por sus características directivas, ideales para sistemas radares, ulteriormente a esto mediante el estudio teórico, se determina que una matriz de antenas de un factor de 4x4 parches incrementa la directividad óptimo para sistemas SDRadar implementados en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, determinado para trabajar en la frecuencia de la banda S específica para sistemas radares en el rango de 2.7 a 3.7 GHz según el estándar IEEE.

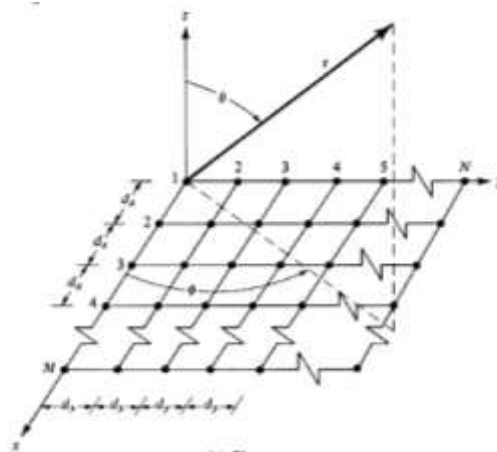


Figura 8-2. Arreglo plano MxN
Fuente: (Balanis, 2012)

Establecido el número de parches a diseñar, determinando una matriz de 4x4 de un total de 16 parches, calculamos las longitudes de cada uno de estos, para operar en la banda S para sistemas radares.

En la figura 9-2(a) se muestra la vista frontal del parche rectangular microstrip y en la figura 9-2b la parte lateral mostrando los parámetros de longitud, ancho del parche y altura del sustrato respectivamente.

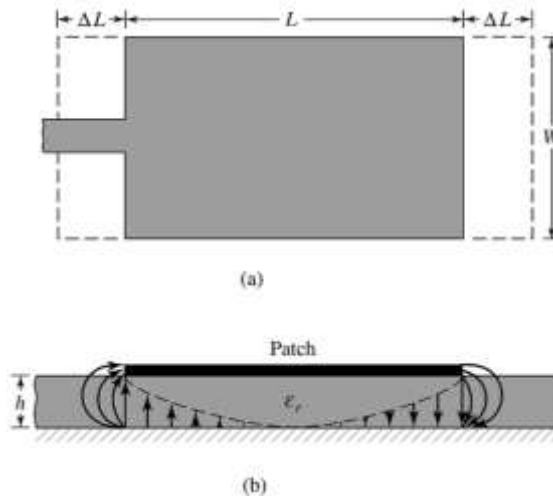


Figura 9-2. Parche. (a) vista superior (conductor),
(b) vista lateral(sustrato).

Fuente: (Balanis, 2012,p.218)

Para antenas rectangulares microstrip, la ecuación 1-2 expresa los parámetros de ancho para el modelamiento del parche, con las condiciones requeridas del diseño, con una buena eficiencia de radiación.(Balanis, 2012,p.819)

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1-2)$$

Dónde:

W = Ancho del parche

v_0 = velocidad de la luz en el espacio libre.

ϵ_r = constante dieléctrica del sustrato

f_r = frecuencia de resonancia

Para determinar la constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} de la antena microstrip se determina con la ecuación 2-2 donde h es la altura del sustrato.

$$W/h > 1$$

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

Hallado el valor de W , se determina la extensión de la longitud Δ_L usando la ecuación 3-2 en función de la altura h del sustrato.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3-2)$$

La longitud real del parche se determina desarrollando la ecuación 5-2, sustituyendo en la ecuación 4-2, esta describe, la frecuencia de resonancia de la antena microstrip en el modo dominante TM₀₁₀ en función de su longitud, teniendo en cuenta las franjas, también los efectos de borde, donde $q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}}$, y L es la longitud del parche. (Balanis, 2012, pp 817 - 220).

$$\begin{aligned} (f_{rc})_{010} &= \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{1}{2(L+2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \\ &= q \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (5-2)$$

Subsiguiente a los cálculos para determinar los parámetros de longitud y ancho del parche se continua con el diseño y simulación del arreglo de antenas en el software CST Studio, teniendo en consideración los parámetros determinados de la tabla 5-2, ideales para el sistema radiante.

Tabla 5-2: Parámetros establecidos para el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.

Nombre	Descripción	Valores
f₀	Frecuencia central	Banda S - 3.7 GHz
N_x	Número de parches en la dirección X	4 parches
N_y	Número de parches en la dirección Y	4 parches
R_{in}	Impedancia de entrada	50Ω
Sustrato	laminado epoxi reforzado con vidrio	FR4
Fabricante Sustrato		Genérico
h	Altura del sustrato	1.5 mm
L	Longitud del parche	23.56 mm
W	Ancho del parche	18.06 mm
ε_r	Permitividad relativa del sustrato.	4.35

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. :2020

Considerando los parámetros de la tabla 5-2, se realiza el diseño en el software CST Studio, modelando y optimizando el esquema para que trabaje a una mayor directividad, cumpliendo con los requerimientos determinados.

En la figura 10-2a se exhibe el arreglo de antenas 4x4 (16 parches) esquematizado en el CST Studio, para ser simulado y optimizado hasta lograr los parámetros ideales y en la figura 10-2b la altura h del sustrato FR4.

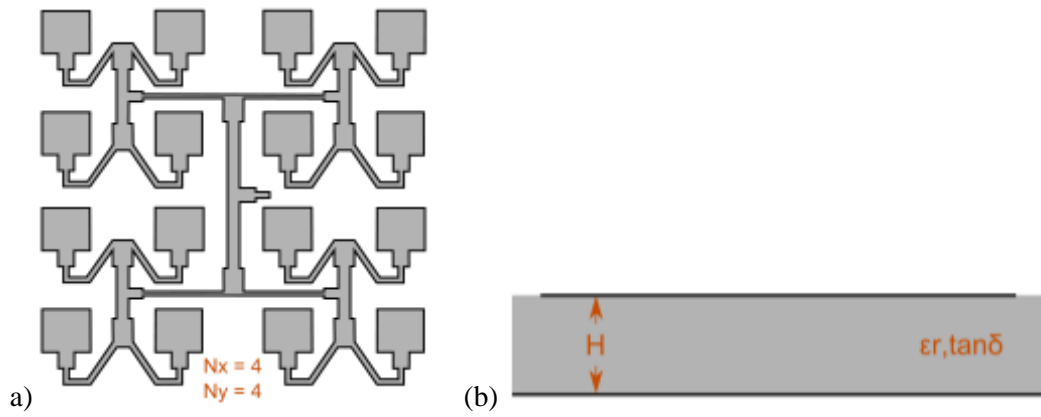


Figura 10-2. Diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a) Vista frontal, (b) vista lateral (altura h del sustrato).

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En la figura 11-2 se muestra el diseño del puerto de alimentación del arreglo de antenas y las acotaciones de cada intersección en el software CST Studio.

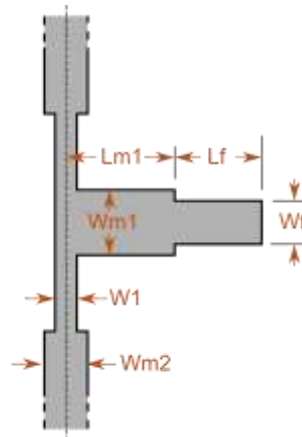


Figura 11-2. Vista frontal del puerto de alimentación del Arreglo de antenas.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Las figuras 12-2a y 12-2b presentan la vista frontal del arreglo de antenas de forma parcial exponiendo las acotaciones de cada una de las longitudes del diseño mostrado.

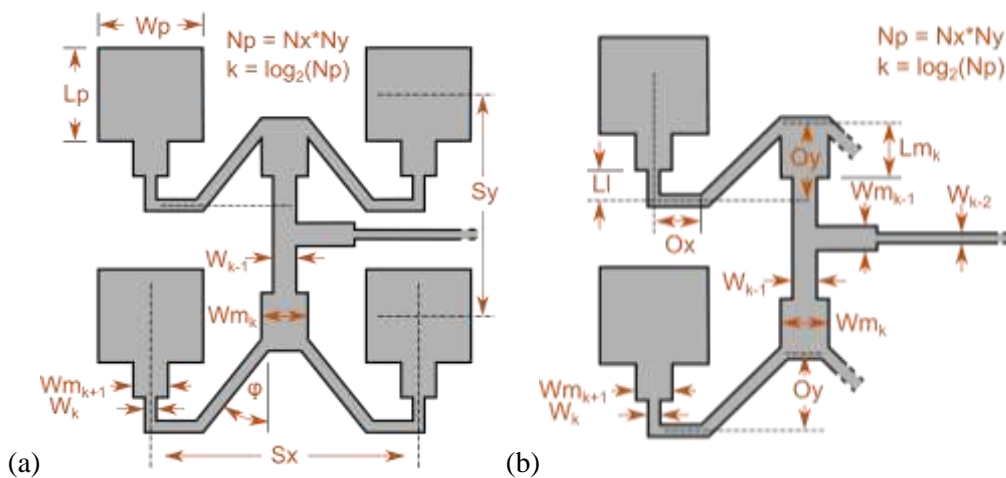


Figura 12-2. Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a) Vista frontal parcial del Arreglo de antenas 4 parches, (b) vista frontal parcial del arreglo de antenas 2 parches.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Esquemático y optimizado el diseño en el software CST Studio figura 13-2, en la tabla 6-2 se muestra las dimensiones de cada elemento del arreglo de antenas, acotados anteriormente en las figuras 10-2, 11-2 y 12-2.

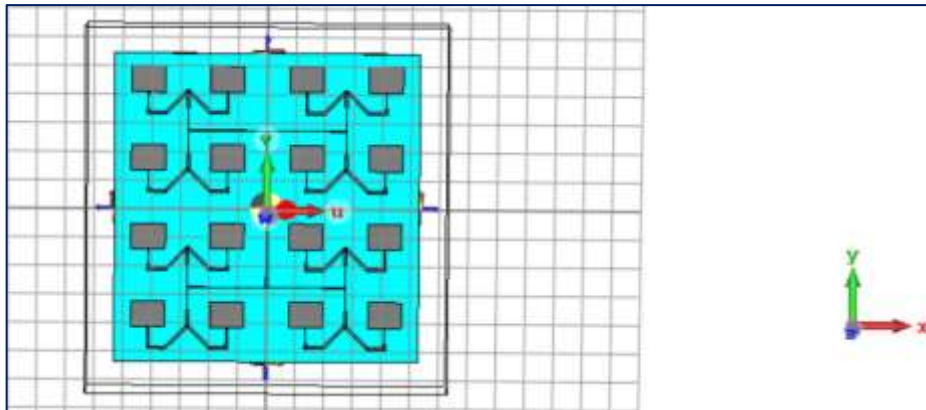


Figura 13-2. Diseño del arreglo de antenas microstrip en CST Studio.
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Tabla 6-2: Tabla de nombres, descripción y valores de cada elemento del diseño del arreglo de antenas.

Nombre	Descripción	Valor
fo	Frecuencia central	3.7 Ghz
Nx	Número de parches en dirección X	4 parches
Ny	Número de parches en la dirección Y	4 parches
Wp	Ancho de parche	23.56 mm
Lp	Longitud del parche	18.06 mm
Sx	Espaciado de parche entre centros de parche en la dirección X	54.94 mm
Sy	Espaciado de parche entre centros de parche en la dirección Y	54.94 mm
Ox	Desplazamiento X del elemento de parche	11.78 mm
Oy	Desplazamiento Y del elemento de parche	14.95 mm
h	Altura del sustrato	1.5 mm
er	Permitividad relativa	4.35
tanδ	Tangente de pérdida	0.019
Wf	Ancho de línea de alimentación	2.892 mm
Lf	Longitud de la línea de alimentación	2.689 mm
Lm1	Longitud de línea de unión 1	10.80 mm
Lm2	Longitud de línea de unión 2	11.17 mm
Lm3	Longitud de línea de unión 3	11.28 mm
Lm4	Longitud de línea de unión 4	11.00 mm
Lm5	Longitud de línea de unión 5	11.55 mm

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Tabla 6-2: (continuación)

Lm6	Longitud de línea de unión 6	11.34 mm
Lm7	Longitud de línea de unión 7	11.34 mm
Wm1	Ancho de línea de unión 1	2.892 mm
Wm2	Ancho de línea de unión 2	1.146 mm
Wm3	Ancho de línea de unión 3	825.9 μm
Wm4	Ancho de línea de unión 4	1.790 mm
Wm5	Ancho de línea de unión 5	287.8 μm
Wm6	Ancho de línea de unión 6	673.9 μm
Wm7	Ancho de línea de unión 7	673.9 μm
L1	Longitud de la línea	2.689 mm
W1	Ancho de línea de red 1	673.9 μm
W2	Ancho de línea de red 2	287.8 μm
W3	Ancho de línea de red 3	287.8 μm
W4	Ancho de línea de red 4	1.793 mm
W5	Ancho de línea de red 5	673.9 μm
W6	Ancho de línea de red 6	673.9 μm

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

El software CST posterior a al diseño del arreglo de antenas, presenta un bosquejo de este en el sustrato FR4 como se expone en la figura 14-2a y 14-2b en su vista frontal el sistema radiante directivo y posterior el plano de tierra.

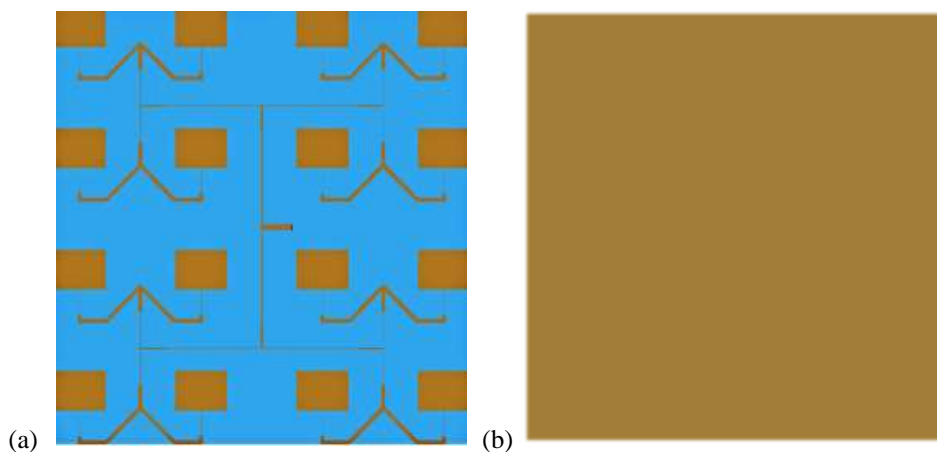


Figura 14-2. Simulación en Fr4 arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.
(a)vista frontal del arreglo de antenas, (b)vista posterior- tierra.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

2.1.6.7.2. *Parámetros obtenidos del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.*

Estos resultados son obtenidos posterior a la simulación, optimización y validación del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip, operando a una frecuencia de 3.7 GHz dentro de la banda-S.

En el grafico 1-2 se muestra los parámetros de dispersión o scattering S11 en una frecuencia de 3.7GHz, dando una caída de -27.987dB, adecuado para un desempeño optimo del diseño de la antena.

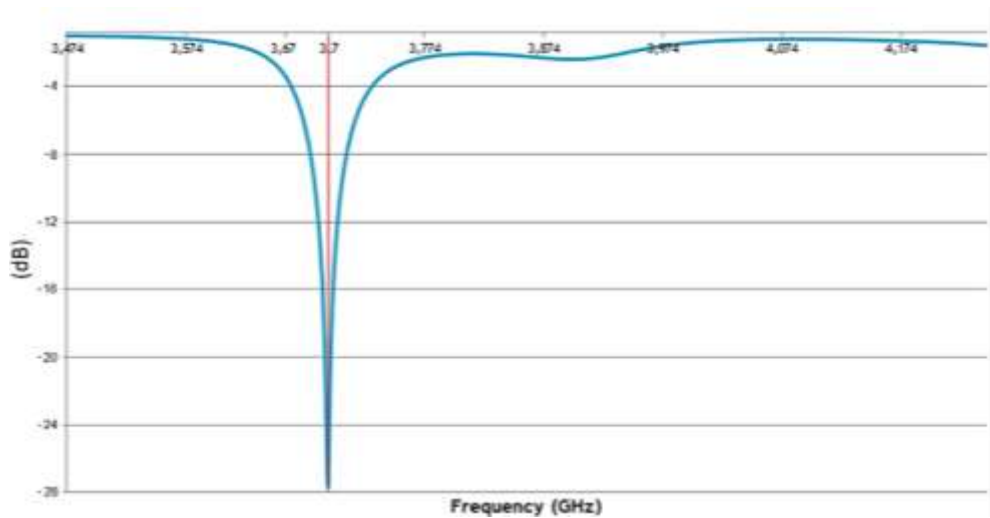


Gráfico 1-2. Parámetros de Scattering S11 (-27.987dB) del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

El grafico 2-2 muestra la ganancia del diseño de la antena (18.07 dBi), partiendo del ángulo de 0 grados (línea completa) y de 90 grados (línea entrecortada), en función de dBi.

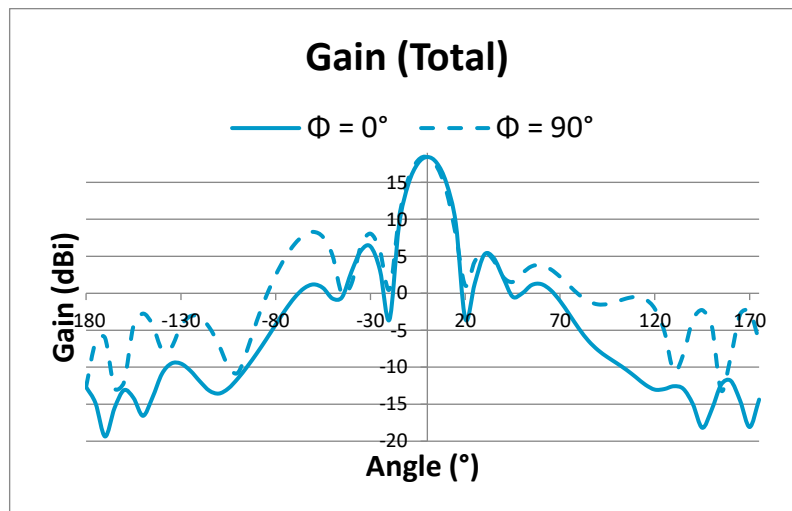


Gráfico 2-2. Ganancia (18.07 dBi) del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

El diagrama de radiación en polar y 3D del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip se expone en los gráficos 3-2a y 3-2b respectivamente.

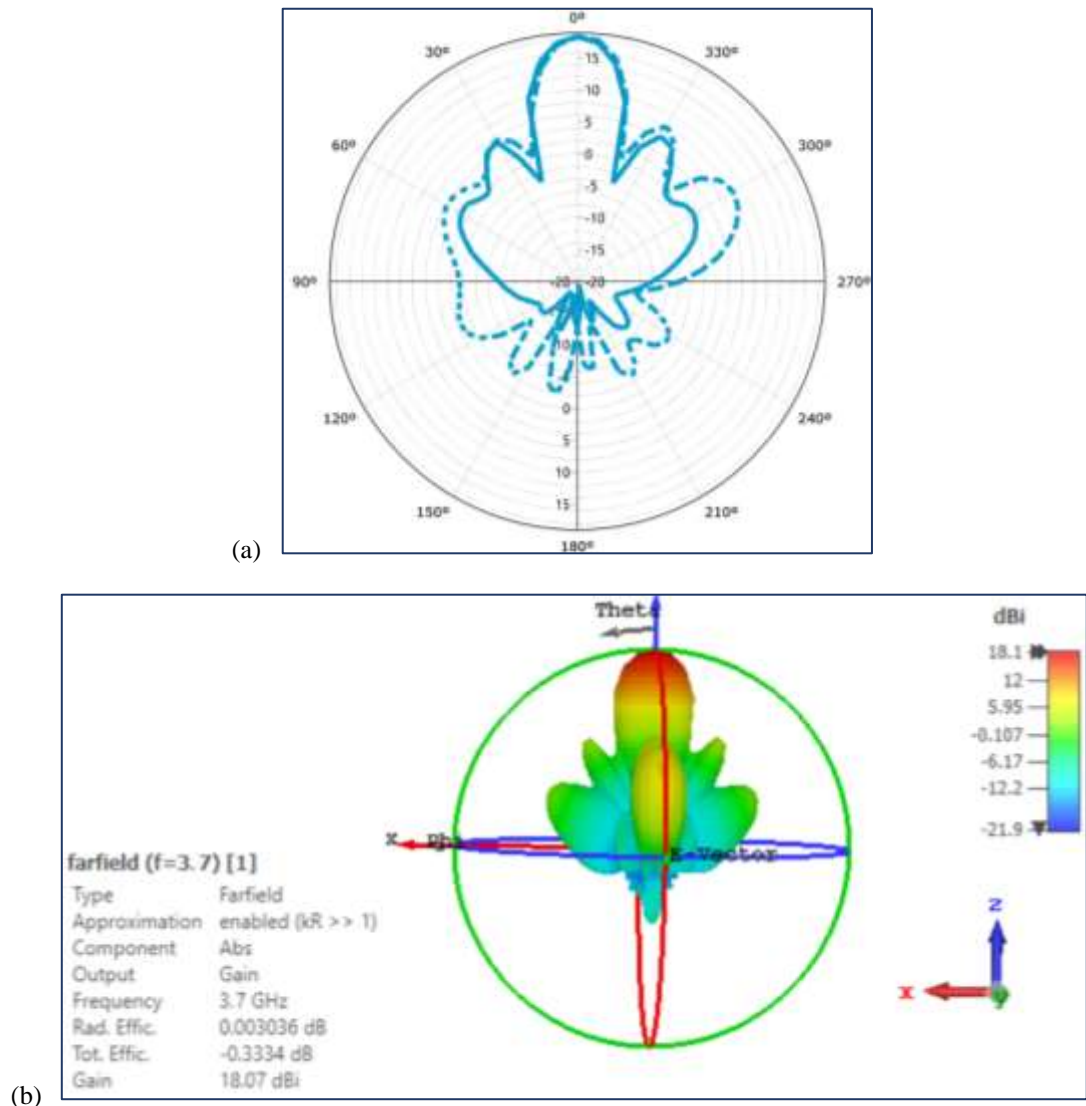


Gráfico 3-2. Diagrama de radiación del diseño del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip. (a) diagrama polar, (b) diagrama 3D en dBi.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

2.1.6.2. Antena bocina piramidal

La antena bocina es una antena de apertura que va guiando la onda en forma directiva ideal para sistemas radar, la más utilizada que irradia en las dos direcciones eléctrica y magnética es conocida como bocina piramidal figura 15-2a, y sus características de radiación son esencialmente una combinación de las antenas bocinas sectoriales de los planos E y H expuestas en las figuras 15-2b y 15-2c respectivamente. (Balanis, 2012,p.769)

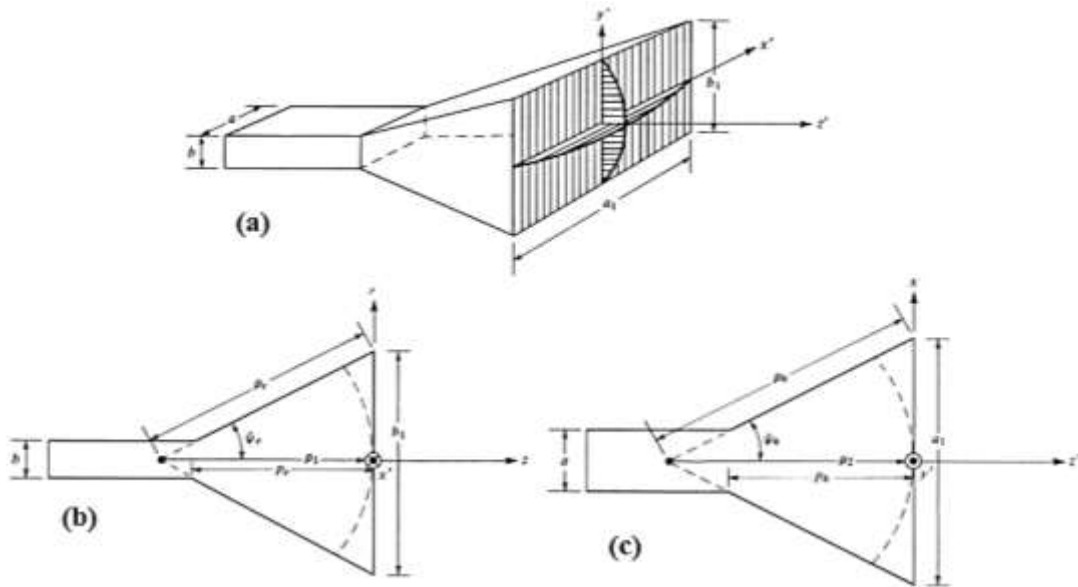


Figura 15-2. Antena bocina piramidal. (a) Sistema de coordenadas de la antena bocina piramidal, (b) antena bocina sectorial plano E, (c) antena sectorial plano H.

Fuente: (Balanis, 2012,p.771)

2.1.6.2.1. Diseño de la antena bocina piramidal

El diseño de la antena bocina piramidal se realiza para operar en la frecuencia de la banda S para sistemas radares en el rango de 2.7 a 3.7 GHz según el estándar IEEE, además el diseño requiere un adaptador de guía de onda según el estándar para frecuencias de 3.30 GHz a 3.95GHz se utiliza la WR-284, que se encuentra dentro del rango de frecuencias requerido para este sistema.

La antena bocina piramidal se usa ampliamente como estándar para realizar mediciones de ganancia de otras antenas, conocida como bocina de ganancia estándar. Para diseñar una bocina piramidal, generalmente se conoce la ganancia deseada G_0 y las dimensiones a , b de la guía de onda de alimentación rectangular. El objetivo del diseño es determinar las dimensiones restantes (a_1 , b_1 , ρ_e , ρ_h , P_e y P_h) que conducirán a una ganancia óptima. (Balanis, 2012,p.781)

Las ecuaciones de diseño se derivan seleccionando primero los valores de b_1 y a_1 obteniendo la ecuación 7-2 que conducen respectivamente, a directividades óptimas para las antenas bocina sectoriales del plano E y H usando las ecuaciones (6-2a) y (6-2b). Dado que la eficiencia general (incluidas las eficiencias de antena y apertura) de una antena de bocina es de aproximadamente 50%, la ganancia de la antena puede estar relacionada con su área física. (Balanis, 2012,p.781)

$$b_1 \approx \sqrt{2\lambda\rho_1} \quad (6-2a)$$

$$a_1 \approx \sqrt{3\lambda\rho_2} \quad (6-2b)$$

$$G_0 = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{\lambda^2} (a_1 b_1) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{3\lambda\rho_2} \sqrt{2\lambda\rho_1} \approx \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{3\lambda\rho_h} \sqrt{2\lambda\rho_e} \quad (7-2)$$

Dónde:

b_1 = alto de la apertura de la antena

a_1 = ancho de la apertura de la antena

ρ_1 = longitud interior de la antena plano E

ρ_2 = longitud interior de la antena plano H

ρ_h = longitud exterior de la antena plano H

ρ_e = longitud exterior de la antena plano E

G_0 = Ganancia deseada.

Estos parámetros se observan en la figura 15-2 con más detalle de su posición.

Ya que para antenas bocina largas (ρ_2 , ρ_h y ρ_1 , ρ_e) y para sistemas bocina piramidal para que sean físicamente realizables se desarrolla las longitudes P_e y P_h en las ecuaciones 8-2a y 8-2b respectivamente, las cuales deben ser iguales. En la ecuación 9-2 en función de x se puede demostrar esta igualdad, donde a es el ancho de la guía de onda y b la altura.

$$P_e = (b_1 - b) \left[\left(\frac{\rho_e}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8-2a)$$

$$P_h = (a_1 - a) \left[\left(\frac{\rho_h}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8-2b)$$

$$(\sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda})^2 (2x - 1) = \left(\frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{a}{\lambda}} \right)^2 \left(\frac{G_0^2}{6\pi^3 x} - 1 \right) \quad (9-2)$$

A partir de la ecuación 9-2 se deduce las ecuaciones 10-2a y 10-2b en función de x para posteriormente realizar los cálculos para encontrar las dimensiones de la antena piramidal.

$$\frac{\rho_e}{\lambda} = x \quad (10-2a)$$

$$\frac{\rho_h}{\lambda} = \frac{G_0^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x} \right) \quad (10-2b)$$

Se calcula el valor de X que satisfaga las ecuaciones 10-2(a-b) para una ganancia deseada G_0 (sin dimensiones). En la ecuación 11-2 se usa una técnica iterativa inicialmente con un valor de prueba, donde $X(\text{trial})$ es un valor de prueba en función de la ganancia desea.

$$X(\text{trial}) = X_1 = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (11-2)$$

Una vez que se ha encontrado el correcto $X(\text{trial})$, se determina ρ_e y ρ_h usando las ecuaciones 10-2a y 10-2b respectivamente.

Usando las ecuaciones 6-2a y 6-2b se encuentra los valores correspondientes de a_1 y b_1 , donde se obtienen las ecuaciones 12-2a y 12-2b.

$$a_1 = \sqrt{3\lambda\rho_2} \approx \sqrt{3\lambda\rho_h} = \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi x}} \lambda \quad (12-2a)$$

$$b_1 = \sqrt{2\lambda p_1} \approx \sqrt{2\lambda \rho_e} = \sqrt{2x\lambda} \quad (12-2b)$$

Posteriormente se calculan los valores de P_e y P_h usando las ecuaciones 8-2a y 8-2b respectivamente.

Calculado los valores de los parámetros de la antena bocina piramidal, y conociendo las dimensiones de la guía de onda estándar WR-284 tabla 7-2, se diseña y simula el sistema radiante directivo en el software Ansoft HFSS, a una frecuencia central de 3.7GHz dentro de la banda S para sistemas radares.

Tabla 7-2: Tabla de parámetros de la antena bocina piramidal.

Nombre	Valor
Frecuencia central	3.7 GHz
Dimensión de la guía de onda "a"	72.14mm
Dimensión de la guía de onda "b"	34.04mm
Longitud de la guía de onda	66.46mm
Tamaño de la bocina en "a"	119.63mm
Tamaño de la bocina en "b"	93.04mm
Longitud de la bocina	199.38mm
Espesor de la pared	FR4 1.5mm
Guía de onda estándar	WR-284

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En la figura 16-2 se muestra la configuración del diseño de la antena piramidal con el nombre de cada acotación de este, expuesto en la tabla 7-2 para la simulación en el Ansoft HFSS.

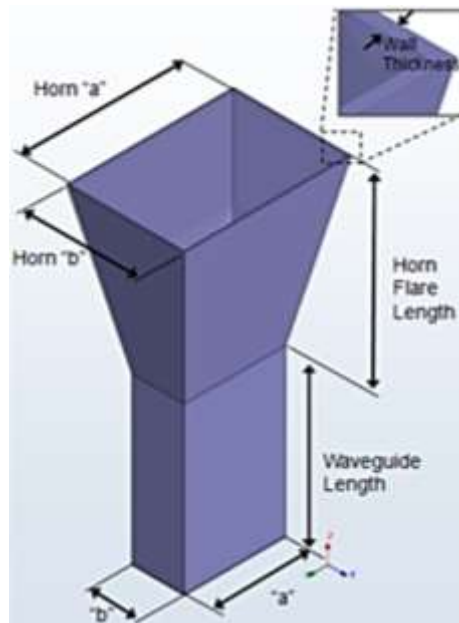


Figura 16-2. Diseño acotado de la antena bocina piramidal

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Con los parámetros de la tabla 7-2 se diseña y simula la antena piramidal en el software Ansoft HFSS, como se expone en la figura 17-2 , esquematizado de tal manera que cumpla con los requerimientos para sistemas radares en la banda S.

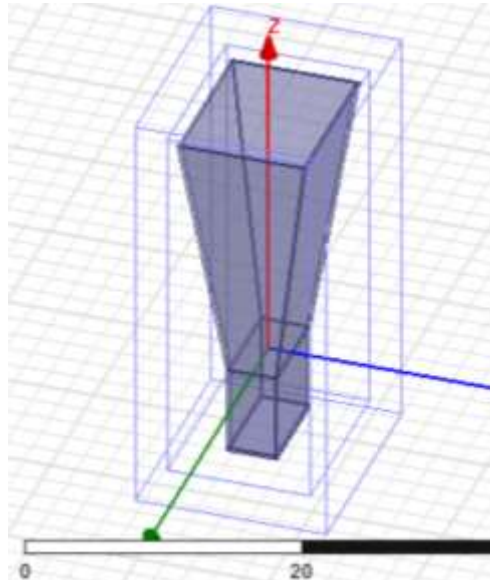


Figura 17-2. Diseño de la antena piramidal implementado en el software HFSS
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

2.1.4.2.1. *Parámetros obtenidos del diseño de las antenas bocina piramidal banda-S*

Estos resultados son obtenidos posterior a la simulación, optimización y validación del diseño de la antena bocina piramidal, operando a una frecuencia de 3.7 GHz dentro de la banda-S.

En el gráfico 4-2 se muestra los parámetros de dispersión o scattering S11, dando una caída de -33.982 dB, adecuado para un desempeño optimo del diseño de la antena.

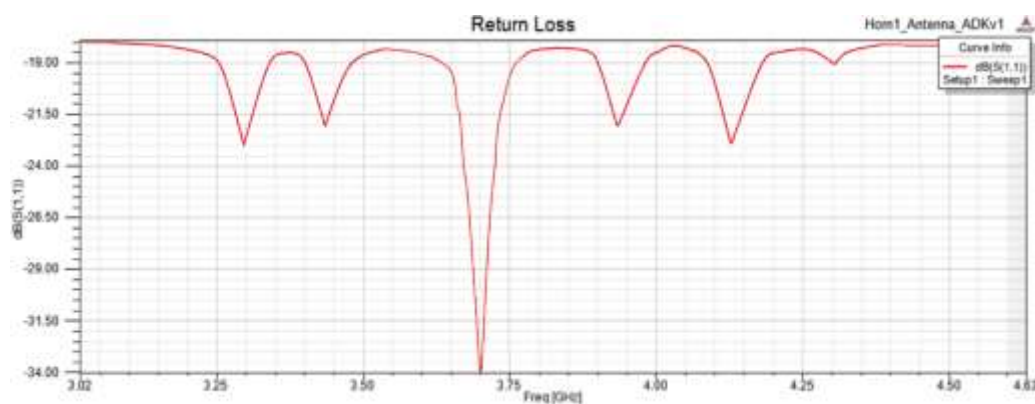


Gráfico 4-2. Resultado de los parámetros de scattering S11 (-33.982db) del diseño de la antena piramidal

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En el gráfico 5-2 se observa el diagrama de la ganancia total del diseño de la antena bocina piramidal, marcando una ganancia de 17.896dBi.

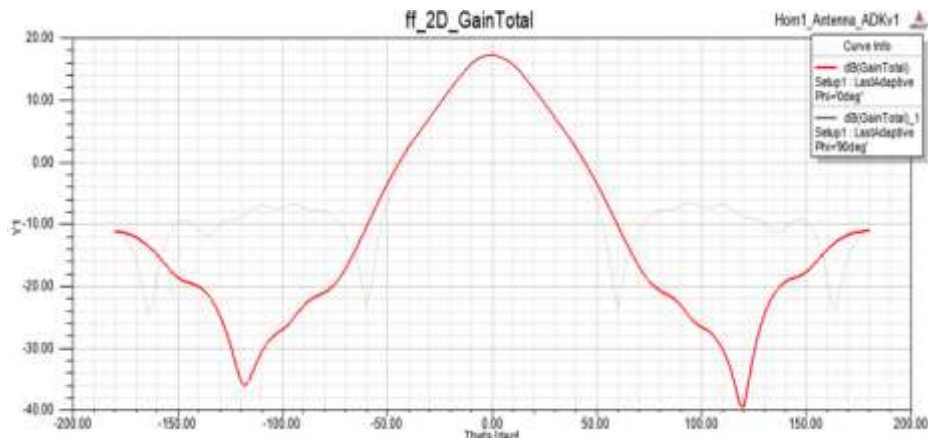


Gráfico 5-2. Ganancia resultante (17.896dBi) de la simulación del diseño de la antena piramidal

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Posterior al diagrama de la ganancia en polar se presenta en la figura 18-2 el patrón de radiación en campo lejano en 3D, describiendo la forma del lóbulo de la antena piramidal en la banda-S.

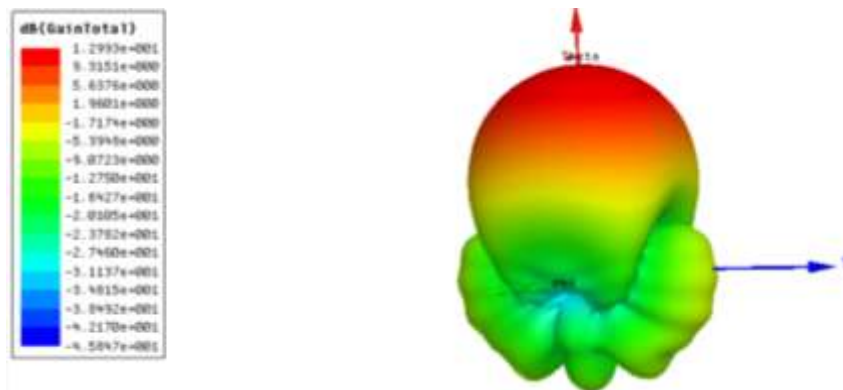


Figura 18-2. Lóbulo de radiación en campo lejano del diseño de la antena piramidal banda-S

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

2.1.7. Construcción de los sistemas radiantes directivos

Verificado cada sistema radiante directivo en los softwares de diseño y simulación, la construcción de estos se realiza en los materiales electrónicos previstos (FR4, conector SMA hembra, Kit de brocas de freseo para CNC), y con los equipos descritos (Plotter ProtoMat LPKF S103).

Para la construcción de las antenas tanto bocina piramidal y arreglo parche 4x4 microstrip dos de cada una, se utilizan para estas materiales y elementos electrónicos como placas FR4 de 20x30 cm, conectores SMA hembra figura 19-2(a-c) respectivamente, además de soldadura y un kit de brocas fresas desde un diámetro de 0.3 mm hasta 3.7mm.



Figura 19-2. Materiales y elementos electrónicos. (a) Placa(baquelita) FR4, (a) conector SMA Hembra, (c) kit brocas fresas 0.1mm-3.7mm.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

2.1.7.1. Construcción arreglo de antenas parche 4x4 microstrip

En la construcción del arreglo de antenas se exporta el diseño de la antena en formato .dxf figura 20-2, desde el software CST Suite para ser impreso en el Plotter ProtoMat LPKF S103 propiedad de la ESPOCH.

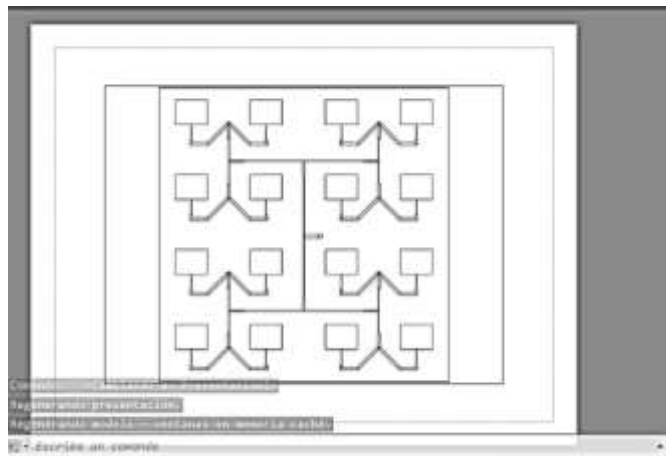


Figura 20-2. Diseño a construir del arreglo de antenas parche en formato .dxf visualizado en AutoCAD

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En las figuras 21-2 (a-c) se identifica el proceso de modelado del sistema de antenas microstrip en el Plotter ProtoMat LPKF S103, desde el ajuste de las brocas fresadoras (kit de brocas de 0.1 hasta 3 mm), y el proceso de freseo o desgaste del cobre de la placa FR4.

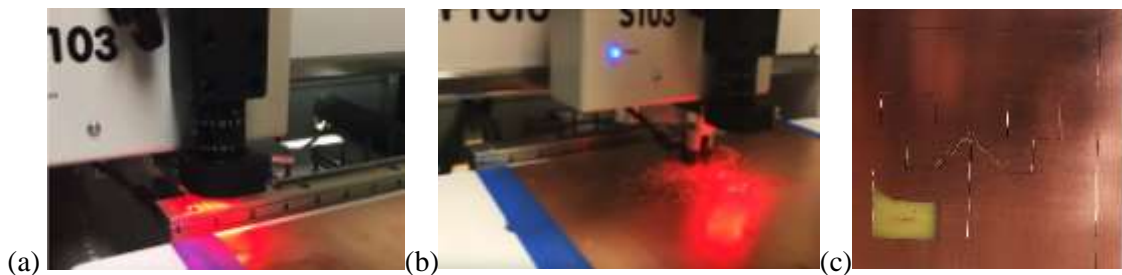


Figura 21-2. Proceso de freseo del arreglo de antenas con el Plotter ProtoMat LPKF S103. (a) ubicación y ajuste de brocas, (b)Inicio del freseo (c) resultado parcial.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En la figura 22-2 se presenta el sistema completo de dos arreglos de antenas de una matriz 4x4, 16 parches, a una frecuencia central de 3.7GHZ y un patrón de radiación direccional idóneo para implementar en radares.

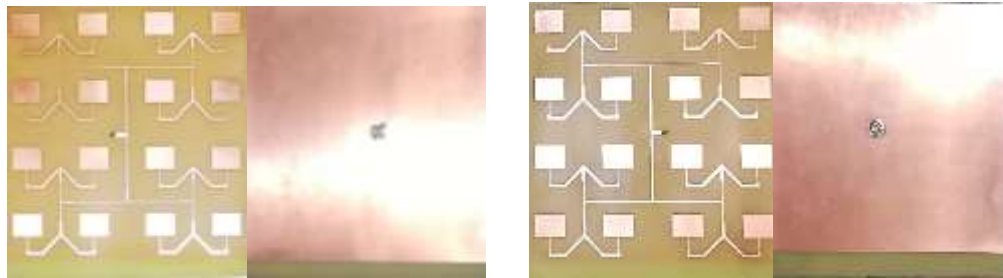


Figura 22-2. Sistema de arreglo de antenas parche 4x4 microstrip construidas.
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

La figura 23-2 expone el kit completo del sistema de arreglo de antenas 4x4 microstrip en su caja y recubrimiento de protección.

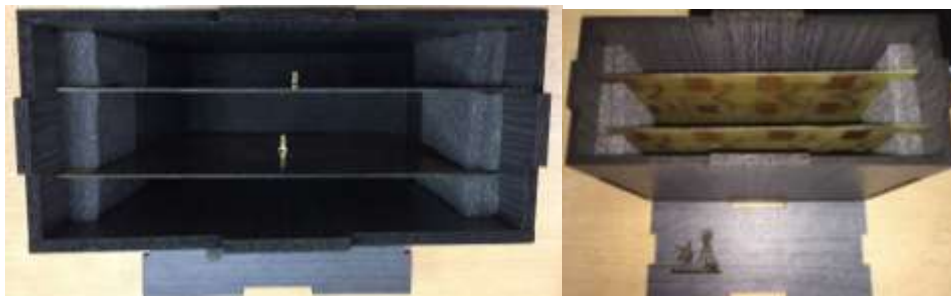


Figura 23-2. Kit sistema radiante directivo arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

2.1.7.2. Construcción de las antenas bocina piramidal

Para la construcción de las antenas bocina piramidal se diseñó en formato .dxf las plantillas de todos los elementos estructurales de la antena figura 24-2(a-b), para ser cortados en el Plotter ProtoMat LPKF S103 propiedad de la ESPOCH.

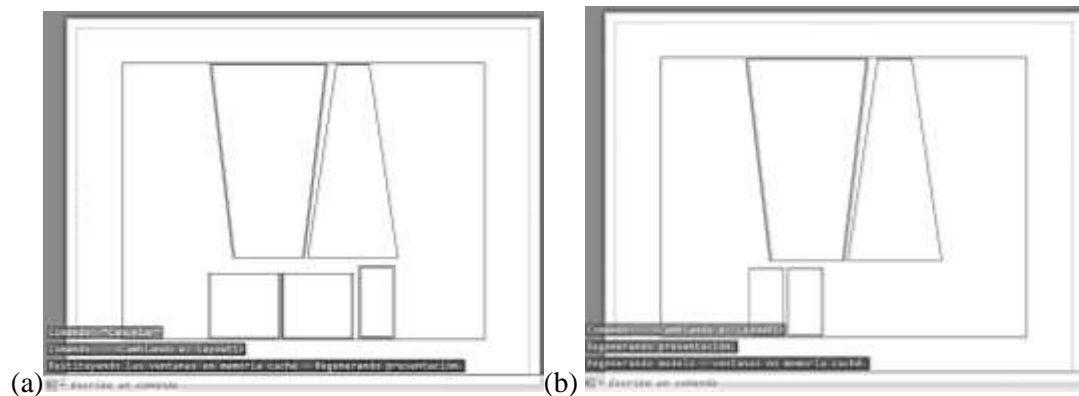


Figura 24-2. Plantilla de corte antena bocina piramidal formato .dxf, parte 1 (a), parte 2 (b).
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Posterior al diseño de las plantillas 1 y 2 se transfiere al software controlador del plotter ProtoMat LPKF S103 para iniciar el corte de las placas FR4 simples figura 25-2 (a-b), para estructurar la antena, siendo dos juegos de plantillas necesarias para el sistema SDRadar (transmisión y recepción).

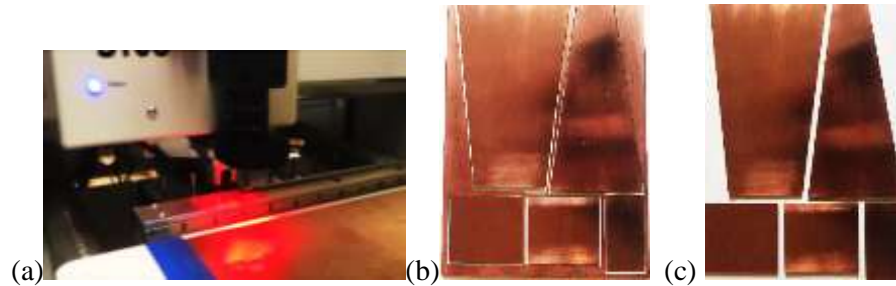


Figura 25-2. Proceso de corte placa FR4 de plantillas antena bocina piramidal, inicio de corte(a), corte terminado de la plantilla 1(b), piezas listas para soldar(c).

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Posterior al corte de las cuatro plantillas necesarias se construye las antenas soldando desde la guía de onda hasta la corneta y el conector SMA, como se expone en la figura 26-2(a-d) la antena terminada y sus diferentes vistas.

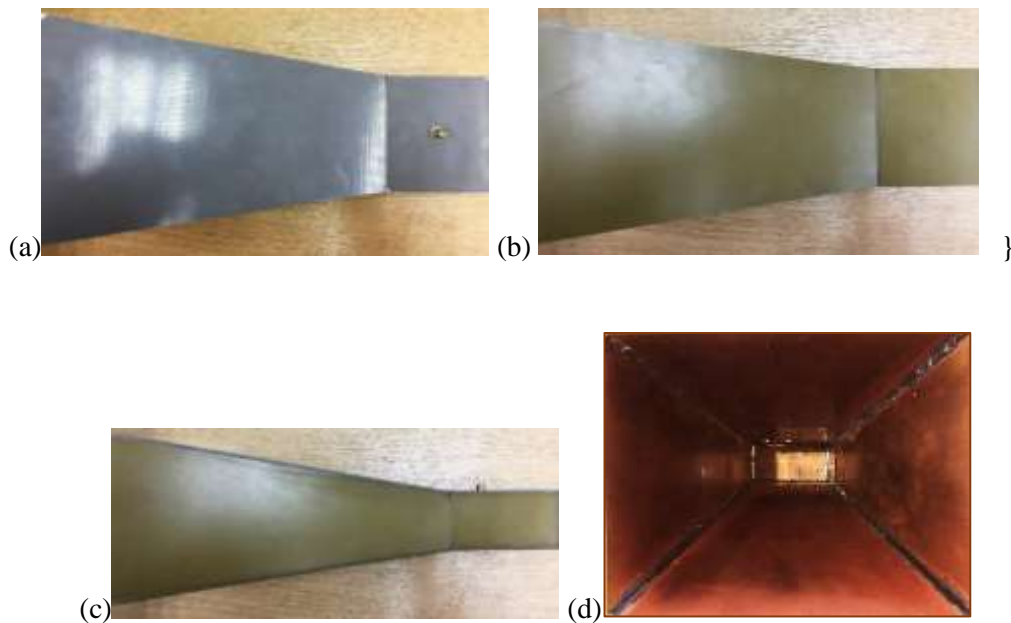


Figura 26-2. Antena bocina piramidal banda-S. (a) vista inferior, (b) vista superior, (c) vista lateral, (d) vista interna.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En la figura 27-2 se expone el kit completo del sistema radiante directivo bocina piramidal banda-S, formado por dos antenas bocinas piramidales, dos pedestales aptos para las antenas tipo bocina

y arreglo microstrip, dos prensas de 2 pulgadas y una caja con recubrimiento para protección de los elementos y dispositivos electrónicos.

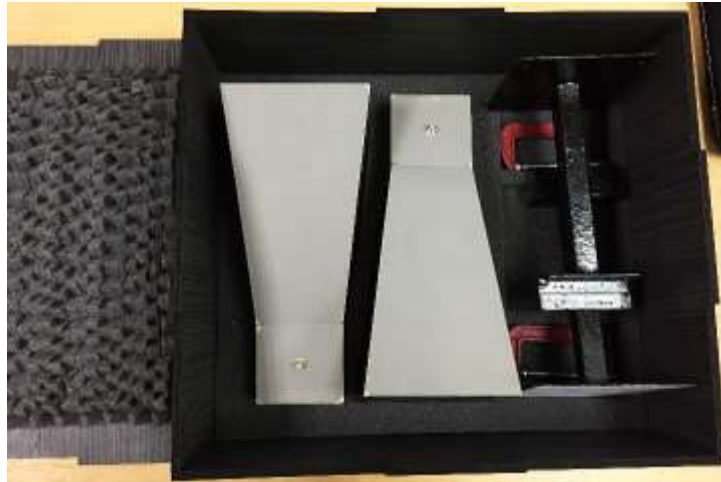


Figura 27-2. Kit sistema radiante direccivo bocina piramidal banda-S.
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

CAPÍTULO III

3. VALIDACIÓN DE LOS SISTEMAS RADIANTES DIRECTIVOS.

Para comprobar los parámetros obtenidos en el diseño de los sistemas radiantes directivos se realizó las respectivas mediciones y pruebas con los equipos de microondas propiedad de la ESPOCH, estos efectuados en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica, al ser el objetivo de estos sistemas ser utilizados en la implementación de SDRadar.

3.1. Pruebas con el analizador de espectro MS2724C ANRITSU

Las pruebas en el analizador de espectro se realizaron a una distancia de 4.5 metros el ancho del laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica, utilizando además el generador de señales equipos observados en las figuras 1-3 y 2-3 respectivamente.



Figura 1-3. Pruebas con el analizador de espectro MS2724C ANRITSU de los sistemas radiantes directivos.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.



Figura 2-3. Pruebas con el generador de señales ANRITSU de los sistemas radiantes directivos.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Para estas pruebas se realizaron dos métodos: el primero analizando el espectro de la transmisión en toda la banda-S desde 2.7 a 3.7GHZ añadiendo hasta 4.4Ghz el límite de operación de la tarjeta

NI USRP 2932, y el segundo método rotando una antena en forma circular describiendo los 360 grados a una frecuencia central de 3.7GHZ.

3.1.1. Pruebas del sistema arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S

Para las pruebas se ubicaron las antenas con una separación de 4.5 metros una distancia estable para la transmisión, en los siguientes ítems se describe las mediciones de cada método utilizado.

3.1.1.1. Prueba rotación 360° de la antena parche 4x4 microstrip.

Para esta prueba se roto la antena girando en sentido anti horario en 72 pasos de 5 grados a una frecuencia central de 3.7GHz dentro de la banda-S. En la figura 3-3 se observa la señal detectada por el analizador de espectros a una distancia de 4.5m de la señal generada.

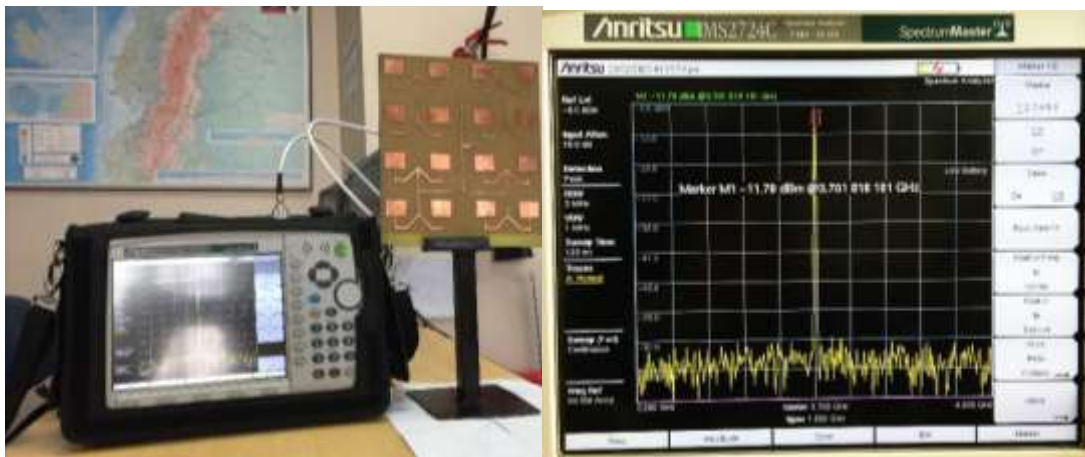


Figura 3-3. Pruebas con el analizador de espectro rotando la antena 360 grados el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En la tabla 1-3 se expone cada valor en dBm obtenidos de las mediciones en el analizador de espectro en 72 pasos del sistema arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.

Tabla 1-3. Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro rotando el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip 360 grados en 72 pasos.

Angulo (grados)	Valor (dBm)	Angulo (grados)	Valor (dBm)
-180	-43,25	0	-11,78
-175	-45,56	5	-12,51
-170	-52,27	10	-15,05
-165	-47,32	15	-20,20
-160	-43,64	20	-31,03
-155	-43,61	25	-28,06
-150	-45,22	30	-24,13
-145	-44,48	35	-24,15
-140	-41,95	40	-26,30
-135	-40,45	45	-29,38
-130	-40,18	50	-31,00

Tabla 1-3:(continuación)

-125	-40,83	55	-30,72
-120	-42,06	60	-30,62
-115	-43,32	65	-31,34
-110	-43,79	70	-32,74
-105	-43,00	75	-34,53
-100	-41,45	80	-36,35
-95	-39,69	85	-37,85
-90	-37,91	90	-38,93
-85	-36,08	95	-39,72
-80	-34,17	100	-40,45
-75	-32,27	105	-41,24
-70	-30,53	110	-42,04
-65	-29,20	115	-42,53
-60	-28,51	120	-42,23
-55	-28,74	125	-41,25
-50	-30,04	130	-40,41
-45	-31,05	135	-40,53
-40	-28,73	140	-42,39
-35	-25,92	145	-47,33
-30	-25,27	150	-50,89
-25	-28,62	155	-45,02
-20	-32,30	160	-43,19
-15	-20,91	165	-44,86
-10	-15,46	170	-47,45
-5	-12,70	175	-44,77

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Posterior a la medición rotando la antena describiendo un círculo se delinear los valores expuestos de la tabla 1-3 en grafico 1-3, obteniendo un patrón de la transmisión del sistema de antenas, mostrando el lóbulo principal y lóbulos secundarios de potencia.

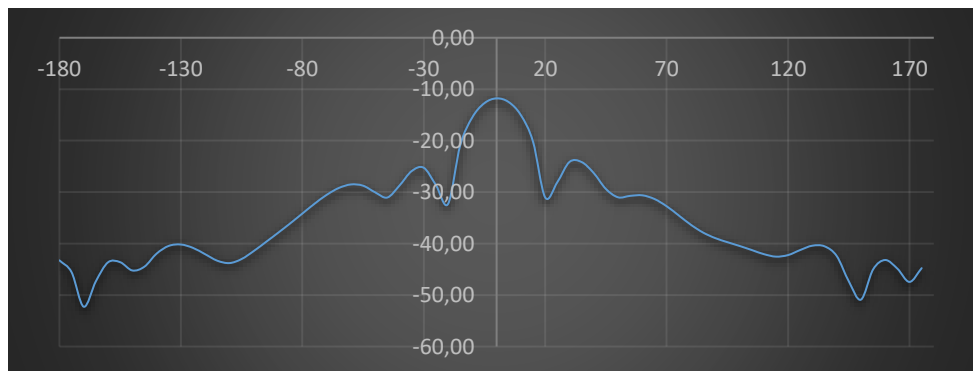


Gráfico1-3. Patrón de radiación cartesiano del sistema de arreglo de antenas parche 4x4 microstrip Banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En el grafico 2-3 se trazó los valores obtenidos en la tabla 1-3 en forma polar mostrando los lóbulos de radiación.



Gráfico 2-3. Patrón de radiación polar del sistema de arreglo de antenas parche 4x4 microstrip Banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

3.1.1.2. Prueba de cada frecuencia Banda –S incluyendo intervalo hasta 4-4GHZ limite tarjeta NI USRP 2932 del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip.

En esta prueba se transmitió una señal en el rango de la banda-S desde 2.7 a 3.7 GHz, además se incluyó el intervalo hasta 4.4Ghz el límite de operación de la tarjeta NI USRP 2932, en pasos de 0.1GHz como se observa en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro con el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip a una frecuencia central de 3.7GHZ.

frecuencia (GHz)	Valor (dBm)
2,7	-39,2
2,8	-44,3
2,9	-44,7
3	-42,3
3,1	-46,2
3,2	-48,1
3,3	-49,7
3,4	-51,3
3,5	-63,7
3,6	-26,7
3,7	-17,9
3,8	-23,6
3,9	-61,7
4	-56,7
4,1	-45,5
4,2	-47
4,3	-40,1
4,4	-38,45

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En el grafico 3-3 se observa el patrón de transmisión en cada frecuencia obtenido en la tabla 2-3.

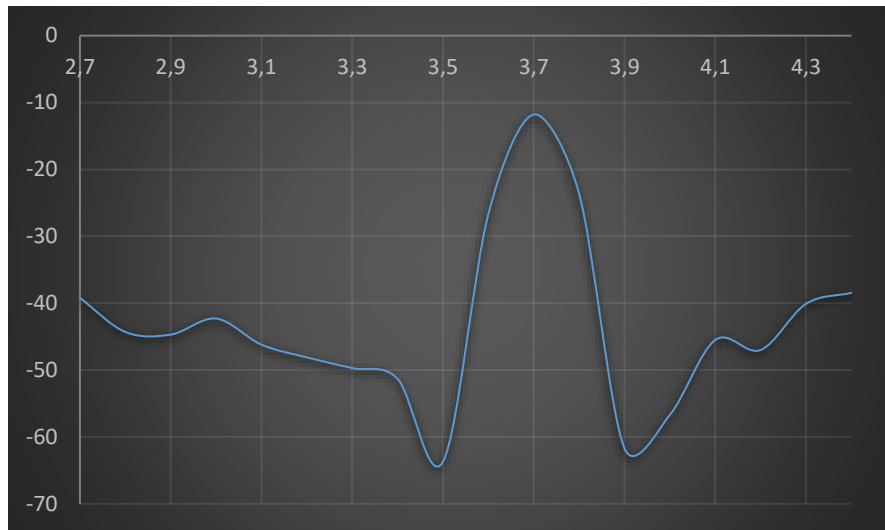


Grafico 3-3. Patrón de transmisión del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

3.1.2. Pruebas del sistema bocina piramidal banda-S

Para las pruebas se ubicaron las antenas con una separación de 4.5 metros una distancia estable para la transmisión, en los siguientes ítems se describe las mediciones de cada método utilizado.

3.1.2.1. Prueba rotación 360° de la antena bocina piramidal banda-S

Para esta prueba se roto la antena girando en sentido anti horario en 72 pasos de 5 grados a una frecuencia central de 3.7GHz dentro de la banda-S. En la figura 4-3 se observa la señal detectada por el analizador de espectros a una distancia de 4.5m de la señal generada.



Figura 4-3. Pruebas con el analizador de espectro rotando la antena 360 grados la antena bocina piramidal banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En la tabla 3-3 se muestra cada valor en dBm obtenidos de las mediciones en el analizador de espectro en 72 pasos de la antena bocina piramidal banda-S.

Tabla 3-3: Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro rotando la antena bocina piramidal 360 grados en 72 pasos.

Angulo (grados)	Valor	Angulo (grados)	Valor
-180	-36,89	0	-16,72
-175	-39,22	5	-17,51
-170	-50,66	10	-19,99
-165	-46,53	15	-24,33
-160	-42,81	20	-28,66
-155	-47,01	25	-27,97
-150	-48,06	30	-27,17
-145	-45,23	35	-28,46
-140	-45,89	40	-32,00
-135	-46,23	45	-38,72
-130	-47,76	50	-44,59
-125	-45,61	55	-38,90
-120	-45,40	60	-36,82
-115	-44,95	65	-35,99
-110	-43,56	70	-36,76
-105	-44,71	75	-37,89
-100	-42,85	80	-39,14
-95	-43,12	85	-40,75
-90	-41,58	90	-41,58
-85	-40,75	95	-43,12
-80	-39,14	100	-42,85
-75	-37,89	105	-44,71
-70	-36,76	110	-43,56
-65	-35,99	115	-44,95
-60	-36,82	120	-45,40
-55	-38,90	125	-45,61
-50	-44,59	130	-47,76
-45	-38,72	135	-46,23
-40	-32,00	140	-45,89
-35	-28,46	145	-45,23
-30	-27,17	150	-48,06
-25	-27,97	155	-47,01
-20	-28,66	160	-42,81
-15	-24,33	165	-46,53
-10	-19,99	170	-50,66
-5	-17,51	175	-39,22

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Ulterior a la medición rotando la antena bocina piramidal describiendo un círculo, se delineó los valores adquiridos de la tabla 3-3 en el gráfico 4-3, obteniendo un patrón de la transmisión del sistema de antenas, mostrando los lóbulos principales y secundarios de potencia.

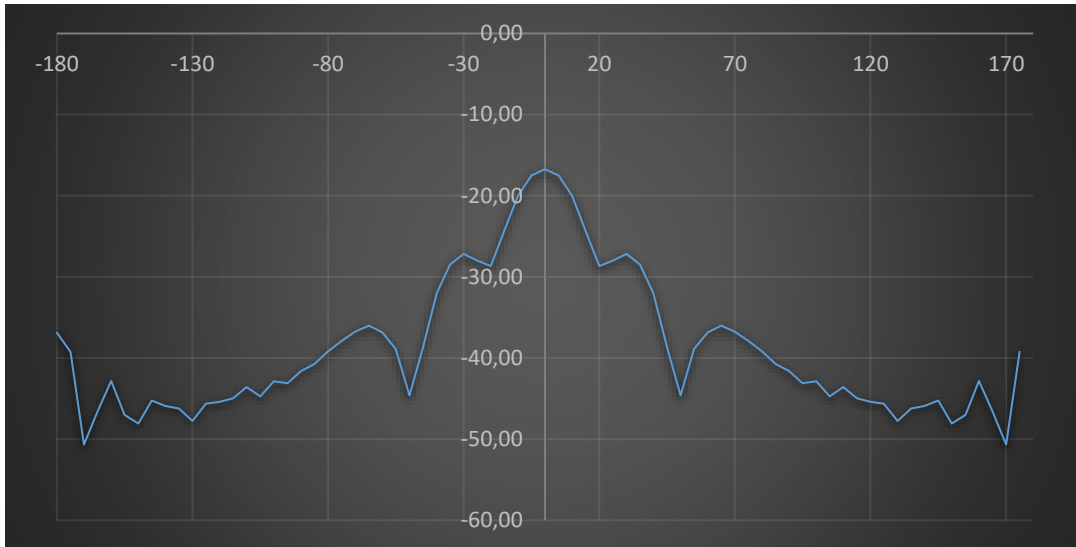


Gráfico 4-3. Patrón de radiación cartesiano del sistema de antenas bocina piramidal Banda-S.
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En el gráfico 5-3 se trazó los valores obtenidos en la tabla 3-3 en forma polar mostrando los lóbulos de radiación.

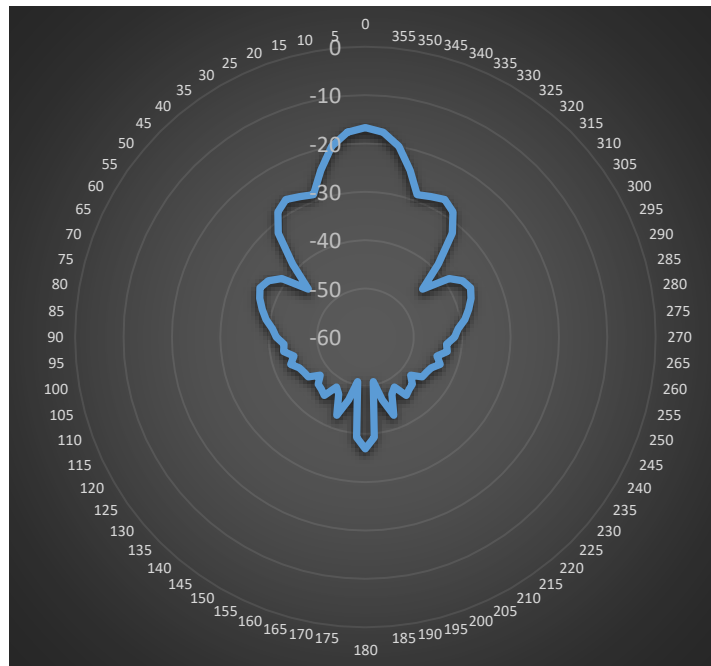


Gráfico 5-3. Patrón de radiación polar del sistema de antenas bocina piramidal Banda-S.
Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

3.1.2.2. Prueba de cada frecuencia Banda –S incluyendo intervalo hasta 4-4GHZ limite tarjeta NI USRP 2932 del sistema de antenas bocina piramidal.

En esta prueba se transmitió una señal en el rango de la banda-S desde 2.7 a 3.7 GHz, además se incluyó el intervalo hasta 4.4Ghz el límite de operación de la tarjeta NI USRP 2932, en pasos de 0.1GHz como se observa en la tabla 4-3.

Tabla 4-3: Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro con la antena bocina piramidal a una frecuencia central de 3.7GHZ.

Frecuencia (GHz)	Valor (dBm)
2,7	-54,8
2,8	-49,1
2,9	-48,04
3	-43,4
3,1	-53,2
3,2	-46,7
3,3	-49,5
3,4	-41,5
3,5	-53,2
3,6	-44,9
3,7	-16,72
3,8	-40,4
3,9	-42,2
4	-40,5
4,1	-45,6
4,2	-45,4
4,3	-57,5
4,4	-55,3

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En el gráfico 6-3 se observa el patrón de transmisión en cada frecuencia obtenido en la tabla 4-3

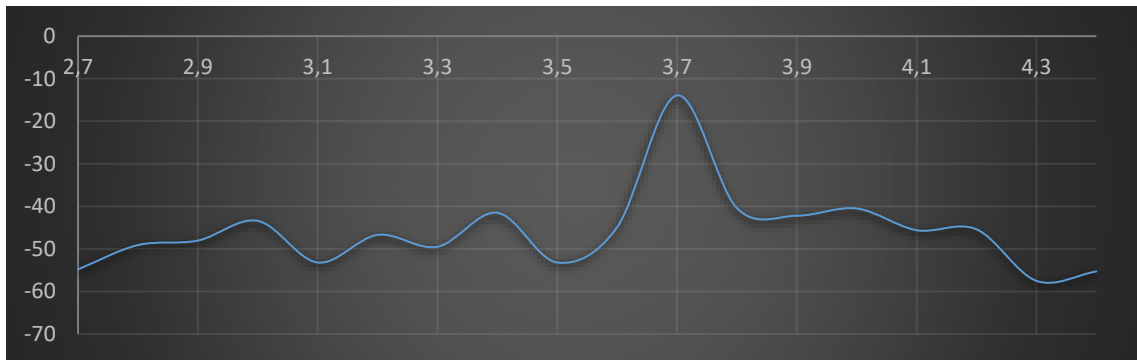


Gráfico 6-3. Patrón de transmisión del sistema de antenas bocina piramidal banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

3.2. Pruebas con el analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight

Las pruebas en el analizador de redes vectoriales se realizaron de cada sistema radiante directivo construido a una frecuencia central de 3.7 GHz dentro de la banda-S, obteniendo los parámetros de dispersión o scattering S11.

3.2.1. Prueba con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.

En la figura 5-3 se observa el montaje realizado para la medición de los parámetros S11 con el analizador de redes vectoriales propiedad de la ESPOCH y el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica.



Figura 5-3. Pruebas con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Posterior a la calibración del analizador de redes vectoriales y el montaje del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip se mide los parámetros de dispersión o S11 de esta, en la figura 6-3 se muestra el patrón obtenido de este parámetro a una frecuencia central de 3.7GHz, con una frecuencia de inicio de 3.2GHz y de 4.2GHz de parada.



Figura 6-3. Prueba 1 con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Observando la prueba realizada en la figura 6-3, se determinó a una frecuencia de 3.7GHz un parámetro S11 de -34.768 dB, óptimo para un sistema directivo para ser utilizado en SDRadar, además de un ancho de banda de 0.1Ghz.

Realizando una segunda prueba como se observa en la figura 7-3, se determinó un parámetro S11 de -34.359 dB, y un ancho de banda de 0.1Ghz.



Figura 7-3. Prueba 2 con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Realizadas la medición del parámetro S11 en las dos pruebas tienen una caída de -34dB con una diferencia de 0.409dB siendo este desfase generado por el ruido o interferencia en el laboratorio.

3.2.2. Prueba con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal Banda-S

En la figura 8-3 se observa el montaje realizado para la medición de los parámetros S11 con el analizador de redes vectoriales propiedad de la ESPOCH y el sistema de antenas bocina piramidal banda-S en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica.

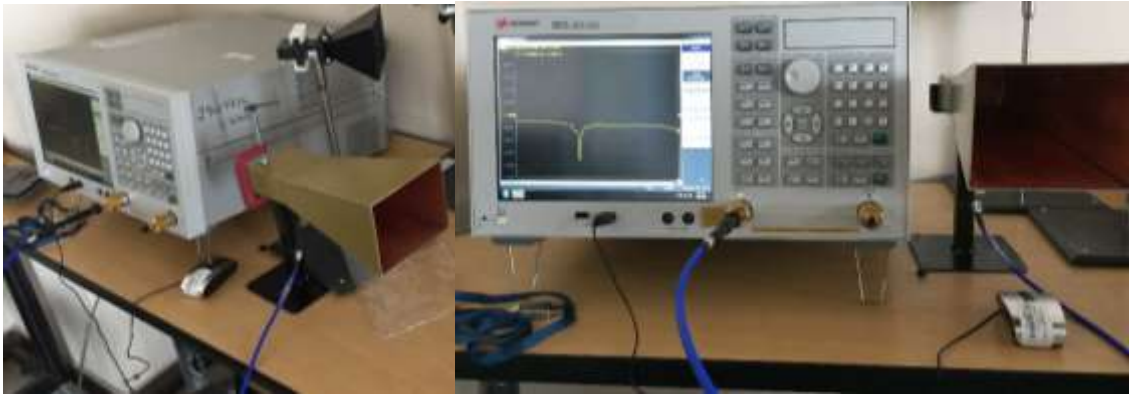


Figura 8-3. Pruebas con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Ulterior a la calibración del analizador de redes vectoriales y el montaje del sistema de antenas bocina piramidal banda-S se mide los parámetros de dispersión o scattering S11, en la figura 9-3 se muestra el patrón obtenido de este parámetro a una frecuencia central de 3.7GHz, con una frecuencia de inicio de 3.3Ghz y de 4.3Ghz de parada.

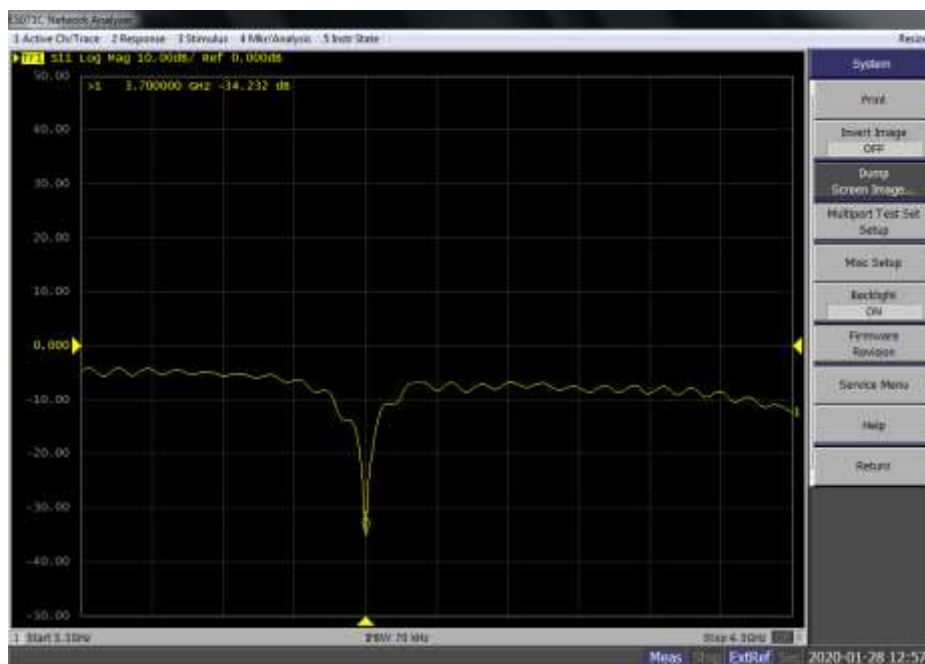


Figura 9-3. Prueba 1 con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal banda-S

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Observando la prueba realizada en la figura 9-3, se determinó un parámetro S11 de -34.232 dB a una frecuencia de 3.7GHz, ideal para un sistema directivo para ser utilizado en SDRadar, además de un ancho de banda de 0.1Ghz.

Realizando una segunda prueba como se observa en la figura 10-3 rotando la antena bocina se determinó un parámetro S11 de -24.143 dB, y un ancho de banda de 0.1Ghz.

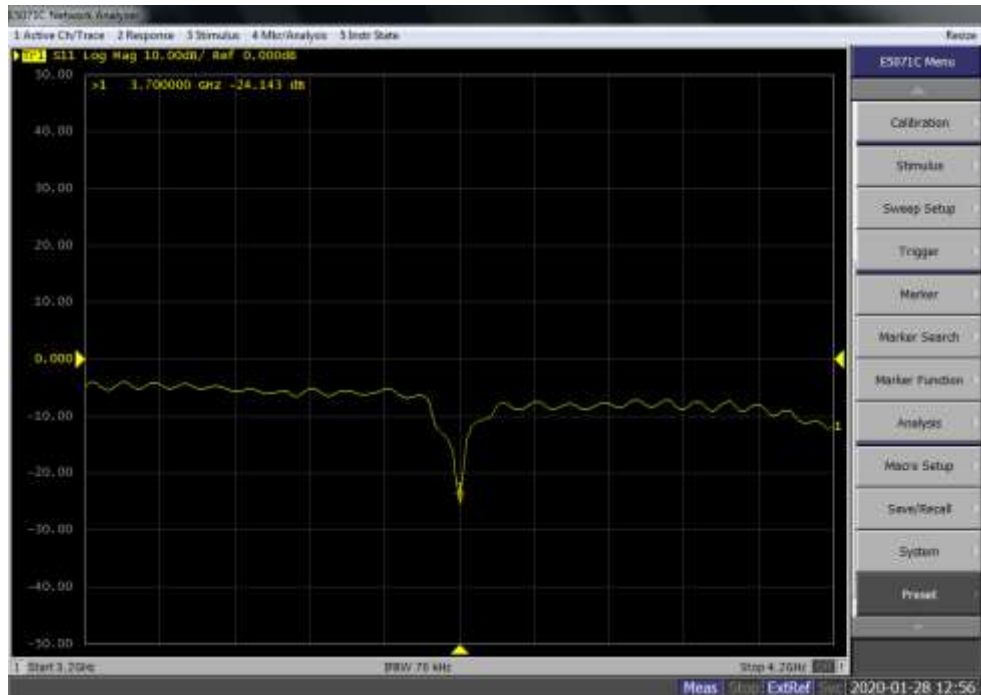


Figura 10-3. Prueba 2 con el analizador de redes vectoriales del sistema de antenas bocina piramidal banda-S.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Realizadas las pruebas para determinar el parámetro S11 en las dos se tiene una caída de -34 y -24 dB con una diferencia de -10dB siendo este desfase generado por el ruido o interferencia en el laboratorio al rotar la antena siendo esta directiva.

3.3. Comparación de los dos sistemas radiantes directivos

Realizadas las pruebas en los equipos del laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica se obtuvo los resultados expuestos en las tablas 5-3 y 6-3 para analizar qué sistema radiante directivo construido en el presente trabajo posee mayores prestaciones.

Tabla 5-3: Tabla de valores en dB obtenidos en el analizador de redes vectoriales de los sistemas radiantes directivos.

Analizador de redes vectoriales S11(dB)			
Sistema radiante directivo	Prueba 1	Prueba 2	Impedancia de entrada Z_{in}
Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	-34.768	34.359	50Ω
Antenas bocina piramidal	-34.232	-24.143	50Ω

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Tabla 6-3: Tabla de valores en dBm obtenidos en el analizador de espectro de los sistemas radiantes directivos.

Analizador de espectros(dBm)					
Sistema radiante directivo	f_c 3.7GHz	-90°	90°	180°	Impedancia de entrada Z_{in}
Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	-11.78	-37.91	-38.93	-43.25	50Ω
Antenas bocina piramidal	-16.72	-41.58	-36.89	-41.58	50Ω

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Expuestos los valores de los parámetros determinados de cada sistema radiante directivo comparando estos observando la tabla 5-3 el sistema arreglo de antenas parche 4x4 microstrip tiene una mejor respuesta de parámetros de dispersión, posteriormente los valores en la tabla 6-3 nos indican una mayor ganancia del sistema arreglo de antenas parche 4x4 microstrip, al tener los dos sistemas similares ancho de banda, impedancia de entrada y directivas, los valores analizados nos indican que el sistema arreglo de antenas parche 4x4 microstrip al contener una matriz de 16 antenas dispone de mejores prestaciones al otro sistema construido, siendo ideal para SDRadar.

3.4. Implementación y pruebas y análisis del sistema SDRadar.

Posterior a las pruebas, validación y análisis de los sistemas radiantes directivos se procedió a la implementar el sistema SDRadar en conjunto con la tarjeta NI USRP 2932 figura 11-3(a-c), como controlador e interface de este sistema el software Labview 2019 con licencia propiedad de la ESPOCH

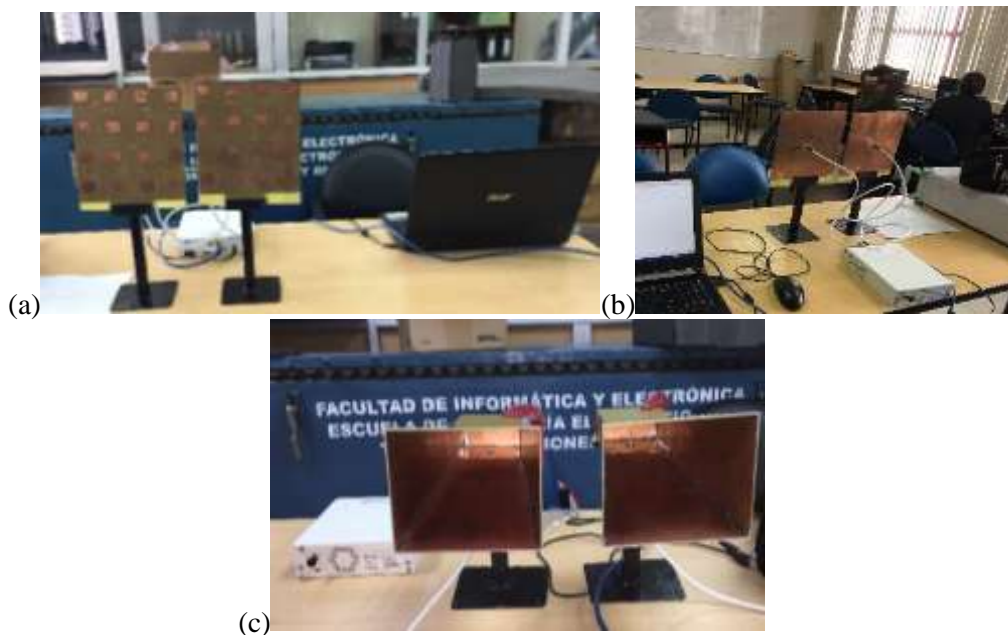


Figura 11-3. Implementación SDRadar. (a) arreglo de antenas parche 4x4 microstrip, (b) prueba reflejando en pizarrón laboratorio microondas, (c) antenas bocina piramidal.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Posteriormente al montaje del sistema SDRadar se realizó las pruebas en los elementos reflectivos del laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y electrónica, enfocándonos en tres elementos: un totalmente reflectivo, medio reflectivo y un no reflectivo, para los cuales se eligió un lamina de metal, el pizarrón y una pared respectivamente, medición realizada a 3.5 metros de distancia, 3.7Ghz de frecuencia de operación, 40Mhz de ancho de banda, 5MHz de IQ rate. En los siguientes ítems se describe las pruebas realizadas con cada uno de los sistemas radiantes directivos y los tres materiales reflectivos escogidos.

3.4.1. SDRadar implementado con el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip banda-S.

Implementado el sistema SDRadar se realizó las pruebas de este en los diferentes materiales reflejantes a una distancia de 3.5 metros con la detección de un objeto.

Para la primera prueba se realizó frente a una pared interfiriendo momentáneamente con un objeto como se muestra en el gráfico 7-3 (a-c) los resultados en función de la frecuencia y tiempo.

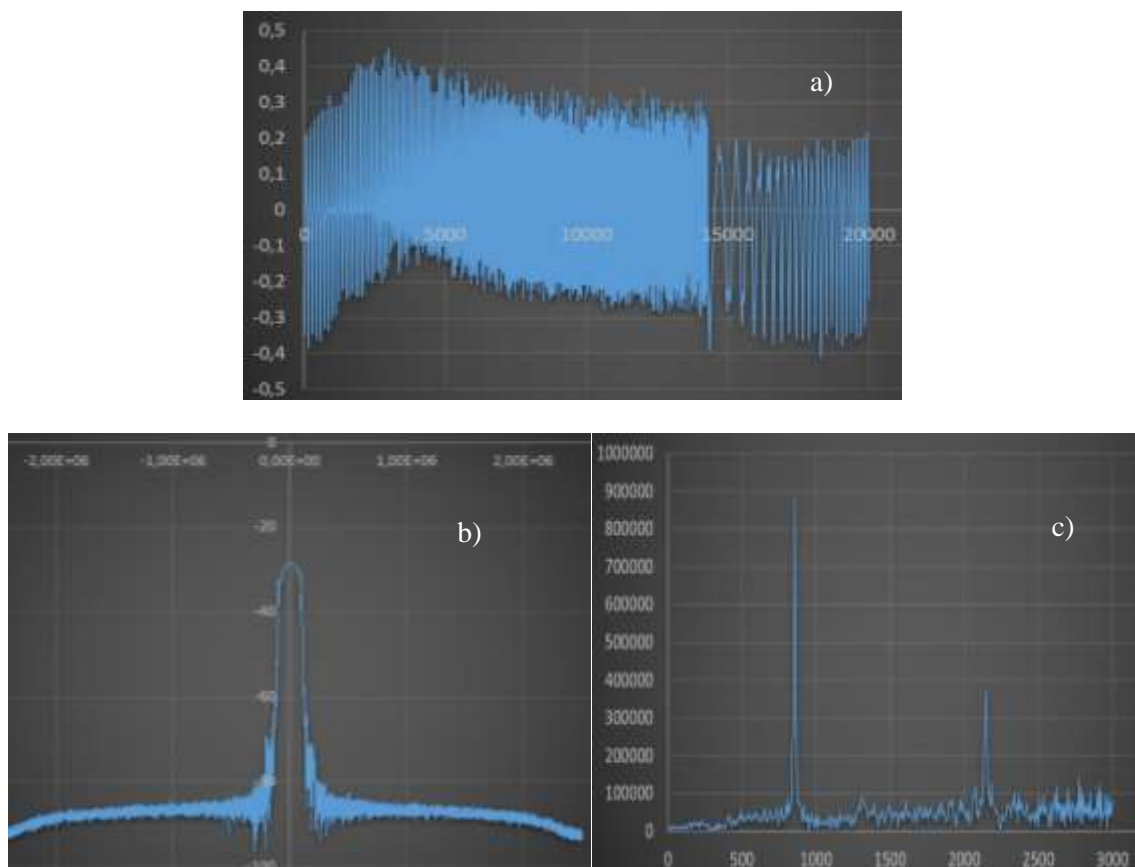


Gráfico 7-3. Resultados SDRadar reflejado en una pared, (a) señal fmcw (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En la segunda prueba se realizó frente a un pizarrón obstruyendo la transmisión momentáneamente con un objeto como se muestra en el gráfico 8-3 (a-c).

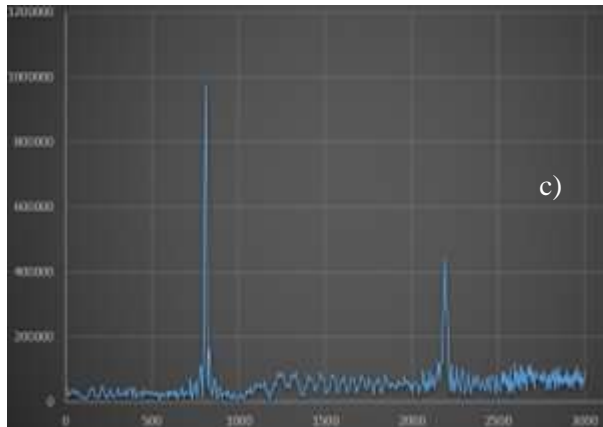
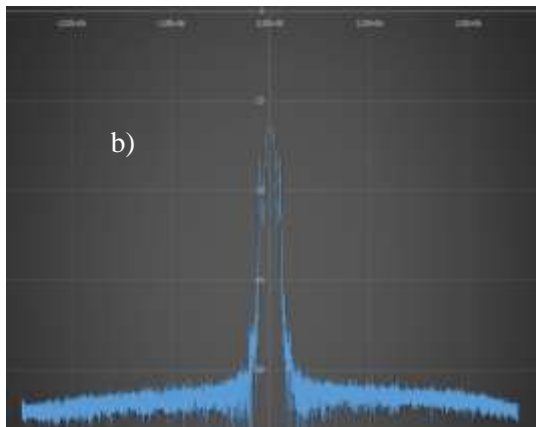
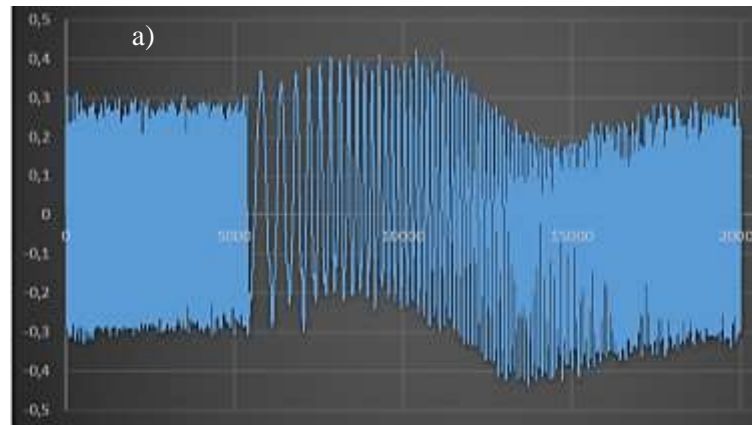
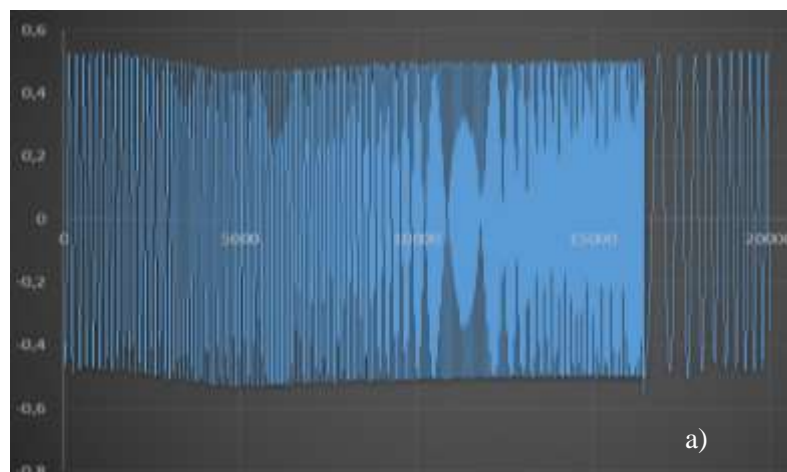


Gráfico 8-3. Resultados SDRadar reflejado en un pizarrón, (a) señal fmcw (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

Finalmente, la última prueba se realizó frente una superficie metálica a igual que las pruebas anteriores obstruyendo momentáneamente la transmisión del sistema, exponiendo los resultados en el gráfico 9-3(a-c)



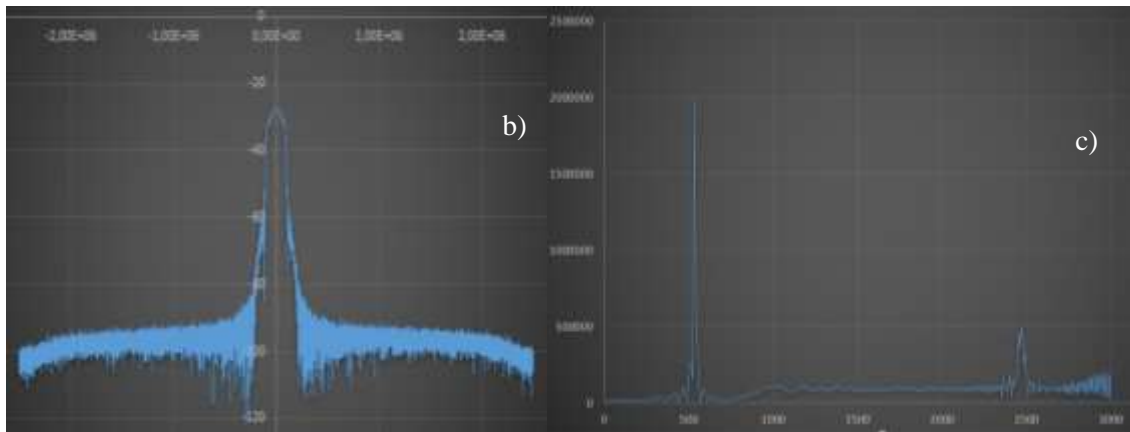


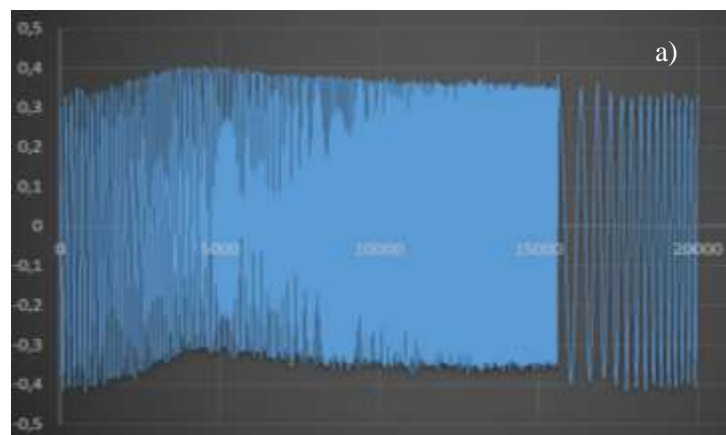
Gráfico 9-3. Resultados SDRadar reflejado en una superficie metálica, (a) señal fmcw (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

3.4.2. SDRadar implementado con el sistema de antenas bocina piramidal banda-S

Para las pruebas del sistema de antenas bocina piramidal banda-S se las realizo igual que las del anterior sistema probando en tres superficies con distinta reflexión y obstruyendo con un objeto la transmisión, las mediciones se efectuaron a una distancia de 3.5 metros, con los parámetros ya establecidos.

En la primera medición se la realizo frente a una pared del laboratorio de microondas siendo esta superficie absorbente de la señal transmitida, en gráfico 10-3 se observa los resultados obtenidos en función del tiempo y frecuencia.



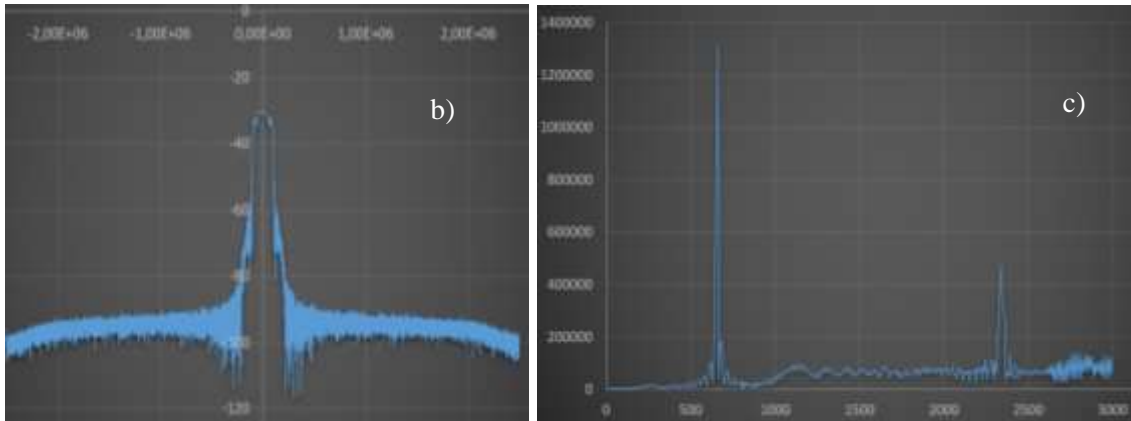


Gráfico 10-3. Resultados SDRadar reflejado en la pared, (a) señal fmcw (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En el gráfico 11-3 se muestra los resultados de la segunda prueba como superficie se usó el pizarrón del laboratorio de microondas.

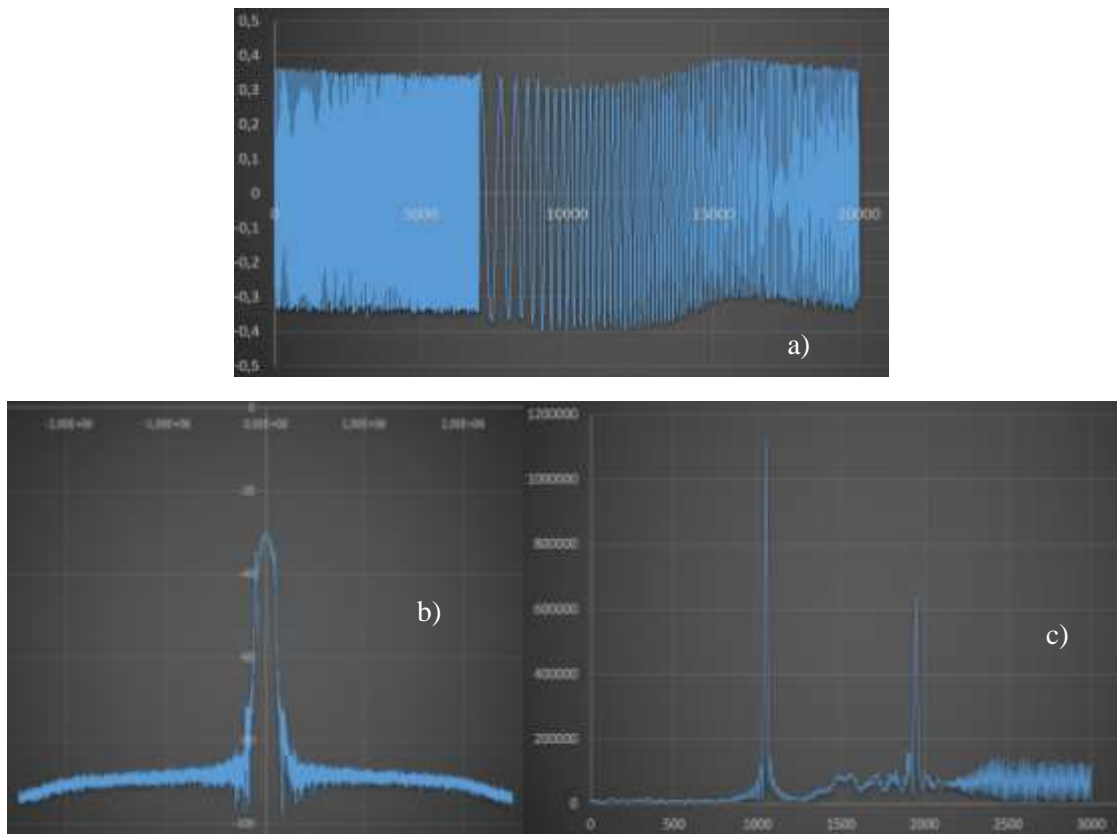


Gráfico 11-3. Resultados SDRadar reflejado en el pizarrón, (a) señal fmcw (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

En la tercera prueba se transmite en una superficie metálica siendo un elemento totalmente reflejante, además al igual que las mediciones anteriores se obstruye la transmisión y se obtiene los resultados expuestos en el gráfico 12-3

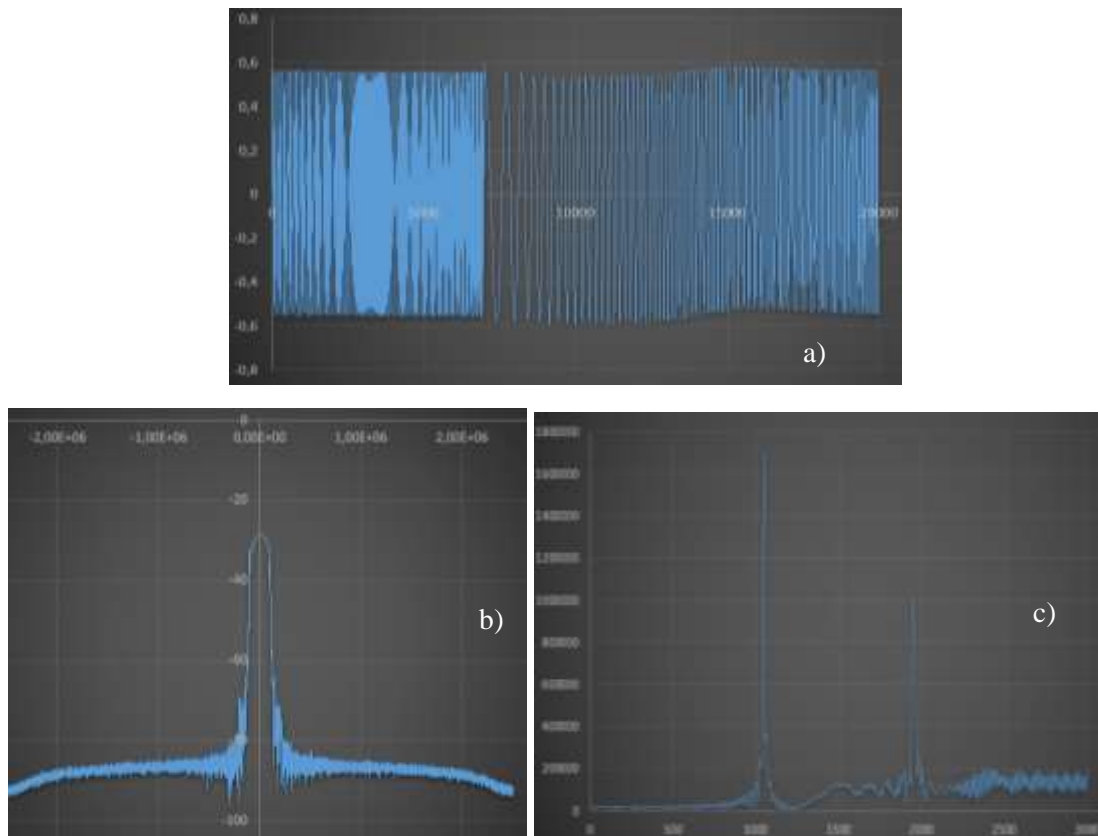


Gráfico 12-3. Resultados SDRadar reflejado en el pizarrón, (a) señal fmcw (tiempo), (b) respuesta en frecuencia, (c) radargrama.

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

3.5. Análisis de resultados

Realizados las pruebas con el analizador de espectros y analizador de redes vectoriales propiedad de la ESPOCH se efectuó uno de los objetivos comparar los sistemas radiantes directivos construidos, en lo cual se determinó que el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip tiene mejores prestaciones, además que los dos sistemas cumplen con los requerimientos para emplearse en SDRadar, cumpliendo con las perspectivas del diseño.

Partiendo de las mediciones realizadas también se determinó que a una distancia de 3.5 metros trabaja el sistema SDRadar en óptimas condiciones, se realizó a esta medida ya que el objetivo de las antenas construidas es trabajar con estas en el laboratorio de microondas.

Los parámetros obtenidos en la implementación SDRadar observados en las figuras de los resultados indican que a pesar que se interrumpe la transmisión con un objeto momentáneamente transmite y se recepta una buena ideal porción de la trasmisión con la detección de este evento.

Uno de los parámetros que se determinó en el analizador de redes vectoriales es el ancho de banda de los dos sistemas el cual tomando desde los -10db es de 100MHZ.

CAPÍTULO IV

4. ESTUDIO ECONÓMICO

4.1. Estudio económico del diseño y construcción de los sistemas radiantes directivos

Para el diseño y construcción se ha invertido económicamente en licencias de software para el modelamiento y validación, así también en la fabricación de los dos sistemas tanto para el arreglo de antenas parche 4x4 microstrip y bocina piramidal, estos valores se detallan en los subsiguientes literales.

4.1.1. Estudio económico del Diseño de los sistemas radiantes directivos

En la tabla 1-4 se exhibe los costos de software y hardware empleado en el proceso de diseño de los sistemas radiantes directivos para la antena tipo bocina piramidal se utilizó el Ansoft HFSS en su versión trial sin ningún costo durante un periodo de tiempo, para el modelamiento del arreglo de antenas parche 4x4 microstrip se utilizó el CST Studio por sus prestaciones en su edición estudiante free.

Tabla 1-4: Tabla de precios de software y hardware para el diseño de los sistemas radiantes directivos.

Cantidad	Descripción	Precio unitario/ Tipo de licencia (software).	Precio total
1	CST STUDIO SUITE Student Edition	free	-
1	Ansoft HFSS	trial	-
1	Laptop ACER A515-51G-87PK INTEL i7 8va generación	1100.00	1100.00
Total			1100.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Tratando con software libre o trial tienen un costo de cero, como costo total del diseño de los dos arreglos parche 4x4 microstrip se presentó mil cien dólares americanos con cero centavos.

4.1.2. Estudio económico de la construcción de los sistemas radiantes directivos

Para la fabricación de los sistemas tanto para el arreglo parche 4x4 microstrip y bocina piramidal se emplearon materiales y elementos electrónicos disponibles en la localidad, en las tablas 2-4 y 3-4 se muestran cada uno de estos.

A. *Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip*

En la tabla 2-4 se exhibe la cantidad, descripción y precio de cada material utilizado en la construcción de las dos antenas (arreglos parche 4x4 microstrip), además de los complementos del kit completo, la caja y recubrimiento de protección, brocas utilizadas en el proceso de freseo de la placa y conectores SMA.

Tabla 2-4: Tabla de precios de los materiales y elementos electrónicos para la construcción del sistema de arreglos parche 4x4 microstrip

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
2	PLACA FR4 DOBLE	9.00	18.00
1	Kit brocas CNC 0.3-0.7mm	10.00	10.00
1	Kit brocas CNC 0.8-3.17mm	24.00	24.00
2	Conector SMA hembra	3.50	7.00
1	Caja de madera	10.00	10.00
1	Esponja recubrimiento caja	1.00	1.00
1	Rollo de estaño	1.00	1.00
Total			71.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Los dos arreglos parche 4x4 microstrip reflejaron un valor de construcción de 71 dólares con un valor unitario de 35 dólares americanos con cincuenta centavos.

B. *Antena bocina piramidal*

En la construcción de las dos antenas bocinas para el sistema SDRadar se utilizó materiales y elementos electrónicos disponibles en la ciudad, en la tabla 3-4 se describen cada uno de estos y su precio. Este sistema es complementado en un kit completo para su montaje el cual incluye las bases, caja y recubrimiento de protección, presas para sujetar las antenas y sus respectivos conectores.

Tabla 3-4: Tabla de precios de los materiales y elementos electrónicos para la construcción del sistema de antenas bocina piramidal.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
4	PLACA FR4 SIMPLE	7.00	28.00
1	Kit brocas CNC 0.3-0.7mm	10.00	10.00
1	Kit brocas CNC 0.8-3.17mm	24.00	24.00
2	Conector SMA hembra	3.50	7.00
1	Caja de madera	20.00	20.00
2	Prensas 2 pulgadas	3.00	6.00
2	pedestales	7.50	15.00
1	Esponja recubrimiento	3.00	3.00
1	Rollo de estaño	8.00	8.00
Total			121.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Las dos antenas bocina piramidal reflejaron un valor de construcción de 121 dólares con un valor unitario de 60 dólares americanos con cincuenta centavos.

4.2. Comparativa de los sistemas radiantes directivos construidos con los disponibles en el mercado.

Los sistemas radiantes directivos específicos para sistemas radares con la bocina piramidal y el arreglo rectangular de parches microstrip son escasamente ofertados por las industrias de telecomunicaciones, en las tablas 4-4 y 5-4 se expone el precio de cada sistema, disponible en el mercado y construidos en esta investigación respectivamente para su comparación.

Tabla 4-4: Tabla de precios de los sistemas radiantes directivos bocina piramidal y arreglo parche 4x4 microstrip disponibles en el mercado.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
2	Antena bocina Pasternack con guía WR-284 S-Band	899.00	1798.00
2	Endurosat S-Band 4x4 Patch Array	8125.00	16250.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Tabla 5-4: Tabla de precios de los sistemas radiantes directivos bocina piramidal y arreglo parche 4x4 microstrip.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
2	Antena bocina piramidal	60.50	121.00
2	Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	35.50	71.00
Total			192.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

De los costos exhibidos, en los sistemas arreglo parche 4x4 microstrip el valor de los ofertados en el mercado son dieciséis mil cientos setenta y nueve dólares americanos mayor al construido en este trabajo de titulación. En cuanto a los sistemas bocina piramidal el costo de los disponibles en el mercado es de mil seiscientos setenta y siete dólares americanos mayor al realizado en esta investigación.

4.3. Comparativa de sistemas radares por hardware y SDRadar (Banda-S)

Los sistemas SDRadar al ser radares definidos por software tienen la ventaja de ser más económicos que los implementados puramente por hardware o disponibles en el mercado, en las tablas 6-4 y 7-4 se expone los presupuestos de los dos sistemas realizados con las antenas bocina piramidal y arreglos parche 4x4 microstrip respectivamente operando en la banda S. Para la implementación del sistema SDRadar se manejó el software Labview como complemento controlador e interface de todo el sistema radar, con licencia institucional propiedad de la ESPOCH. En la tabla 8-4 se muestran los sistemas radares (banda S) disponibles en el mercado.

Tabla 6-4: Tabla de precios de SDRadar implementado con el sistema de antenas bocina piramidal

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	Laptop ACER A515-51G-87PK INTEL i7 8va generación	1100.00	1100.00
1	NI USRP 2932	5070.00	5070.00
1	Antena bocina piramidal	60.50	121.00
1	LabVIEW 2019	Licencia ESPOCH	-
Total			6291.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

Tabla 7-4: Tabla de precios de SDRadar implementado con el sistema de arreglos de antenas parche 4x4 microstrip.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	Laptop ACER A515-51G-87PK INTEL i7 8va generación	1100.00	1100.00
1	NI USRP 2932	5070.00	5070.00
2	Arreglo de antenas parche 4x4 microstrip	35.50	71.00
1	LabVIEW 2019	Licencia ESPOCH	-
Total			6241.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

En la tabla 8-4 se presenta los valores de dos sistemas radares ofertados en el mercado uno para sistemas de control de tráfico aéreo y el otro para el control del clima, al igual que los implementados en esta investigación trabajando en la banda S.

Tabla 8-4: Tabla de precios de sistemas radares de control de tráfico aéreo y control de clima

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	S-Band Air Traffic Control Radar(ASCSIGNAL)	1,265,000.00	1,265,000.00
1	S-Band Weather Radar (ASCSIGNAL)	425,000.00	425,000.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020

De los datos de la tabla del sistema SDRadar con las antenas bocina piramidal implementado en esta investigación es 1'258,709.00 dólares americanos menor que el radar de control de tráfico aéreo y 418,709 dólares americanos menor que el radar de control de clima ofertados en el mercado.

Los valores expuestos en la tabla del sistema SDRadar con los dos arreglos parche 4x4 microstrip es 1'258,759.00 dólares americanos menor que el radar de control de tráfico aéreo y 418,759 dólares americanos menor que el radar de control de clima disponibles en el mercado.

4.4. Costo de equipos utilizados propiedad de la ESPOCH

En la tabla 9-4 se muestra el costo de cada uno de los equipos propiedad de la ESPOCH utilizados en el proceso de construcción, validación y caracterización hasta la implementación de SDRadar con los sistemas radiantes directivos.

Tabla 9-4: Tabla de precios de los equipos de microondas utilizados propiedad de la ESPOCH.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	Analizador de espectros MS2724C Anritsu	24000.00	24000.00
1	Tarjeta NI USRP-2932	5070.00	5070.00
1	Analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight	150000.00	150000.00
1	CNC ProtoMat LPKF S103	80000.00	80000.00
Total			259070.00

Realizado por: Ortiz, Mauricio I. ;2020.

CONCLUSIONES

Los valores obtenidos en la caracterización de los sistemas radiantes directivos, posterior a su construcción son similares a los teóricos del diseño, en el arreglo de antenas -34.768 dB y en la bocina piramidal -24.143 dB, teniendo en cuenta las pérdidas por construcción y ensamblaje, operando a una frecuencia de 3.7 GHz en la banda-S, así también trabajando en un ancho de banda que soporta los límites de la tarjeta NI USRP 2932 de 20 a 40 MHz, estos resultados cumplen con los objetivos trazados para la implementación de SDRadar.

Ulteriormente a las pruebas realizadas de los dos sistemas radiantes construidos, se determinó que el arreglo de antenas parche 4×4 tiene mejores prestaciones a diferencia del sistema bocina piramidal con una media de -10 dB de diferencia, esto debido que está formado por una matriz de 16 antenas rectangulares formando un lóbulo de radiación más directivo con mayor ganancia, siendo este más idóneo para la implementación de SDRadar, teniendo en cuenta que las antenas bocina piramidal también poseen características óptimas para estos sistemas.

Fundamentado en el estudio económico se estableció la gran diferencia económica entre los sistemas radiantes construidos en esta investigación y los disponibles en el mercado, siendo desde 10 a 1000 veces más costos, así logrando con este proyecto realizar dispositivos radiantes de bajo costo, siendo estos una opción ideal para aplicaciones académicas, así también reafirmando que SDRadar es un sistema económico en contraste a los ofertados en la industria de la radiodetección.

Cumpliendo con uno de los objetivos la construcción de los dos sistemas radiantes directivos en el presente trabajo de titulación se aporta a la investigación en el área de la teledetección en la Facultad de Informática y Electrónica, contribuyendo con dos dispositivos para ser implementados en futuras investigaciones en el laboratorio de microondas.

RECOMENDACIONES

En el proceso de construcción se tuvo grandes limitantes tanto en la disponibilidad de materiales en el mercado local o nacional y dispositivos especializados para la fabricación de sistemas radiantes, se recomienda previo al diseño investigar la oferta de estos en el mercado o en la institución, para la elección óptima de parámetros, así también las limitantes de los equipos a utilizar en el proceso de implementación, medición o pruebas.

Para el proceso de diseño de los sistemas radiantes y la etapa de mediciones e implementación de SDRadar, conlleva una gran carga computacional, para lo cual es idóneo un equipo CORE i5 o i7 de séptima u octava generación con mínimo 8gb de memoria RAM, además se recomienda el desarrollo de algoritmos para la optimización de estos procesos con la tarjeta USRP.

Para la caracterización de sistemas radiantes y análisis de señales debe implementarse un espacio apto para estos proyectos como una cámara anecoica donde se pueda utilizar los equipos de microondas, obteniendo parámetros libres de ruido o interferencias exteriores.

Para el uso de los dispositivos del laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica elaborados en trabajos de titulación se debería integrar una base de datos con registros para el uso de cada uno de estos con el manual y si es el caso la interface o software controlador.

En el proceso de implementación y medición del sistema SDRadar debe separarse y ubicarse los sistemas radiantes de forma ideal para este proceso ya que puede existir interferencias o solapamiento entre estas.

BIBLIOGRAFÍA

ANRITSU. *Spectrum Master™ High Performance Handheld Spectrum Analyzer MS2724C 9 kHz to 20 GHz.* USA: Anritsu Company, 2013, pp. 1-8.

ANSYS. *Ansys HFSS Capabilities High-Frequency Electromagnetic Solvers* [en línea]. ANSYS Inc, 2015. [Consulta: 13 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/hfss-capabilities#cap2>

ARSLAN, Hüseyin. *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems.* South Florida, Tampa, FL-USA: Editorial Springer, 2007. ISBN 978-1-4020-5541-6, pp. 109-112.

BALANIS, Constantine A. *Antenna Theory Analysis and Design.* Tercera edición. New Jersey- United States of America: Editorial John Wiley & Sons, 2012. ISBN: 0-471-66782-X, pp. 1-781.

CHARVAT, Gregory L. *Small and Short-Range Radar Systems.* New York- United States of America: Editorial Taylor & Francis Group, 2014. ISBN: 13: 978-1-4398-6600-9, pp.1.

COSTANZO, S. et al. *Potentialities of usrp-based software defined radar systems.* [en línea]. 2014. DOI 10.2528/PIERB13052904.

FERRANDO BATALLER, Miguel, et al. *Antenas. Segunda Edición. Cataluña-España: Editorial Edicions UPC,2002.* ISBN: 84-8301-625-7, p. 22.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES, *Keysight Technologies E5071C ENA Network Analyzer E5092A Conigurable Multiport Test Set.* USA: Keysight Technologies, 2018. Pp.3-33.

LPKF LASER&ELECTRONICS. *Professional In-House PCB Prototyping LPKF ProtoMat Circuit Board Plotters.* Garbsen- Alemania: LPKF Laser & Electronics AG, 2019,pp.2-7.

NATIONAL INSTRUMENTS, *USRP-2932 Software Defined Radio Device.* United States: National Instruments, 2017,pp. 1-4.

NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USRP 2930/2932 GUIDE* [en línea]. 2017 [Consulta: 8 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376356a.pdf>.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Radio Definido por Software USRP - National Instruments* [en línea]. 2017 [Consulta: 8 septiembre 2019]. Disponible en: [http://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio device?modelId=125052](http://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio-device?modelId=125052).


NATIONAL INSTRUMENTS. *Specifications USRP-2932* [en línea]. 2017 [Consulta: 8 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375988d.pdf>.

RONCANCIO, H., & CIFUENTES, H. *Tutorial de LABVIEW*. [en línea]. 2000 [Consulta: 10 abril 2019]. Disponible en: <http://www.etitudela.com/entrenadorcomunicaciones/downloads/labviewtutorialuniversidadfranciscodecaldas.pdf>

SIMULIA DASSAULT SYSTÈMES, *CST STUDIO SUITE® Electromagnetic and Multiphysics Simulation Software*. Darmstadt-Germany: CST, a Dassault Systèmes Company.pp. 3-29.

SKOLNIK, Merrill I. *Radar Handbook*. Tercera edición. United States of America: Editorial McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-0-07-148547-0, pp.1.1-1.7.

WOLFF, Christian. *Fundamentos de radar - La Ecuación de Radar* [en línea]. 2010 [Consulta: 10 abril 2019]. Disponible en: [http://www.radartutorial.eu/01.basics/La Ecuación de Radar.es.html#this](http://www.radartutorial.eu/01.basics/La_Ecuación_de_Radar.es.html#this).



22-04-2020