

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACION Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
DE CONTROL DE POSICIÓN EN AZIMUT Y  
ELEVACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE  
CARACTERÍSTICAS DE RADIACIÓN DE ANTENAS  
USANDO LA CÁMARA ANECOICA”**

**FAUSTO GONZALO CARRERA FLORES  
CHRISTIAN ENRIQUE CUVI CONSTANTE**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR  
2012**

## **CERTIFICACIÓN**

Por medio de la presente certificamos que el trabajo titulado “Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Posición en Azimut y Elevación para la Obtención de Características de Radiación de Antenas Usando la Cámara Anecoica”, realizado por los señores Fausto Gonzalo Carrera Flores, con cédula de ciudadanía 171618137-3 y Christian Enrique Cuvi Constante, con cédula de ciudadanía 171087147-4, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Sangolquí, 16 de Febrero de 2012

.....  
Ing. Patricio Vizcaíno

**DIRECTOR**

.....  
Ing. Marco Gualsaquí

**CODIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis profesores que aportaron sus conocimientos, a mi compañero de tesis que apoyo muy fuerte en la realización de este documento.

*Christian*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a mi Lola, por darme las fuerzas para continuar a pesar de todos los inconvenientes que se me han presentado en esta vida.

Al Ingeniero Marco Gualsaquí y al Ingeniero Patricio Vizcaíno, por guiarnos a través de esta larga travesía llamada Tesis, con su sabiduría y consejos, su confianza y enorme amor a la enseñanza. Gracias por ayudarme a terminar ésta etapa tan importante de mi vida.

A Christian, por soportar conmigo este trajín tan largo y nunca darse por vencido. Gracias por acompañarme y ser tan buen compañero de viaje.

A mi madre por su amor incondicional y todos sus esfuerzos que me han colocado en este hito trascendental en mi vida.

A mi abuelita Enmita y mi abuelito Gonzalo, por su inmenso sacrificio y apoyo ilimitado para que siga adelante. Gracias por cuidarme como a un hijo y mimarme como a un nieto.

A mi hermana Iliana y a mi padre, por estar conmigo siempre, independiente de diferencias y peleas.

A mis hermanos Gamines y mejores amigos, por permitirme vivir tan grandiosos momentos. Gracias por su amor, apoyo incondicional y gratos recuerdos.

A mi abuelito Magdo por su sabiduría y fantástico apoyo.

A mis tías, tío, primos y primas, por darle sentido a mi vida y a todo lo que hago.

A mis 600, amigos y amigas de la universidad. Gracias por hacer tan soportable y tan linda esta etapa de mi vida.

*Fausto*

## **DEDICATORIA**

Dedico esta documento a mi madre, cuando se quiere se puede.

*Christian*

## **DEDICATORIA**

A Dios y a mi Lola, por cuidarme día y día, renovar mi fe y mostrarme que siempre hay una razón para seguir adelante.

A mi madre, por apoyarme a pesar de todas mis locuras y ocurrencias, por estar siempre a mi lado, soportando vientos y mareas con tal de verme triunfar y ser exitoso.

A mi abuelita Emnita y a mi abuelito Gonzalo, porque sin ellos sencillamente no estaría aquí y ahora.

A mi padre, por su apoyo incondicional a pesar de las distancias que nos separan.

A mi hermana Iliana y a mi niño Kaleb, por ser la razón que me hace seguir luchando.

A mis loquitas preciosas, Ju y Cami, porque sin ellas mi vida carecería de la alegría necesaria para continuar.

A mis hermanos Gamines, por brindarme ese amor y esa amistad que hace que valga la pena seguir caminando este sendero que se llama vida.

*Fausto*

## **PRÓLOGO**

El presente proyecto se lo presenta como una alternativa técnica, para la obtención del patrón de radiación de diferentes antenas de prueba, mediante la utilización de la cámara anecoica, que se encuentra en el laboratorio de RF (Radio Frecuencia); que pertenece al Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE.

De esta manera, mediante la realización de prácticas de laboratorio, en el área de RF y antenas, se pretende afianzar los conocimientos adquiridos, de una forma teórica, en el salón de clase.

Cabe mencionar que en la actualidad existe, dentro del Departamento de Eléctrica y Electrónica, un sistema similar para la obtención del patrón de radiación de antenas de prueba, pero este se encuentra inutilizado; además de que su alto costo representa un riesgo y un cierto miedo, al estudiante, al instante de realizar cualquier tipo de práctica de laboratorio.

De igual manera, es importante señalar que hoy en día existen muchos servicios de radiocomunicaciones que utilizan señales de microondas para transportar grandes volúmenes de información. En este sentido, el sistema de control de posición, en azimut y elevación, para la obtención de características de radiación de antenas utilizando la cámara anecoica, es un entrenamiento con antenas diseñadas para este propósito en específico, ayudando a los estudiantes a familiarizarse con sistemas de comunicaciones basados en radiofrecuencia y así reforzar los conocimientos en sistemas de microonda.

Mediante la interacción de conocimientos, tanto de mecánica y electrónica, como de la comunicación de información a través de un acoplamiento de señal hacia la PC, se diseñaron interfaces HMI, con las cuales el usuario puede controlar el giro en dos grados de libertad, de las antenas de prueba, y la adquisición de datos de potencia, provenientes del analizador de espectros, para la obtención del patrón de radiación de las antenas.

Finalmente, con el diseño y construcción de este prototipo, se pretende la recuperación de funcionalidad y la reactivación de la cámara anecoica, buscando la resolución de problemas, tales como, la falta de un buen mantenimiento de la misma y la falta de conocimiento, por parte de los estudiantes, acerca de la existencia de este tipo de herramientas dentro del al Departamento de Eléctrica y Electrónica, en el área de Telecomunicaciones.



# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>29</b>
1.1 Antecedentes.....	29
1.2 Justificación e Importancia.....	30
1.3 Características de las Antenas, Tipos de Antenas, Bandas de Operación.....	31
1.4 Equipos de Medición de Radiofrecuencia.....	46
1.4.1 Analizador de Espectros.....	47
1.4.2 Analizador Vectorial.....	51
1.4.3 Generador de RF.....	51
1.4.4 Cables y Conectores para RF.....	53
1.4.5 Cámara Anecoica.....	59
1.5 Sistemas de Control de Posicionamiento en Elevación y Azimut.....	61
1.5.1 Sistemas en Lazo Abierto.....	64
1.5.2 Sistemas en Lazo Cerrado.....	66
1.6 Controladores de Posición y Motores Paso a Paso.....	68
1.6.1 Controladores o Modos de Control.....	68
1.6.2 Motores Paso a Paso.....	72
<b>CAPÍTULO II SISTEMA DE MEDICIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS.....</b>	<b>78</b>
2.1 Materiales.....	78
2.1.1 Software de Simulación del Funcionamiento de Antenas.....	79
2.1.2 Antenas tipo Yagui y Log Periódicas para UHF y Microonda.....	84
2.2 Especificaciones del Sistema.....	96
2.2.1 Tipos de Antenas de Prueba.....	96
2.2.2 Bandas de Operación de las Antenas y Cámara Anecoica.....	102

2.3 Esquema General del Sistema de Medida de Patrones de Radiación de Antenas.....	102
--	-----

### **CAPÍTULO III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN EN AZIMUT Y ELEVACIÓN.....106**

3.1 Diagrama de Bloques del Sistema de Control de Posición en Azimut y Elevación...	106
3.2 Diseño del Servomecanismo en Base a Microcontroladores.....	108
3.3 Simulación del Servomecanismo Mediante Software.....	114
3.4 Diseño y Construcción de la Interfaz HMI.....	115
3.4.1 Comunicación PC con Analizador de Cables y Antenas.....	115
3.4.2 Control y Monitoreo de Servomecanismos.....	117
3.5 Diseño y Construcción de Minitorres de Sustentación.....	124
3.6 Implementación del Servomecanismo.....	126

### **CAPÍTULO IV PRUEBAS Y MEDICIONES.....136**

4.1 Obtención del Patrón de Radiación de Antenas Mediante Software de Simulación...	136
4.2 Controles de Giro en Azimut y Elevación.....	141
4.2.1 Medición de Posicionamiento de Antena en la Minitorre en Azimut.....	141
4.2.2 Medición de Posicionamiento de Antena en la Minitorre en Elevación.....	147
4.3 Medición de Parámetros de Radiación de Antenas UHF y Microonda en Cada Posición.....	150
4.3.1 Pérdida de Retorno.....	151
4.3.2 Razón de Onda Estacionaria.....	153
4.3.3 Pérdida del Cable.....	155
4.3.4 Carta de Smith.....	157
4.3.5 Potencia de Transmisión y Recepción.....	159
4.3.6 Obtención del Patrón de Radiación Total.....	177

### **CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS.....194**

5.1 Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut y Elevación.....	194
5.2 Comparación del Patrón de Radiación Simulado y Teórico.....	203
5.3 Análisis de los Parámetros de Radiación de las Antenas de Prueba.....	216

5.4 Alcances y Limitaciones del Sistema de Medida.....	227
<b>CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>230</b>
6.1 Conclusiones.....	230
6.2 Recomendaciones.....	233
<b>ANEXOS.....</b>	<b>235</b>
ANEXO I – Potencia de Transmisión – Tablas.....	235
ANEXO II – Código Matlab – Interfaz HMI.....	246
ANEXO III – Código PicBasic – Microcontrolador.....	256
ANEXO IV – Costos del Proyecto.....	263
ANEXO V – Datasheet PIC 18F2550.....	265
ANEXO VI – Datasheet LM 7805.....	269
ANEXO VII – Datasheet TIP 121A.....	275
ANEXO VII – Motores Paso a Paso – Azimut.....	280
ANEXO IX – Motores Paso a Paso – Elevación.....	284
ANEXO X – Manual de Usuario.....	286
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>303</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Figura I.1: Diagrama de Patrón de Radiación en 2D y 3D.....	33
Figura I.2: Lóbulos del Patrón de Radiación.....	34
Figura I.3: Esquema de Polarización Más Comunes.....	39
Figura I.4: Esquema del Circuito Equivalente de Impedancia de Entrada.....	40
Figura I.5: Ancho de Banda para un VSWR = 2.....	43
Figura I.6: Distintos Tipos de Antenas.....	44
Figura I.7: Distintos Tipos de Analizadores de Espectros.....	50
Figura I.8: Distintos Tipos de Analizadores Vectoriales.....	51
Figura I.9: Distintos Tipos de Generadores de RF.....	53
Figura I.10: Distintos Tipos de Cables para RF.....	56
Figura I.11: Distintos Tipos de Conectores para RF.....	58
Figura I.12: Distintos Tipos de Cámaras Anecoicas.....	60
Figura I.13: Diagrama de Sistema de Control.....	62
Figura I.14: Diagrama de Bloques de un Sistema en Lazo Abierto.....	66
Figura I.15: Diagrama de Bloques de un Sistema en Lazo Cerrado.....	67
Figura I.16: Diagrama de Bloques de un Sistema en Lazo Cerrado para Controladores de Giro de Motores Paso a Paso en Dos Grados de Libertad.....	68
Figura I.17: Estructura Interna Motores Paso a Paso.....	73
Figura I.18: Circuito y Secuencia para Controlar un Motor Unipolar.....	74
Figura I.19: Circuito y Secuencia para Controlar un Motor de Reluctancia Variable.....	75
Figura I.20: Variedad de Motores Paso a Paso.....	77

## **CAPÍTULO II SISTEMA DE MEDICIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS**

Figura II.1: Ambiente de Desarrollo MATLAB.....	83
Figura II.2: Pantalla Principal del Software de Simulación QY4.....	84
Figura II.3: Configuración Antena Yagi – Uda.....	85
Figura II.4: Típica Configuración Log-periódica de Tira de Metal y Estructura de la Antena.....	89
Figura II.5: Antenas Log-periódicas.....	90
Figura II.6: Antenas Log-periódicas de Diente Trapezoidal.....	91
Figura II.7: Arreglo de Dipolo Log-periódico.....	92
Figura II.8: Conexión Directa de un Arreglo de Dipolo Log-periódico.....	94
Figura II.9: Conexión Entrecruzada de un Arreglo de Dipolo Log-periódico.....	95
Figura II.10: Conexión Coaxial de un Arreglo de Dipolo Log-periódico.....	95
Figura II.11: Características Antena Yagi - 911 [MHz] - Software de Simulación QY4....	97
Figura II.12: Características Antena Yagi – 2.4 [GHz] - Software de Simulación QY4....	98
Figura II.13: Antena Yagi – 911 [MHz] - Construcción Artesanal.....	99
Figura II.14: Antena Yagi – 2.4 [GHz] - Construcción Artesanal.....	100
Figura II.15: Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	101
Figura II.16: Esquema General del Sistema de Medida de Patrones de Radiación.....	102
Figura II.17: Esquema General del Sistema de Medida de Características de Radiación..	104

## **CAPÍTULO III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN EN AZIMUT Y ELEVACIÓN**

Figura III.1: Diagrama de Bloques del Sistema de Control en Azimut y Elevación.....	107
Figura III.2: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador.....	109
Figura III.3: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Inicio de Programa.....	110
Figura III.4: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Modo Manual.....	110
Figura III.5: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Modo Automático.....	111
Figura III.6: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Resolución de -45° a 0° en Elevación.....	112
Figura III.7: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Resolución de 0° a 45° en Elevación.....	113

Figura III.8: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Resolución de 0° a 360° en Azimut.....	114
Figura III.9: Simulación del Funcionamiento del Microcontrolador.....	115
Figura III.10: Ambiente de Desarrollo MATLAB.....	118
Figura III.11: Interfaz HMI Desarrollada en LABVIEW.....	119
Figura III.12: Programación y Diagrama de Flujo Desarrollados en LABVIEW.....	120
Figura III.13: Clase SubVI - Creación de Referencias con Librerías Dinámicas.....	121
Figura III.14: Subrutina Automation Open.....	121
Figura III.15: Parámetros de Entrada y Salida de la Librería Dinámica.....	121
Figura III.16: Subrutinas para el Cálculo del Número de Pasos (Grados de Giro) – Fijación del Nivel de Referencia “Cero”.....	122
Figura III.17 Subrutinas para la Comunicación Microcontrolador – Puerto USB.....	122
Figura III.18: Subrutinas para el Giro Automático, en Azimut, del Motor a Pasos.....	123
Figura III.19: Base de Sustentación.....	124
Figura III.20: Estructura de Elongación.....	125
Figura III.21: Base de Sustentación de Motor en Elevación.....	125
Figura III.22: Minitorre de Sustentación Prototipo SCAE.....	126
Figura III.23: Diagrama de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador.....	127
Figura III.24: Diagrama de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador – Proteus.....	128
Figura III.25: Posición Elementos Dentro de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador.....	128
Figura III.26: Pistas de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador.....	129
Figura III.27: Tarjeta Implementada – Comunicación PC y Microcontrolador.....	129
Figura III.28: Diagrama de la Tarjeta - Control Motores Paso a Paso.....	131
Figura III.29: Diagrama de la Tarjeta - Control Motores Paso a Paso – Proteus.....	132
Figura III.30: Posición Elementos Dentro de la Tarjeta – Control Motores Paso a Paso.....	133
Figura III.31: Pistas de la Tarjeta – Control Motores Paso a Paso.....	134
Figura III.32: Etapa de Acondicionamiento de Voltaje.....	135
Figura III.33: Tarjeta Implementada – Control Motores Paso a Paso.....	135

## CAPÍTULO IV PRUEBAS Y MEDICIONES

Figura IV.1: Interfaz HMI Desarrollada en MATLAB.....	137
Figura IV.2: Mensaje de Conexión Exitosa.....	137
Figura IV.3: Mensajes de Advertencia y Error.....	138
Figura IV.4: Mensaje de Adquisición de Dato Exitosa.....	139
Figura IV.5: Gráfica Señal de Potencia – Obtenida del Analizador de Espectros Anritsu S362E.....	139
Figura IV.6: Mensaje de Adquisición de Dato Finalizada.....	140
Figura IV.7: Patrón de Radiación Obtenido Mediante Interfaz HMI.....	140
Figura IV.8: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	151
Figura IV.9: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	152
Figura IV.10: Pérdida de Retorno – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	152
Figura IV.11: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	153
Figura IV.12: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	154
Figura IV.13: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	154
Figura IV.14: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	155
Figura IV.15: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	156
Figura IV.16: Pérdida del Cable – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	156
Figura IV.17: Carta de Smith – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	157
Figura IV.18: Carta de Smith – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	158
Figura IV.19: Carta de Smith – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	158
Figura IV.20: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 0°– Antena Yagi – 911 [MHz].....	178

Figura IV.21: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 20° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	179
Figura IV.22: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 30° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	179
Figura IV.23: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 45° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	180
Figura IV.24: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación -20° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	180
Figura IV.25: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación -30° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	181
Figura IV.26: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación -45° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	181
Figura IV.27: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	182
Figura IV.28: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	183
Figura IV.29: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 20° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	183
Figura IV.30: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 30° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	184
Figura IV.31: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	184
Figura IV.32: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -20° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	185
Figura IV.33: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -30° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	185
Figura IV.34: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -45° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	186
Figura IV.35: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	186
Figura IV.36: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	187
Figura IV.37: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 20° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	188



Figura IV.38: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 30° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	188
Figura IV.39: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	189
Figura IV.40: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -20° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	189
Figura IV.41: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -30° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	190
Figura IV.42: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -45° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	190
Figura IV.43: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	191
Figura IV.44: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	192
Figura IV.45: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	192
Figura IV.46: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -45° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	193
Figura IV.47: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	193

## **CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Figura V.1: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	204
Figura V.2: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Aire Libre - Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	205
Figura V.3: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Cámara Anecoica - Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	205
Figura V.4: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	207
Figura V.5: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Cámara Anecoica - Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	207

Figura V.6: Patrón de Radiación Teórico - Elevación 0° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	208
Figura V.7: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Cámara Anecoica - Elevación 0° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	209
Figura V.8: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	210
Figura V.9: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Aire Libre - Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	210
Figura V.10: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	211
Figura V.11: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 90° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	212
Figura V.12: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 2.4 [MHz].....	213
Figura V.13: Patrón de Radiación Teórico - Elevación 90° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	214
Figura V.14: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Omnidireccional – 2.4 [MHz].....	214.
Figura V.15: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	217
Figura V.16: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	218
Figura V.17: Pérdida de Retorno – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	218
Figura V.18: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	220
Figura V.19: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	220
Figura V.20: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	221
Figura V.21: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.....	222
Figura V.22: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	223

Figura V.23: Pérdida del Cable – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	223
Figura V.24: Carta de Smith – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E....	225
Figura V.25: Carta de Smith – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	226
Figura V.26: Carta de Smith – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.....	226

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Tabla I.1: Bandas de Operación.....	46
Tabla I.2: Especificaciones Generales de Cables Coaxiales.....	56
Tabla I.3: Conectores de RF para Cables Coaxiales RG-58U y RG-8.....	58

### CAPÍTULO IV PRUEBAS Y MEDICIONES

Tabla IV.1: Prueba No.1 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.....	142
Tabla IV.2: Prueba No.2 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.....	143
Tabla IV.3: Prueba No.3 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.....	144
Tabla IV.4: Prueba No.1 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.....	145
Tabla IV.5: Prueba No.2 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.....	145
Tabla IV.6: Prueba No.3 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.....	146
Tabla IV.7: Mediciones en Elevaciones Positivas – Sin Antena.....	148
Tabla IV.8: Mediciones en Elevaciones Negativas – Sin Antena.....	148
Tabla IV.9: Mediciones en Elevaciones Positivas – Con Antena.....	149
Tabla IV.10: Mediciones en Elevaciones Negativas – Con Antena.....	149
Tabla IV.11: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	160
Tabla IV.12: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 20° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	161
Tabla IV.13: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 30° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	161
Tabla IV.14: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 45° – Antena Yagi – 911 [MHz].....	162

Tabla IV.15: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación $-20^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	162
Tabla IV.16: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación $-30^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	163
Tabla IV.17: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación $-45^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	163
Tabla IV.18: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación $90^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	164
Tabla IV.19: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $0^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	165
Tabla IV.20: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $20^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	165
Tabla IV.21: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $30^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	166
Tabla IV.22: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $45^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	166
Tabla IV.23: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-20^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	167
Tabla IV.24: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-30^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	167
Tabla IV.25: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-45^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	168
Tabla IV.26: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $90^{\circ}$ – Antena Yagi – 911 [MHz].....	168
Tabla IV.27: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $0^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	169
Tabla IV.28: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $20^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	169
Tabla IV.29: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $30^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	170
Tabla IV.30: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $45^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	170
Tabla IV.31: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-20^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	171

Tabla IV.32: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-30^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	171
Tabla IV.33: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-45^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	172
Tabla IV.34: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $90^{\circ}$ – Antena Yagi – 2.4 [GHz].....	172
Tabla IV.35: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $0^{\circ}$ – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	173
Tabla IV.36: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $45^{\circ}$ – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	174
Tabla IV.37: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $-45^{\circ}$ – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	174
Tabla IV.38: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación $90^{\circ}$ – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].....	175

## **CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Tabla V.1: Prueba No.1 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.....	195
Tabla V.2: Prueba No.2 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.....	196
Tabla V.3: Prueba No.3 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.....	197
Tabla V.4: Prueba No.1 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.....	198
Tabla V.5: Prueba No.2 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.....	199
Tabla V.6: Prueba No.3 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.....	199
Tabla V.7: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Positivas – Sin Antena.....	201
Tabla V.8: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Negativas – Sin Antena.....	201

Tabla V.9: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Positivas – Con Antena.....	202
Tabla V.10: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Negativas – Con Antena.....	202

## ÍNDICE DE DATASHEETS – HOJAS TÉCNICAS

Datasheet – Hoja Técnica Microcontrolador 18F2550.....	265
Datasheet – Hoja Técnica LM7805.....	269
Datasheet – Hoja Técnica TIP 121A.....	275
Datasheet – Hoja Técnica Motores Paso a Paso – Azimut .....	280
Datasheet – Hoja Técnica Motores Paso a Paso – Elevación .....	284



## GLOSARIO

**Algoritmo:** Conjunto finito de instrucciones para llevar a cabo una tarea. Constan de pasos finitos, no ambiguos y, de ser posible, eficientes.

**AM:** Es el acrónimo de Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud), la cual consiste en modificar la amplitud de una señal de alta frecuencia, denominada portadora, en función de una señal de baja frecuencia, denominada moduladora, la cual es la señal que contiene la información que se desea transmitir.

**Antena Isotrópica:** Se define como una antena puntual que radia energía uniformemente en todas direcciones.

**Azimuth:** Es el ángulo en grados, medido hacia el este desde el norte o hacia el oeste desde el sur, de la proyección de un cuerpo celeste sobre el horizonte.

**Balun:** Balanced-unbalanced lines transformer, es un dispositivo adaptador de impedancias que convierte líneas de transmisión simétricas en asimétricas.

**Cable Coaxial:** Es un cable utilizado para transportar señales eléctricas de alta frecuencia que posee dos conductores concéntricos, uno central, llamado vivo, encargado de llevar la información, y uno exterior, de aspecto tubular, llamado malla o blindaje, que sirve como referencia de tierra y retorno de las corrientes. Entre ambos se encuentra una capa aislante llamada dieléctrico, de cuyas características dependerá principalmente la calidad del cable. Todo el conjunto suele estar protegido por una cubierta aislante.

**Calibración:** Proceso de comparar ciertas medidas específicas con otro instrumento estándar.

**Campo Eléctrico:** Se define como aquella región del espacio en la que cualquier carga situada en un punto de dicha región experimenta una acción o fuerza eléctrica.

**Campo Magnético:** Campo producido por la corriente eléctrica que circula por un conductor.

**Conexiones BNC:** Son tipo de conexiones para uso con cable coaxial. Inicialmente diseñado como una versión en miniatura del Conector Tipo C.

**dB:** Es un término utilizado para referirse a, Decibelio, siendo el acrónimo de la unidad.

**dBc:** Es el acrónimo de Decibels Relative to the Carrier (Decibelios Relativos a la Portadora), la cual es la relación de potencia entre una señal y una señal de portadora, expresada en decibelios.

**dBd:** Es el acrónimo de Decibelio Dipolo Ideal, el cual es una unidad para medir la ganancia de una antena en referencia a un dipolo teórico.

**dB<sub>i</sub>:** Es el acrónimo de Decibelio Isótropo, el cual es una unidad para medir la ganancia de una antena en referencia a una antena isótropa teórica.

**dBm:** Es una unidad de medida utilizada, principalmente, en telecomunicación para expresar la potencia *absoluta* mediante una relación logarítmica. El dBm se define como el nivel de potencia en decibelios en relación a un nivel de referencia de 1 [mW].

**Dipolo:** Es una antena con alimentación central empleada para transmitir o recibir ondas de radiofrecuencia. Estas antenas son las más simples desde el punto de vista teórico.

**Energía Electromagnética:** Es la cantidad de energía almacenada en una región del espacio que podemos atribuir a la presencia de un campo electromagnético, y que se expresará en función de las intensidades del campo magnético y campo eléctrico.

**FM:** Es el acrónimo de Frequency Modulation (Modulación de Frecuencia), la cual consiste en una modulación angular que transmite información a través de una onda portadora variando su frecuencia.

**Frecuencia:** Número de ciclos por segundo que pasan por un punto fijo.

**Frecuencia de Corte:** Es la frecuencia para la que la ganancia en tensión del filtro cae de 1 a 0.707 (esto expresado en decibelios, dB, se diría como que la ganancia del filtro se reduce en 3dB de la máxima, que se considera como nivel de 0dB). En los filtros pasa banda y elimina banda existirán dos frecuencias de corte diferentes, la inferior y la superior.

**GPS:** Es el acrónimo de Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global), el cual consiste de un sistema global de navegación por satélite (GNSS) que permite localizar con precisión un dispositivo GPS en cualquier lugar del mundo.

**Impedancia:** Es una magnitud que establece la relación (cociente) entre la tensión (voltaje) y la intensidad de corriente.

**Línea de Transmisión:** Línea que confina la energía electromagnética a una región del espacio limitada por el medio físico que constituye la propia línea, a diferencia de las ondas que se propagan en el aire, sin otra barrera que los obstáculos que encuentran en su camino. La línea está formada por conductores eléctricos con una disposición geométrica determinada que condiciona las características de las ondas electromagnéticas en ella.

**Longitud de Onda:** Es la distancia que recorre la onda en el intervalo de tiempo transcurrido entre dos máximos consecutivos.

**mm:** Milímetros.

**Microcontrolador:** Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.

**$\Omega$ :** Ohmios.

**OATS:** Open Area Test Site.

**Onda Electromagnética:** Es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio.

**Planes de Frecuencia:** Ancho de banda en un radioenlace por microondas.

**ppb:** Es el acrónimo de Parte Por Billón (Billón estadounidense que equivale a mil millones)

**Radiación:** El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

**RBW:** Es el acrónimo de Resolution Bandwidth (Resolución de Ancho de Banda), el cual determina el tamaño de bandeja de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) o la frecuencia más pequeña que puede ser resuelta.

**RF:** Radio Frecuencia.

**Sensor:** Dispositivo que mide de manera automática una variable, como puede ser la temperatura, la presión o inclusive el régimen de giro, entre otras cosas, es así que está capacitado para detectar acciones o estímulos externos y responder en consecuencia, es decir que detecta energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta en forma de ser aprovechada para su estudio. Además puede transformar las magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas.

**USB:** Es el acrónimo de Universal Serial Bus (Bus Universal en Serie), el cual es un puerto que sirve para conectar periféricos a un ordenador/computador.

**V:** Voltios.

**W:** Watts o Vatios.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Las carreras de ingeniería en electrónica contienen asignaturas básicas referentes a sistemas de comunicaciones que involucran sistemas radiantes, los mismos que estudian los diferentes tipos de antenas con sus distintas tecnologías y características de radiación.

El campo de la ingeniería exige que los estudiantes utilicen diferentes técnicas de aprendizaje y para ello es muy importante la fase de la experimentación. Esta fase constituye la oportunidad para poner a prueba los conocimientos adquiridos en clase o para verificar las hipótesis como parte constitutiva de nuevas investigaciones.

Los laboratorios de electrónica de la ESPE disponen actualmente de una Cámara Anecoica con soportes internos para la sustentación de las antenas. Estos soportes no disponen de grados de libertad suficientes como para realizar giros de las antenas en dos grados de libertad; ya que uno de ellos se encuentra fijo, y el otro solamente permite el giro en el plano horizontal. Esto limita muchísimo a las prácticas a realizarse en dicha cámara.

La utilización de la cámara anecoica, es muy importante dentro de los laboratorios de electrónica de la ESPE, ya que se la puede aislar de interferencia externa y simular condiciones de espacio libre en el interior de la misma, permitiendo la comprobación de

---

los resultados obtenidos a través de software de simulación, en lo que se refiere a sistemas de comunicación que involucran antenas y equipos de RF.

El resultado esperado por efecto de una eficiente utilización de la cámara anecoica es el patrón de radiación de antenas para las frecuencias entre 2 a 3 [GHz]. Se puede entender entonces que dependiendo de la versatilidad de los controles de posición en azimut y elevación de los soportes internos de las antenas, así será más fácil obtener patrones de radiación de antenas con un grado de satisfacción suficiente.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El fortalecimiento de los laboratorios de electrónica no solamente se obtiene a través de la adquisición de nuevos equipos sino también a través del mantenimiento de los equipos existentes y de la repotenciación de los mismos.

La cámara anecoica que actualmente dispone el Departamento de Eléctrica y Electrónica, el generador de radiofrecuencia, el analizador vectorial, los pedestales de soporte, cables y accesorios constituyen parte de un sistema de medida del funcionamiento de antenas en un medio de propagación libre de interferencias electromagnéticas provenientes del exterior. Este sistema de medida de patrones de radiación de antenas es de vital importancia para las carreras de ingeniería electrónica ya que servirá para afianzar los conocimientos teórico-prácticos de las asignaturas de Antenas y Sistemas de R.F.

Actualmente la cámara anecoica dispone de dos pedestales de antenas, uno de los pedestales es completamente fijo, y el otro tiene solamente un grado de libertad que le permite girar en el plano horizontal. Para poder medir por ejemplo el patrón de radiación hace falta que la antena transmisora gire tanto en Azimut como en Elevación. Teniendo el control sobre estas dos últimas variables de azimut y elevación es posible entonces determinar la ganancia de directividad, la anchura del haz, la relación frente espalda. La cámara anecoica debido a su construcción permitirá medir la resistencia de radiación de la antena a las distintas frecuencias del generador de radiofrecuencia. Se podrá verificar la

---

polarización de las antenas y su influencia en un sistema de comunicaciones. Así mismo se podrá verificar la eficiencia de las antenas bajo distintas condiciones.

Cabe anotar que por cada medida de antenas se requiere posicionar a las mismas internamente dentro de la cámara lo que obliga a apagar los generadores de R.F. y por supuesto múltiples medidas conlleva a un aumento en el tiempo de medida.

El hecho de automatizar a los pedestales de soporte de antenas dentro de la cámara permitirá realizar cambios de posición de la antena de medida sin tener que apagar el generador de R.F. Esto permitirá disminuir los tiempos de medida para cada antena. Uno de los parámetros de radiación de las antenas es el patrón de radiaciones en al menos los dos ejes de movimiento.

### **1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS, TIPOS DE ANTENAS, BANDAS DE OPERACIÓN**

#### **1.3.1 ¿Qué es una Antena?**

Antena es un elemento o aquella parte de un sistema de recepción o transmisión diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas en el espacio libre, de tal manera que una antena receptora es aquella que transforma la energía electromagnética en energía eléctrica y se puede representar mediante un generador con una impedancia interna

#### **1.3.2 Características de las Antenas**

Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda, de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida. Si las dimensiones de la antena son mucho más pequeñas que la longitud de onda las antenas se denominan *elementales*, si tienen dimensiones del orden de media longitud de onda se llaman *resonantes*, y si su tamaño es mucho mayor que la longitud de onda son *directivas*.

---

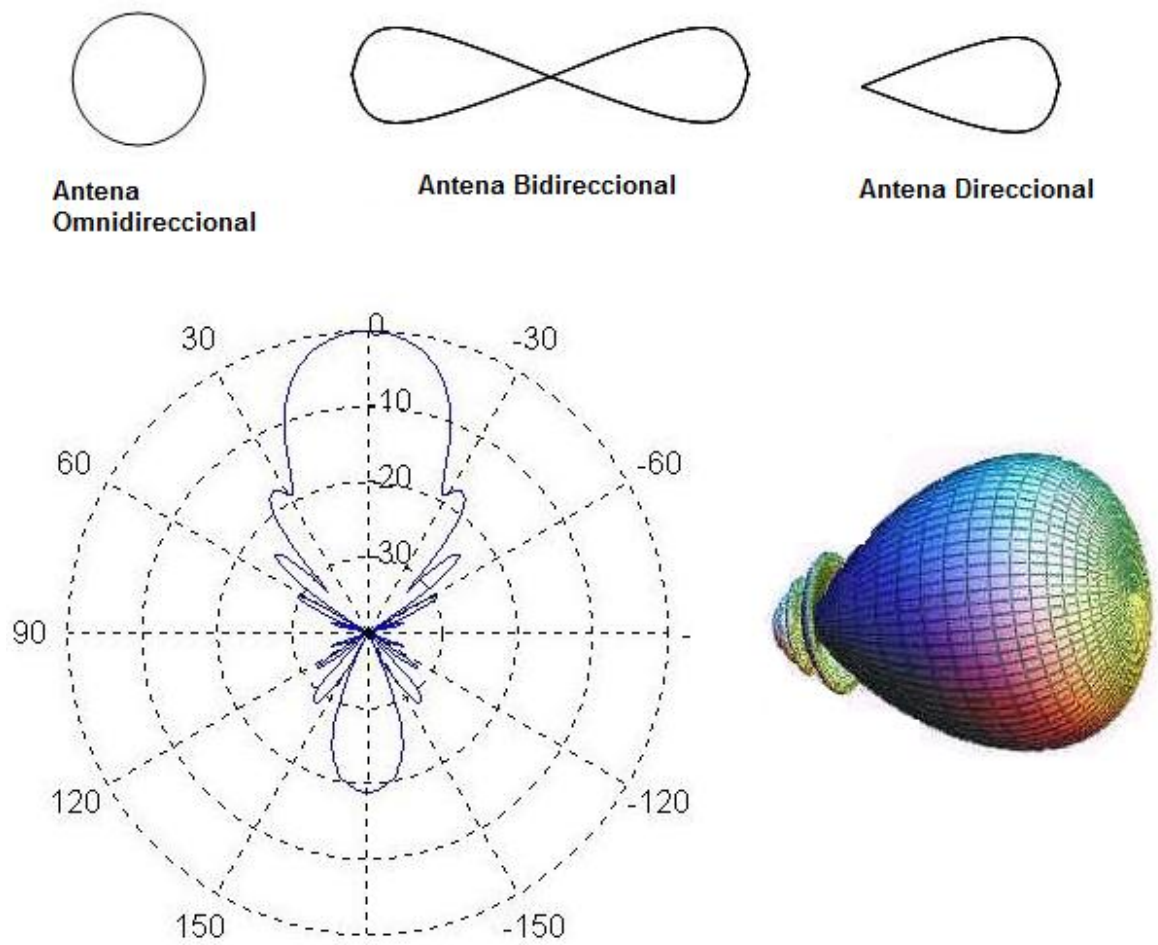
**1.3.2.1 Diagrama-Patrón de Radiación.** Es la representación gráfica de las características de radiación de una antena en función de su dirección angular (coordenadas en azimut y elevación), que permite visualizar las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena.

Los parámetros más importantes del patrón de radiación son:

- **Dirección de Apuntamiento:** Es la de máxima radiación.
- **Lóbulo Principal:** Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación. Está comprendido entre dos mínimos relativos.
- **Lóbulos Secundarios:** Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.
- **Ancho de Haz:** Es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma un valor de 3dB por debajo del máximo. Es decir, la dirección en la que la potencia radiada se reduce a la mitad.
- **Relación de Lóbulo Principal a Secundario:** Es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.
- **Relación delante-atrás:** Es el cociente en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.

Dependiendo de las necesidades y del software de simulación que se disponga, el diagrama del patrón de radiación puede ser visualizado tanto en 2D como en 3D, como se indica en la siguiente Figura I.1:





**Figura I.1: Diagrama de Patrón de Radiación en 2D y 3D [1].**

Además, dependiendo de la directividad de las antenas, la forma de dicho patrón de radiación variará, como se indica en la siguiente Figura I.2:

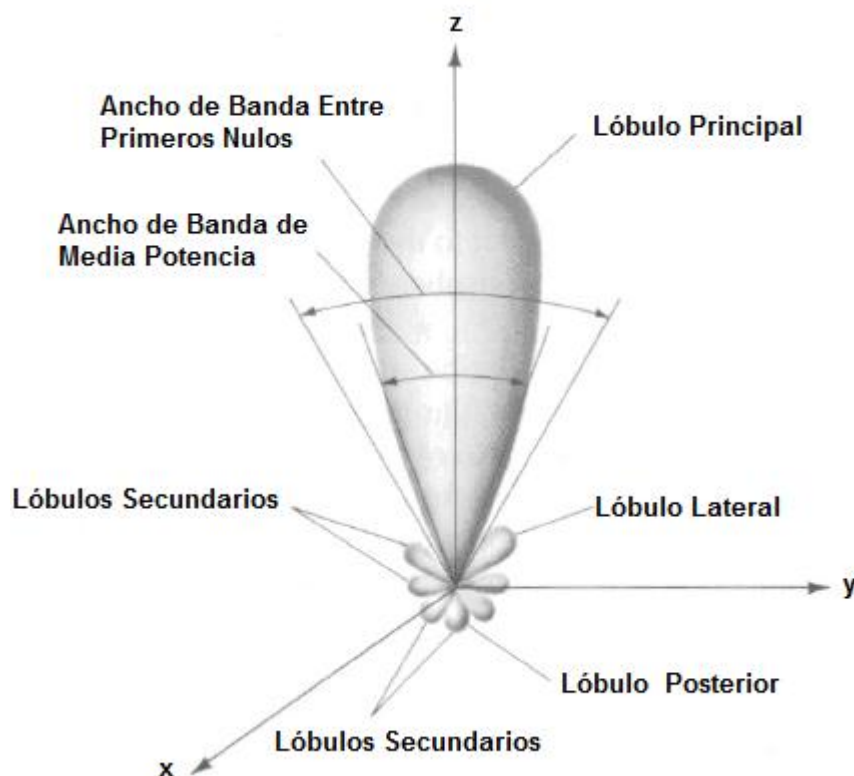


Figura I.2: Lóbulos del Patrón de Radiación [2].

▪ **HPBW (Half Power Beamwidth):** Es el ángulo que se forma en el punto en que el lóbulo principal tiene la mitad de su potencia.

▪ **Lóbulo Principal:** Es el lóbulo contenido en la dirección de máxima radiación.

▪ **Lóbulo Menor:** Son todos los otros lóbulos que no son el lóbulo principal. Estos lóbulos representan la radiación en direcciones no deseadas. El nivel del lóbulo menor es expresado como la razón entre el lóbulo en cuestión y el lóbulo mayor. Se expresa en decibeles.

▪ **Lóbulo Trasero:** Es el lóbulo menor que se encuentra diametralmente opuesto al lóbulo principal.

▪ **Lóbulo Lateral:** Son los lóbulos menores que se encuentran adyacentes al lóbulo principal.

▪ **Ancho del Haz Principal entre Nulos:** Es el ancho del lóbulo principal completo.

▪ **Nivel de Lóbulos Secundarios:** El nivel del mayor lóbulo secundario respecto al principal. Los lóbulos secundarios radian potencia indeseada en direcciones no controladas, que pueden dar lugar a interferencias en sistemas de comunicaciones [3].

**1.3.2.2 Densidad de Potencia Radiada.** La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección [4] y se calcula a partir de los campos eléctricos y magnéticos radiados.

$$\hat{P} \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \hat{E} \left[ \frac{V}{m} \right] \times \hat{H} \left[ \frac{A}{m} \right] \quad (1.1)$$

**1.3.2.3 Directividad.** La Directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia, y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, con una igualdad en la potencia total radiada [5].

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P} \quad (1.2)$$

Donde:

$D$  : Directividad de la antena.

$U$  : Intensidad de radiación de la antena por unidad de ángulo sólido en una dirección.

$U_i$ : Intensidad de radiación de una fuente isotrópica.

$P$ : Potencia radiada total.

Además, la máxima directividad está dada por la relación:

$$D_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{\max}}{P} \quad (1.3)$$

Donde:

$D_{\max}$ : Máxima directividad.

$U_{\max}$ : Máxima intensidad de radiación.

La directividad es una cantidad adimensional y se expresa generalmente en decibeles (dB)

**1.3.2.4 Ganancia.** La ganancia de una antena se define como la potencia de salida, en una dirección particular, comparada a la producida por una antena isotrópica (ideal); y es una medida de la direccionalidad de dicha antena.

La ganancia está definida por:

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (1.4)$$

Donde:

$U(\theta, \phi)$ : Densidad de potencia por unidad de ángulo sólido en la dirección  $\theta, \phi$ .

$P_{in}$ : Potencia Total que entra a la antena por los terminales.

Otra manera de ver la ganancia es en función de la directividad y de la eficiencia, a través de la siguiente ecuación:

$$Ganancia = G = \eta \cdot D_{\max} \quad (1.5)$$

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}} \quad (1.6)$$

Donde:

$\eta$ : Eficiencia (Adimensional).

$P_{rad}$ : Potencia radiada.

$P_{in}$ : Potencia entregada a la antena

$P_{loss}$ : Potencia de pérdidas.

En contraste con la Directividad, en la cual se habla de potencia radiada por la antena, en la definición de Ganancia se habla de potencia entregada a la antena.

Teniendo así que la diferencia entre las mismas, es la potencia disipada por la antena, la cual se debe a pérdidas óhmicas.

La ganancia de la antena se mide en [dBi] cuando es respecto al radiador isotrópico y en [dBd] cuando es respecto a un dipolo; teniendo que 0 [dBd] equivalen a 2.14 [dBi], por lo que, en este caso, se debe sumar 2.14 para pasar la ganancia de [dBd] a [dBi] [6].

Hay que tener en cuenta que la ganancia de la antena es la misma para transmitir y para recibir.

**1.3.2.5 Polarización.** La polarización viene definida por la trayectoria que describe el vector de campo eléctrico o magnético, cuando se observa en el sentido de propagación de onda, respecto al plano de tierra dado.

---

A la polarización se la puede clasificar en:

- **Polarización Lineal:** Cuando las variaciones del vector de campo eléctrico están contenidas en una única dirección. Puede ser vertical u horizontal.

- **Polarización Circular:** Cuando el vector de campo eléctrico describe una trayectoria circular. Puede ser de mano derecha o de mano izquierda.

- **Polarización Elíptica:** Cuando el vector de campo eléctrico describe una trayectoria elíptica. Puede ser de mano derecha o de mano izquierda.

Normalmente, dos antenas que forman un mismo enlace deben colocarse para tener una igual polarización. Existen casos en los cuales se tiene Polarización Cruzada, lo cual significa, que las antenas no tienen una misma polarización.

Hay que tener en cuenta que dentro de cada antena existe una medida de polarizaciones no deseadas, conocidas como **CPL** (Cross-Polarization Level) [7].

A continuación se muestra esquemas usados para describir los tipos de polarización más comunes:

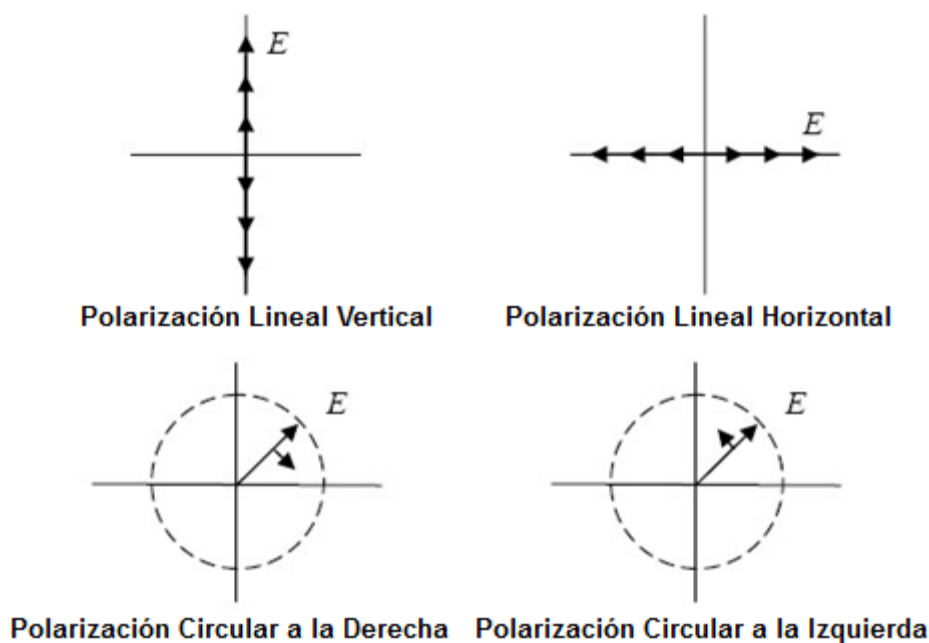


Figura I.3: Esquema de Polarización más Comunes [8].

**1.3.2.6 Impedancia de Entrada.** La impedancia de entrada se define como la razón entre el voltaje y la corriente en los terminales de entrada de la antena. Por lo general, dicha impedancia es compleja, por lo que a la parte real se la denomina resistencia de antena y a la parte imaginaria, reactancia de antena.

La impedancia de entrada representa las pérdidas propias del conductor y la resistencia a radiar de la antena al espacio libre [9].

Se la puede representar de la siguiente manera:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (1.7)$$

Donde:

$Z_{in}$ : Impedancia de la antena en los terminales.

$R_{in}$ : Resistencia de la antena en los terminales.

$X_{in}$ : Reactancia de la antena en los terminales.

La resistencia de la antena  $R_{in}$ , es la suma de la resistencia de radiación  $R_r$  y la resistencia de pérdidas  $R_l$ , mientras que la reactancia de la antena representa el campo reactivo de la antena producido por el campo cercano.

Es importante que la antena se encuentre en resonancia, es decir, cuando la reactancia de antena es nula. Esto es necesario para evitar tener corrientes excesivas, las cuales producen gran cantidad de pérdidas.

A continuación se muestra un esquema con impedancias de transmisor y de antena.

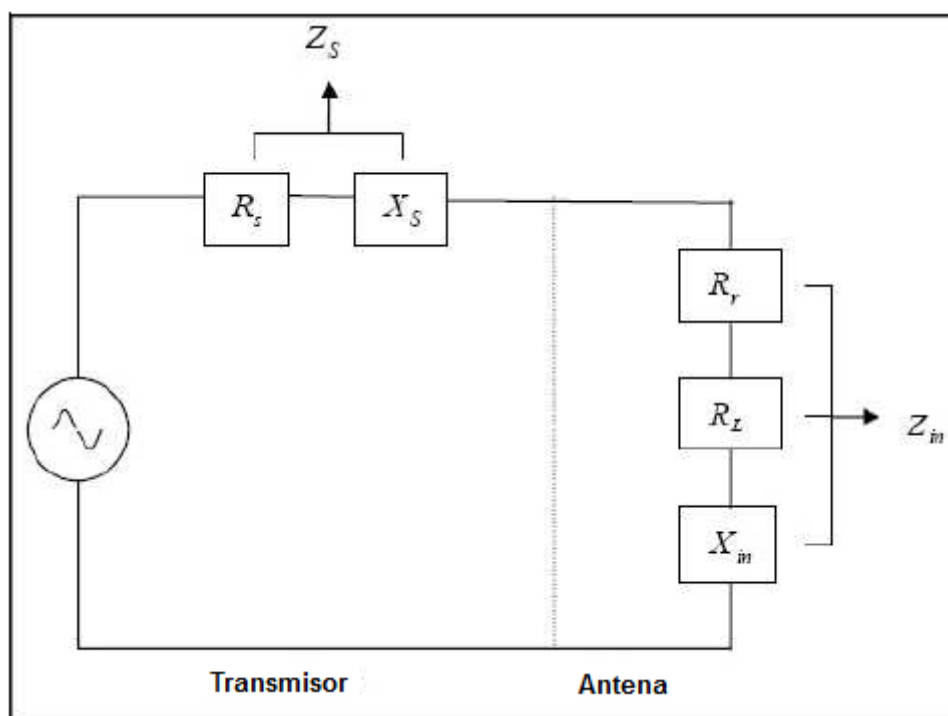


Figura I.4: Esquema del Circuito Equivalente de Impedancia de Entrada [10].

**1.3.2.7 Razón Onda Estacionaria (ROE).** La razón de onda estacionaria (ROE) o Standing Wave Ratio (SWR) permite determinar si dos o más módulos eléctricos o electrónicos de impedancias diferentes, que se están interconectando dentro de un sistema, están adaptados adecuadamente o por el contrario, se encuentran desacoplados.



De igual manera, puesto que no siempre se puede acoplar una línea de transmisión de manera exacta, es necesario tener una medida que nos indique el grado de desacoplamiento. A esta medida se la conoce como Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), y no es más que, una medida de desadaptación entre la impedancia del transmisor y de la antena. Este parámetro caracteriza la potencia reflejada entre la antena y el transmisor, lo cual crea ondas estacionarias.

El VSWR se lo define como:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.8)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad (1.9)$$

Donde:

$\Gamma$  : Coeficiente de reflexión

$V_r$  : Amplitud de la onda reflejada

$V_i$  : Amplitud de la onda incidente

Para que exista una adaptación perfecta, debemos tener  $VSWR = 1$ , lo que producirá que no exista onda reflejada ( $|\Gamma| = 0$ ).

Debemos tener en cuenta, que para que exista una máxima transferencia de potencia, la impedancia del transmisor debe ser el conjugado complejo de la impedancia de la antena [11].

De esta manera, la condición de adaptación, se define como:

$$Z_{in} = Z_s^* \quad (1.10)$$

Donde:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \text{ (Impedancia de la antena)}$$

$$Z_s = R_s + jX_s \text{ (Impedancia del transmisor)}$$

El incumplimiento de la condición de adaptación, generará ondas estacionarias, producidas por la potencia reflejada entre la antena y el transmisor.

**1.3.2.8 Ancho de Banda.** El ancho de banda es el rango de frecuencias en los cuales los parámetros de la antena son similares, a los que tendría dicha antena, si operara en la frecuencia central. Es decir, la banda de frecuencias en la cual el funcionamiento de la antena se considera aceptable. Por lo general, el ancho de banda es especificado según un estándar, el cual es comúnmente para  $VSWR \leq 2$  (ó  $|\Gamma| \leq \frac{1}{3}$ ) [12].

Hay que tener en cuenta que mientras mayor es el rango de frecuencias que abarca una banda, mayor debe ser el ancho de banda de la antena; y que si se diseña una antena para un gran ancho de banda, generalmente esta antena no tendrá tan buen comportamiento como una antena similar optimizada para un ancho de banda más pequeño.

El ancho de banda puede ser caracterizado por la siguiente ecuación:

$$BW = [f_H - f_L] \quad (1.11)$$

Donde:

$f_H$  = frecuencia superior

$f_L$  = frecuencia inferior

$f_C$  = frecuencia central

Se dice que una antena es de banda ancha sí  $f_H/f_L = 2$ .

$$\text{Además, se tiene que } f_c = \left[ \frac{f_H + f_L}{2} \right]. \quad (1.12)$$

En la siguiente figura se muestra el concepto de ancho de banda en relación al VSWR de una forma gráfica.

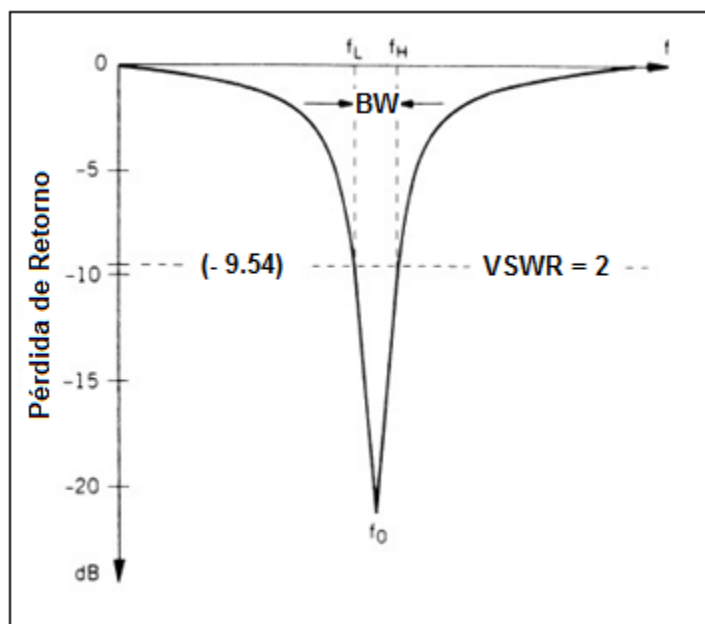


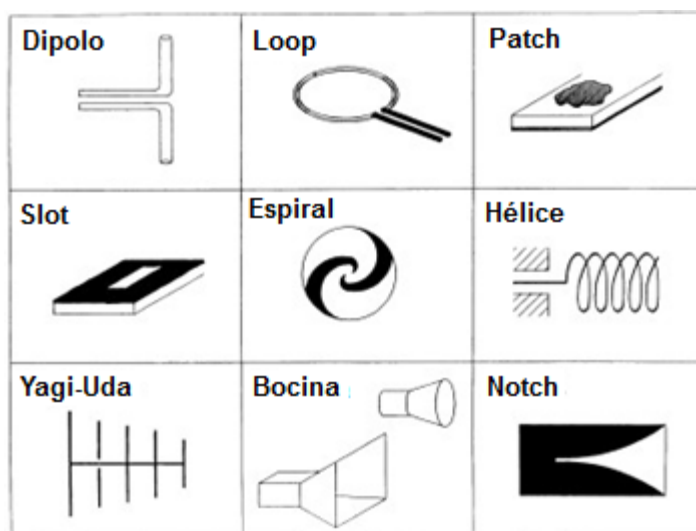
Figura I.5: Ancho de Banda para un VSWR = 2 [13].

**1.3.2.9 Relación Frente/Espalda.** La relación frente/espalda es una particularidad propia de las antenas directivas, ya que carece de sentido en antenas omnidireccionales. Se expresa en [dB] e indica hasta qué punto el lóbulo principal de radiación es más importante que el lóbulo posterior. Es la razón de la directividad máxima de una antena para su directividad en la dirección opuesta.

Una antena direccional debe estar equilibrada, es decir, debe tener una buena ganancia y una buena relación frente/espalda. Si se desea mejorar la relación frente/espalda, es necesario reducir la ganancia, y viceversa, es decir, si se desea mejorar la ganancia es necesario reducir la relación frente/espalda.

### 1.3.3 Tipos de Antenas

Existe una gran gama de antenas, dependiendo de la funcionalidad que se le quiera dar y de las necesidades que se tenga. Algunos ejemplos de antenas se presentan a continuación:



**Figura I.6: Distintos Tipos de Antenas [14].**

Debido a la enorme cantidad y variedad de antenas que existen en el mercado, y de los nuevos requerimientos, ya sean personales o empresariales; a las antenas se las puede clasificar de diversas maneras, como por ejemplo:

Por su forma:

- Antenas de cable: dipolo, monopolo, lazo, helicoidal.
- Antenas de apertura: horn (bocina), slot (ranura).
- Antenas impresas (microstrip): patch (ranura), dipolo impreso, espiral.

Por su ganancia:

- Alta ganancia: antena parabólica.
- Media ganancia: horn (bocina).

- 
- Baja ganancia: dipolo, lazo, ranura.

Por la forma del patrón de radiación:

- Omnidireccional: dipolo.
- Direccional: antena parabólica.
- Patrón con forma de abanico: arreglo (array).

Por el ancho de banda:

- Banda ancha: Yagi-Uda, espiral, helicoidal.
- Banda angosta: patch, slot.

Más adelante, se hará un análisis más detallado de las diferentes antenas utilizadas en el proyecto.

### **1.3.4 Bandas de Operación**

La gran variedad de antenas y sus diferentes aplicaciones, permiten que las mismas trabajen dentro de un gran porcentaje del espectro de frecuencias.

A continuación se muestra las bandas del espectro en que las diversas antenas tienen un funcionamiento normal, dependiendo de la utilidad que se le quiera dar a las mismas.

Banda	Denominación	Frecuencia Mínima	Frecuencia Máxima	$\lambda$ Mínima	$\lambda$ Máxima
<b>LF</b>	Low Frequency	30 kHz.	300 kHz.	1 km.	10 km.
<b>MF</b>	Medium Frequency	300 kHz.	3 MHz.	100 m.	1 km.
<b>HF</b>	High Frequency	3 MHz.	30 MHz.	10 m.	100 m.
<b>VHF</b>	Very High Frequency	30 MHz.	300 MHz.	1 m.	10 m.
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency	300 MHz.	3 GHz.	10 cm.	1 m.
<b>SHF</b>	Super High Frequency	3 GHz.	30 GHz.	1 cm.	10 cm.
<b>EHF</b>	Extremely High Frequency	30 GHz.	300 GHz.	1 mm.	1 cm.

**Tabla I.1: Bandas de Operación [15].**

## 1.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RADIOFRECUENCIA

Los equipos de medición de radiofrecuencia dentro del presente trabajo, son el medio físico mediante el cual va a ser posible adquirir los datos y la información necesaria para determinar las características de radiación de antenas usando la cámara anecoica.

El análisis de las características, tanto generales como técnicas, que poseen dichos equipos es el punto de partida para determinar qué equipo es el más adecuado para realizar la adquisición de los datos anteriormente mencionados. Una mala elección, o el no tomar en cuenta las limitaciones de los equipos, conllevarán a que el proceso de adquisición de datos sea infructífero.

Por lo tanto, un estudio previo es necesario, si no se quiere poner en riesgo el funcionamiento de tales aparatos, corriendo el riesgo de dañarlos de una manera permanente.

### 1.4.1 Analizador de Espectros

Un analizador de espectros es un dispositivo electrónico que permite visualizar y representar los componentes espectrales de una determinada señal, dentro de un espectro de frecuencias. Dicha señal de entrada puede ser cualquier tipo de onda eléctrica, acústica u óptica.

En la pantalla del equipo, la amplitud o potencia de la señal de entrada se representa en el eje de las ordenadas, es decir, mediante una escala logarítmica se presenta, en [dBm], el nivel del contenido espectral de la señal de entrada; mientras que en el eje de las abscisas se representa la frecuencia, en una escala que es función de la separación temporal y el número de muestras capturadas.

Existen básicamente dos clases de analizadores de espectros: Análogo, que utiliza un filtro pasa banda de frecuencia variable cuya frecuencia central se afina automáticamente dentro de una gama fija. Digital, que utiliza un proceso matemático llamado la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que transforma la señal en sus componentes espectrales.

En el mercado existe una gran variedad de analizadores de espectros, pero en general, todos ellos disponen de determinadas funciones y controles básicos que se describen a continuación:

- **Frecuencia. (FREQUENCY):** Permite fijar la ventana de frecuencias a visualizar en la pantalla. Se puede definir la frecuencia inicial y final (START-STOP) o bien la frecuencia central junto con el SPAN o ancho de la ventana.
- **Amplitud. (AMPLITUDE):** Controla la representación en amplitud de la señal de entrada. Permite fijar el valor de la referencia, el número de [dBm] por cada división en la pantalla así como el valor de atenuación en la entrada.
- **Vista/Traza (VIEW/TRACE):** Gestiona parámetros de representación de la medida, entre los que destacan el almacenamiento de los valores máximos en

cada frecuencia y el almacenamiento de una determinada medida para poder ser comparada posteriormente.

▪ **Filtro de Resolución/Promedio (BW/AV):** El analizador de espectros captura la medida al desplazar un filtro de ancho de banda pequeño a lo largo de la ventana de frecuencias. Cuanto menor es el ancho de banda de este filtro mejor es la resolución de la medida y más tiempo tarda en realizarse. Este menú permite controlar los parámetros de este filtro y el del cálculo de promedios o *averaging*.

▪ **Marcador/Búsqueda de Pico:** Controla la posición y función de los marcadores. Un marcador indica el valor de potencia de la gráfica a una determinada frecuencia. La búsqueda de pico posiciona un marcador de forma automática en el valor con mayor potencia dentro de nuestra ventana de representación [16].

De igual manera, el analizador de espectros presenta ciertas características técnicas, que se describen a continuación:

▪ **Ancho de Banda:** Especifica el rango de frecuencias en las que los analizadores de espectros pueden medir con precisión. El ancho de banda se calcula desde 0Hz (continua) hasta la frecuencia a la cual una señal de tipo senoidal se visualiza a un 70.7% del valor aplicado a la entrada.

▪ **Tiempo de Subida:** Es un parámetro que nos dará, junto al anterior, la máxima frecuencia de utilización del analizador de espectros. Es un parámetro importante si se desea medir con fiabilidad pulsos y flancos (Los analizadores de espectros no pueden visualizar pulsos con tiempos de subida más rápidos que el suyo propio).

▪ **Sensibilidad Vertical:** Indica la facilidad de los analizadores de espectro para amplificar señales débiles. Se suele proporcionar en mV por división vertical, normalmente es del orden de 5 milivoltios por división (llegando hasta 2 milivoltios por división).



---

▪ **Velocidad:** Indica la velocidad máxima del barrido horizontal, en los analizadores de espectros analógicos, lo que permite observar sucesos más rápidos. Suele ser del orden de nano segundos por división horizontal.

▪ **Velocidad de Muestreo:** En los analizadores de espectros digitales indica cuantas muestras por segundo son capaces de tomar el sistema de adquisición de datos (específicamente el conversor A/D). Se puede llegar a velocidades de muestreo de megamuestras por segundo. Una velocidad de muestreo grande es importante a la hora de poder visualizar pequeños periodos de tiempo; de igual manera, también se necesita velocidades de muestreo bajas para poder observar señales de variación lenta.

▪ **Resolución Vertical:** Es un parámetro que nos da la resolución del conversor A/D del analizador de espectros digital y se la mide en bits. Nos indica con que precisión se convierten las señales de entrada en valores digitales almacenados en la memoria.

▪ **Longitud del registro:** Indica cuantos puntos se memorizan en un registro para la reconstrucción de la forma de la onda. Una longitud del registro grande permite realizar zoom sobre detalles en la forma de onda de manera rápida, sin embargo esta ventaja es a costa de consumir más tiempo en muestrear la señal completa.

▪ **Exactitud en la Ganancia:** Indica la precisión con la cual el sistema vertical de los analizadores de espectros amplifica ó atenúa la señal. Se proporciona normalmente en porcentaje máximo de error.

▪ **Exactitud de la Base de Tiempos:** Indica la precisión en la base de tiempos del sistema horizontal de los analizadores de espectros para visualizar el tiempo. Se suele dar el porcentaje de error máximo [17].

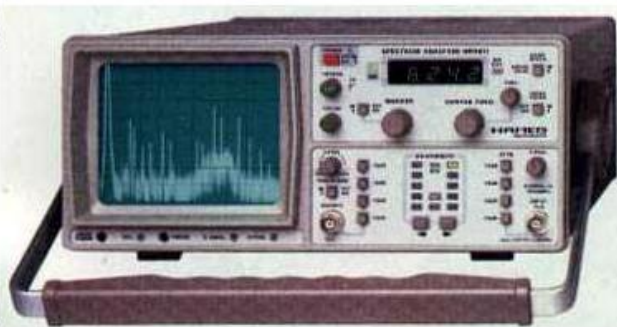
Esta representación en el dominio de la frecuencia, que nos presenta el analizador de espectros, permite visualizar parámetros de la señal que difícilmente podrían ser descubiertos trabajando en el dominio del tiempo con ayuda de un osciloscopio.

Dentro del presente trabajo se utilizó el analizador de espectros Anritsu S362E, como se muestra en la Figura I.7, el cual presenta las siguientes características:

- Fase, Mediciones de Trasmisión a 2 puertos.
- Diseño probado para trabajo en campo: Batería de 4 horas de duración, fuerte, compacto, ligero.
- Conectividad USB, con teclado incorporado y pantalla táctil.
- Rango Dinámico:  $> 95$  dB en 10 Hz RBW.
- DABL:  $-152$  dBm en 10 Hz RBW.
- Ruido de Fase:  $-100$  dBc/Hz máx. @ 10 kHz offset en 1GHz.
- Exactitud de Frecuencia:  $< \pm 50$  ppb con GPS Encendido [18].



(a) Analizador de Espectros Digital Anritsu S362E



(b) Analizador de Espectros Analógico

**Figura I.7: Distintos Tipos de Analizadores de Espectros.**

### 1.4.2 Analizador Vectorial

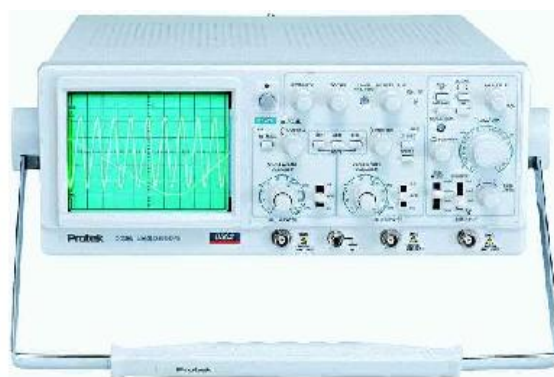
El analizador vectorial es un dispositivo que permite la medición de señales electrónicas, usualmente de RF (radiofrecuencia), que reemplaza al analizador de espectros, como instrumento de medición, cuando se trabaja en estos sistemas (sistemas de RF).

El analizador vectorial permite realizar muchas de las tareas de medición y caracterización que realiza el analizador de espectros, pero además permite ejecutar una variedad de funciones digitales útiles de demodulación.

A continuación se muestran distintos tipos de Analizadores Vectoriales:



(a) Analizador Vectorial Digital



(b) Analizador Vectorial Análogo

**Figura I.8: Distintos Tipos de Analizadores Vectoriales.**

### 1.4.3 Generador de RF

El generador de RF es un instrumento que permite producir señales semejantes a las de la radio, para verificar el equipo de transmisión y recepción de la comunicación a través de este mismo medio, ya sea en la banda comercial de AM como en la de FM. De esta manera permite la puesta a punto de receptores, amplificadores y otros equipos de la estación de radio [19].

Además de la calibración de los equipos, permite la reparación de los receptores de radiodifusión y de otros tipos, relacionados con las bandas que utilizan los radioaficionados.

Un generador de estas características permitirá también realizar otras operaciones, como por ejemplo, comprobar la frecuencia de resonancia de cristales de cuarzo y de circuitos sintonizados, control de filtros cerámicos, comprobación de filtros pasaaltos y pasabajos, etc.

Dentro del presente trabajo se utilizó el generador de RF Agilent N9310A RF, como se muestra en la Figura I.9, el cual presenta las siguientes características:

- Función de Barrido Completo: RF (9 kHz a 3 GHz) /Amplitud (-127 a +13 dBm), LF (20 Hz a 80 kHz).
- Extensiva Modulación Análoga: AM, FM, Fase y Modulación por Pulso.
- Conectividad USB, para la automatización de pruebas y soporte para memory stick (flash drive/memoria flash).
- Comandos SCPI para el control remoto.
- 9 kHz a 3 GHz CW output/salida, 20 Hz a 80 kHz low frequency/frecuencia baja (LF) output/salida.
- Ruido de Fase: -95 dBc/Hz SSB.
- -127 a +13 dBm rango del nivel de salida (output level) (máx. +20 dBm ajustables) [20].



**Figura I.9: Distintos Tipos de Generadores de RF.**

#### 1.4.4 Cables y Conectores para RF

**1.4.4.1 Cables para RF.** Un cable de RF es un tipo de cable coaxial que se utiliza para transportar señales eléctricas de diversas frecuencias, y se halla recubierto con malla metálica para reducir las interferencias electromagnéticas del exterior a este cable, o para evitar que las señales que circulan por este cable interfieran a otros equipos electrónicos adyacentes.

El diseño coaxial usado en un cable RF está diseñado para prevenir el problema potencial que supone el hecho de que el alambre que transporta la señal, también actúe como un atenuador. Este problema podría causar que parte de la señal se pierda en forma de ondas de radio. Para contrarrestar esto, el cable coaxial utiliza cuatro capas circulares que desde el interior hacia el exterior son: el cable que transporta la señal, un material aislante que suele ser de plástico sólido, un escudo de metal, y una caja de plástico que protege los materiales en el interior.

Se debe tener en cuenta que, aunque teóricamente el cable sí bloquea las interferencias externas, en la práctica, a menudo esto no sucede. En especial cuando se utiliza cables de RF que son resultado de una fabricación barata, ya que estos son más propensos a estar sujetos a interferencias de fuentes magnéticas o los cables de alimentación.

Los cables coaxiales, antes de ser puestos a la venta, deben superar los ensayos que para los cables coaxiales especifica la Norma MIL C-17 [21].

La Norma MIL C-17 es una norma militar del [gobierno](#) de los [Estados Unidos](#) que además de las características dimensionales y eléctricas, define una sigla que identifica a cada tipo de cable. Todos los cables coaxiales están definidos con las letras RG (radiofrecuencia-gobierno) seguida de un número (numeración progresiva del tipo) y de la letra U (especificación universal) o A/U, B/U, etc., que indican sucesivas modificaciones y sustituciones al tipo original [22].

Por esta razón es de fundamental importancia, para la protección del [cliente](#), identificar con la denominación RG únicamente los cables que cumplen en forma integral con la norma MIL-C-17, identificando con siglas distintas los que responden a otras especificaciones.

Los ensayos citados se dividen en dos tipos, los que se realizan durante el proceso de fabricación (controles) y los realizados en el laboratorio, una vez que está fabricado el cable.

Durante la fabricación se realizan los siguientes ensayos:

- **Valor de la Capacidad:** Se controla entre unos límites determinados, en máximo y en mínimo, que son programados de acuerdo con la especificación del cable.
- **Medida del Diámetro del Dieléctrico:** Mediante medidor óptico láser.
- **Rigidez Dieléctrica.** Realizada mediante Spark-Tester a 10 kV.

Los ensayos que se realizan con cable acabado son:

- Determinación de la Impedancia Característica.

- Velocidad de propagación.
- Atenuación.
- Valores angulares de la fase y su desviación.
- Medición de las pérdidas por retorno estructural [23].

En la siguiente tabla se muestran especificaciones generales de algunos cables coaxiales, utilizados en aplicaciones de RF:

Coaxial	Ohm	Factor Velocidad	Aislante Dieléctrico	Tensión Máxima RMS	Atenuación en Decibelios por Cada 100 metros							
					10 MHz	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz	1 GHz	3 GHz	Diam. en mm.
RG-5	50	0,66	Esp. PE	-----	2,72	6,23	8,85	13,50	19,40	32,15	75,50	8,30
RG-6	75	0,66	Esp. PE	-----	2,72	6,23	8,85	13,50	19,40	32,15	75,50	8,50
RG-8	52	0,66	PE	4.000	1,80	4,27	6,23	8,86	13,50	26,30	52,50	10,30
RG-9	51	0,66	PE	4.000	2,17	4,92	7,55	10,80	16,40	28,90	59,00	10,70
RG-10	52	0,66	-----	-----	1,80	4,25	6,25	8,85	13,50	26,30	52,50	12,00
RG-11	75	0,66	Esp. PE	4.000	2,18	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,00	10,30
RG-12	75	0,66	PE	4.000	2,18	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,00	12,00
RG-13	74	0,66	-----	-----	2,18	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,00	10,70
RG-14	52	0,66	-----	-----	1,35	3,28	4,60	6,55	10,20	18,00	41,00	13,90
RG-17	52	0,66	PE	11.000	0,80	2,05	3,15	4,90	7,85	14,40	31,10	22,10
RG-18	52	0,66	-----	-----	0,80	2,05	3,15	4,90	7,85	14,40	31,10	24,00
RG-19	52	0,66	-----	-----	0,55	1,50	2,30	3,70	6,05	11,80	25,30	28,50
RG-20	52	0,66	-----	-----	0,55	1,50	2,30	3,70	6,05	11,80	25,30	30,40
RG-21	53	0,66	-----	-----	14,40	30,50	47,70	59,00	85,30	141,00	279,00	8,50
RG-34	75	0,66	-----	-----	1,05	2,79	4,60	6,90	10,80	19,00	52,50	15,90
RG-35	75	0,66	-----	-----	0,80	1,90	2,80	4,15	6,40	11,50	28,20	24,00
RG-55	53,50	0,66	PE	1.900	3,94	10,50	15,80	23,00	32,80	54,10	100,00	5,30
RG-58	50	0,66	PE	1.900	4,60	10,80	16,10	24,30	39,40	78,70	177,00	5,00
RG-59	73	0,66	PE	600	3,60	7,85	11,20	16,10	23,00	39,40	87,00	6,20
RG-74	52	0,66	-----	-----	1,35	3,28	4,59	6,56	10,70	18,00	41,00	15,70
RG-122	50	0,66	-----	-----	5,58	14,80	23,00	36,10	54,10	95,10	187,00	4,10
RG-142	50	0,70	PTFE	1.900	3,60	8,85	12,80	18,50	26,30	44,25	88,60	4,90
RG-174	50	0,66	PTFE	1.500	12,80	21,70	29,20	39,40	57,40	98,40	210,00	2,60
RG-177	50	0,66	-----	-----	0,70	2,03	3,12	4,92	7,85	14,40	31,20	22,70
RG-178	50	0,69	-----	-----	18,40	34,50	45,90	63,30	91,90	151,00	279,00	1,90
RG-179	75	0,69	-----	-----	17,40	27,90	32,80	41,00	52,50	78,70	144,00	2,50
RG-180	95	0,69	-----	-----	10,80	15,10	18,70	24,90	35,50	55,80	115,00	3,70
RG-187	75	0,69	-----	-----	17,40	27,90	32,80	41,00	52,50	78,70	144,00	2,80
RG-188	50	0,69	-----	-----	19,70	31,50	37,40	46,60	54,80	102,00	197,00	2,80

<b>RG-195</b>	95	0,69	-----	-----	10,80	15,10	18,70	24,90	35,40	55,80	115,00	3,90
<b>RG-196</b>	50	0,69	-----	-----	18,40	34,50	45,20	62,30	91,90	151,00	279,00	2,00
<b>RG-212</b>	50	0,66	-----	-----	2,72	6,23	8,86	13,50	19,40	32,20	75,50	8,50
<b>RG-213</b>	50	0,66	PE	5.000	1,80	4,30	6,25	8,85	13,50	26,30	52,50	10,30
<b>RG-214</b>	50	0,66	PE	5.000	2,15	4,95	7,55	10,80	16,40	28,90	59,00	10,80
<b>RG-215</b>	50	0,66	PE	5.000	1,80	4,30	8,20	8,85	13,50	26,30	52,50	10,30
<b>RG-216</b>	75	0,66	PE	5.000	2,15	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,10	10,80
<b>RG-217</b>	50	0,66	-----	-----	1,35	3,30	4,60	6,55	10,20	18,00	40,50	13,80
<b>RG-218</b>	50	0,66	-----	-----	0,80	2,05	3,10	4,90	7,85	14,40	31,20	22,10
<b>RG-219</b>	50	0,66	-----	-----	0,80	2,05	3,10	4,90	7,85	14,40	31,20	24,00
<b>RG-220</b>	50	0,66	-----	-----	0,55	1,50	2,30	3,70	6,10	11,80	25,50	28,50
<b>RG-221</b>	50	0,66	-----	-----	0,55	1,50	2,30	3,70	6,10	11,80	25,50	30,40
<b>RG-222</b>	50	0,66	-----	-----	14,40	30,50	42,70	59,10	85,30	141,00	279,00	8,50
<b>RG-223</b>	50	0,66	PE	1.900	3,95	10,50	15,80	23,00	32,80	54,10	100,00	5,40
<b>RG-302</b>	75	0,69	-----	-----	1,50	4,00	10,80	15,40	22,60	41,90	85,25	5,30
<b>RG-303</b>	50	0,69	-----	-----	3,61	8,86	12,80	18,50	26,30	44,30	88,60	4,30
<b>RG-316</b>	50	0,69	-----	-----	19,70	31,50	37,40	46,60	54,80	102,00	197,00	2,60
<b>NOTAS</b>	PE = Polietileno.											
	Esp. PE = Espuma de Polietileno.											
	PTFE = Teflón (Politetrafluoroetileno).											
	RG-214 y RG-223 = Con Doble Protección (Doble Apantallado).											

**Tabla I.2: Especificaciones Generales de Cables Coaxiales [24].**

De igual manera, a continuación se muestra una variedad de cables para RF.



**Figura I.10: Distintos Tipos de Cables para RF.**



**1.4.4.2 Conectores para RF.** Durante muchos años se han fabricado una gran variedad de conectores para aplicaciones en radiofrecuencia, cuya función principal es conducir la energía de RF entre dos puntos distantes entre sí, por medio de un cable.

El conector RF ofrece una manera fácil de conectar cables coaxiales a los diferentes dispositivos electrónicos y a otro cable coaxial. La construcción del conector RF a menudo hace posible que el conector para mantener el blindaje, así como proteger la integridad de la conexión.

Los conectores RF se utilizan con casi todo tipo de medios de comunicación electrónicos. Las aplicaciones incluyen la instalación y conexión de servicios de televisión por cable, las transmisiones de radio, módems de cable para la conexión a Internet, una serie de aplicaciones de la aviación y equipo militar, y en general el equipo de prueba electrónico.

Dentro de las características de estos dispositivos hay que considerar, principalmente, las mecánicas y las eléctricas antes de realizar la elección del conector RF a utilizar, teniendo en cuenta, que existirá la limitante del tipo de conector con que cuenta nuestro equipo y/o antena [25].

Entre de las características mecánicas de un conector, están las condiciones ambientales que pueden soportar, el material de construcción y de recubrimiento, su rigidez mecánica y su tamaño.

Desde el punto de vista eléctrico habrá que considerar su impedancia y las pérdidas de inserción principalmente, siendo esta última especialmente relevante.

Si bien algunos tipos de conectores de RF son fácilmente intercambiables con otros conectores RF, es generalmente una buena idea utilizar el tipo de conector RF recomendado para el equipo que está conectado con un cable coaxial.

En la siguiente tabla se muestran algunos conectores de RF para cables coaxiales RG-58U y RG-8, que son los más utilizados en aplicaciones reales:

Cable Coaxial	Conector RF		Cable Coaxial	Conector RF
<b>RG - 58U</b>	RFN-1002-1S	RFN-1009-C-03	<b>RG - 8X</b>	RFB-1101-1X
	RFB-1101-1EN	RFN-1025-1		RFB-1107-1P
	RFN-1024-1	RFN-1027		RFB-1107-1X
	RFU-500	RFU-500		RFN-1004-1SX
	RFU-507	RFU-505		RFN-1007-2SX
	RFU-520-1E	RFU-600		RFN-1026-1X
	RFB-1100-2	RFU-601-1		RFU-508-X
	RFB-1110-C-04	RFT-1202-2		RFU-600-1X
	RFB-1106-2	RFT-1204		RFT-1201-1X
	RFN-1000-1S	RP-3000-1C1		RFT-1203-1X
	RFN-1005-2N	RP30501C		RFT-1217-X
	RFU-520	RSA-3000-C		
	RFN-1009-C	RSA-3050C		
	RFU-527T	RFT-1216-1		

**Tabla I.3: Conectores de RF para Cables Coaxiales RG-58U y RG-8 [26].**

De igual manera, dentro de los tipos de conectores RF más comunes están los siguientes:



**Figura I.11: Distintos Tipos de Conectores para RF.**

### 1.4.5 Cámara Anecoica

Las clásicas instalaciones de ensayo al aire libre (OATS: Open Area Test Site) son todavía una referencia de precisión de las medidas para un buen número de normas internacionales pero sufren de un problema endémico: las interferencias.

Las cámaras anecoicas aparecen como una solución a estos problemas; ya que deben simular las condiciones de espacio libre evitando las interferencias.

Para conseguirlo constan de dos partes fundamentales, la envolvente faradizada y los materiales absorbentes electromagnéticos.

De esta manera, la base habitual de una cámara anecoica es una cámara de Faraday, que se recubre interiormente de materiales absorbentes.

Una cámara de Faraday es una estructura completamente metálica con la que se consigue una atenuación de los campos incidentes. Tiene una función doble, es decir, atenuar las interferencias externas para evitar su influencia en el interior, y atenuar los campos generados en el interior, que podrían afectar al entorno exterior.

Este recinto faradizado se recubre interiormente de absorbentes electromagnéticos para darle propiedades de absorción y convertirlo finalmente en una cámara anecoica. La finalidad de los absorbentes electromagnéticos es «hacer transparentes» las paredes de la cámara a los campos electromagnéticos y evitar las posibles reflexiones.

Los absorbentes pueden ser tipo ferrita, con mejores coeficientes de reflectividad a bajas frecuencias (30 – 1000 MHz) o tipo piramidal, con mejores reflectividades a altas frecuencias (1 – 40 GHz) [27].

La cámara anecoica está equipada con dispositivos electrónicos especializados para llevar a cabo las medidas de portadoras en antenas y difusores pasivos en condiciones del espacio libre, directividad de fuentes radiantes, coeficientes de absorción y reflexión de materiales y dispositivos difusores, en general, para realizar medidas en las que sea

necesario la ausencia de ruidos externos y/o reflexiones de señal en los cerramientos. Además de otras características, la cámara anecoica está montada sobre un sistema amortiguador que garantiza el aislamiento de ruidos de impacto y vibraciones, equipada con un robot que permite realizar giros en los elementos utilizados en las medidas, esto es muy útil en el caso que se desee detectar diagramas de radiación de antena y medidas de potencia en sistemas microondas.

Las Cámaras Anecoicas tienen varias aplicaciones, dentro de las telecomunicaciones, tales como:

- Simulación de condiciones de propagación en el espacio libre.
- Determinación de los Diagramas de Irradiación, Ganancia, Impedancia de Entrada, Respuestas en frecuencia, etc.
- Levantamiento de Características S de diferentes dispositivos.
- Análisis de Interferencia (EMI) y Análisis de Compatibilidad Electromagnética (EMC).

A continuación se muestra diferentes tipos de cámaras anecoicas:



**Figura I.12: Distintos Tipos de Cámaras Anecoicas.**

## **1.5 SISTEMAS DE CONTROL DE POSICIONAMIENTO EN ELEVACIÓN Y AZIMUT**

Es importante realizar un estudio teórico previo acerca de los sistemas de control; ya que esta es la única manera en la cual vamos a estar en la capacidad de determinar qué sistema es el que se requiere para la aplicación específica que se está a punto de realizar.

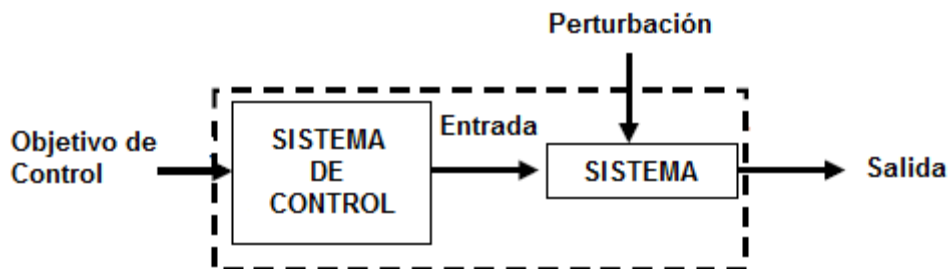
Hay que tener presente, que dependiendo de las características de nuestra aplicación y de qué y cómo se la quiere controlar, hay una variedad de sistemas de control con los cuales se puede trabajar. Y solo un análisis de cada uno de ellos, llevará a escoger el sistema de control más adecuado.

Dentro del presente trabajo, los sistemas de control son la base en la cual se fundamenta el diseño, la implementación y el manejo de los servomecanismos que van a permitir el movimiento de las minitorres de sustentación, tanto en elevación y azimut, logrando así la obtención de características de radiación de antenas usando la cámara anecoica.

Un sistema de control, como grupo de componentes, puede regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados dentro de un proceso.

La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados.

En un sistema de control se busca, que a pesar de las perturbaciones o entradas, el sistema vuelva a un estado de equilibrio.



**Figura I.13: Diagrama de Sistema de Control.**

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

- Garantizar la estabilidad, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.

- Ser tan eficiente como sea posible.

Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.

- Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Un sistema de control tiene, por lo general, los siguientes componentes:

- Entradas o referencias.

- Salidas o variables controladas.

- Planta (Sistema físico modelado).

- Controlador.

- Actuadores (Dispositivo que regula el suministro de energía o material del proceso, para que cambie la señal de medición).

- Transductores.

- Sensores.

Teniendo en cuenta los componentes de un sistema de control, se puede hablar también de ciertos elementos básicos que se deben considerar, como los siguientes:

- **Variable Controlada:** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla.

- **Variable Manipulada:** La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

El objetivo del control es medir el valor de la variable controlada del sistema para aplicar correcciones a través de la variable manipulada para obtener el valor deseado.

- **Planta:** La planta normalmente es un conjunto de partes que trabajan juntas con el objetivo de realizar una operación en particular. Se denomina planta a cualquier sistema físico que se desea controlar.

- **Proceso:** El proceso es cualquier operación que va a ser controlado.

- **Sistema:** Un sistema es un conjunto de componentes que se interrelacionan y trabajan juntos para realizar un objetivo determinado.

- **Perturbación:** Una perturbación es una señal que normalmente afecta a la variable controlada del sistema. Las perturbaciones pueden ser internas, cuando surgen dentro del problema; o externas, cuando se producen fuera del sistema y actúan como otra señal de entrada.

▪ **Control Realimentado:** El control realimentado es un sistema que mantiene una comparación entre la señal de referencia y la señal de salida deseada. El resultado de dicha comparación es utilizado para realizar el control en el sistema.

▪ **Función de Transferencia:** La función de transferencia es el resultado del análisis de la respuesta transitoria de la planta del sistema que se quiere controlar, a través de medios matemáticos; debido a que por lo general los sistemas de control actuales no son lineales.

La función de transferencia permite el poder implementar las diversas acciones de control que ayudarán a la estabilidad del sistema; ya que nos permite conocer las características del sistema, es decir, la función de transferencia nos representará la planta que se desea controlar.

Dentro de este proceso podemos encontrar dos tipos de sistemas de control, uno cuya estrada en independiente (lazo abierto) de su salida y otro cuya salidas es realimentada al sistema (lazo cerrado)

### 1.5.1 Sistemas en Lazo Abierto

Este es un proceso en donde solo la señal de entrada actúa y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, es decir, la salida no afecta la acción de control, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

La exactitud de un sistema de lazo abierto depende de dos factores:

- a) La calibración del elemento de control.
- b) La repetitividad de eventos de entrada sobre un extenso período de tiempo en ausencia de perturbaciones externas.



---

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto.
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- La salida no se compara con la entrada.
- Ser afectado por las perturbaciones. Éstas pueden ser tangibles o intangibles.
- La precisión depende de la previa calibración del sistema.

Los sistemas en lazo abierto presentan los siguientes elementos básicos:

- **Elemento de Control:** Este elemento determina qué acción se va a tomar dada una entrada al sistema de control.
- **Elemento de Corrección:** Este elemento responde a la entrada que viene del elemento de control e inicia la acción para producir el cambio en la variable controlada al valor requerido.
- **Proceso:** El proceso o planta en el sistema en el que se va a controlar la variable.

A continuación se presenta un esquema de un sistema en lazo abierto.

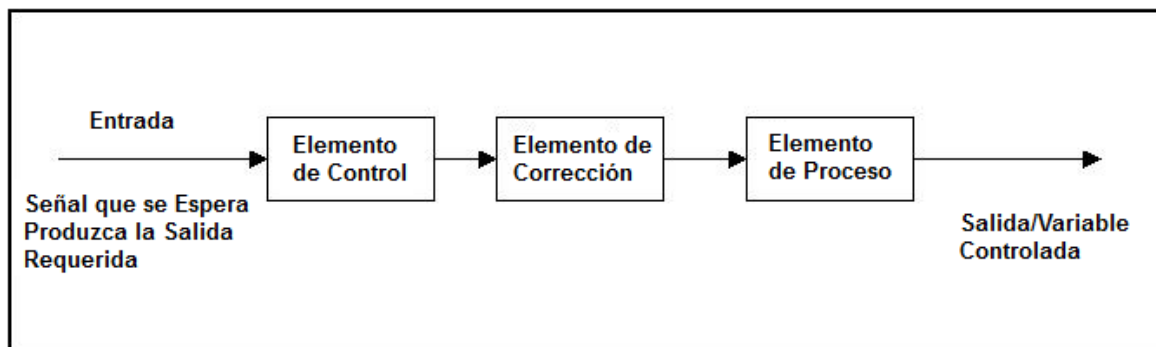


Figura I.14: Diagrama de Bloques de un Sistema en Lazo Abierto.

### 1.5.2 Sistemas en Lazo Cerrado

Este es un proceso en el cual la acción de control está en función de la señal de salida, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

Sus características son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
- Su propiedad de retroalimentación.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

Los sistemas en lazo abierto presentan los siguientes elementos básicos:

- **Elemento de Comparación:** Este elemento compara el valor requerido o de referencia de la variable por controlar con el valor medido de lo que se obtiene a la

salida, y produce una señal de error la cual indica la diferencia del valor obtenido a la salida y el valor requerido.

- **Elemento de Control:** Este elemento decide que acción tomar cuando se recibe una señal de error.

- **Elemento de Corrección:** Este elemento se utiliza para producir un cambio en el proceso al eliminar el error.

- **Elemento de Proceso:** El proceso o planta, es el sistema dónde se va a controlar la variable.

- **Elemento de Medición:** Este elemento produce una señal relacionada con la condición de la variable controlada, y proporciona la señal de realimentación al elemento de comparación para determinar si hay o no error.

El sistema de control de lazo cerrado, al presentar el uso de la retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de parámetros del sistema. De este modo, es posible utilizar componentes relativamente imprecisos y económicos, y lograr la exactitud de control requerida en determinada planta.

A continuación se presenta un esquema de un sistema en lazo cerrado.

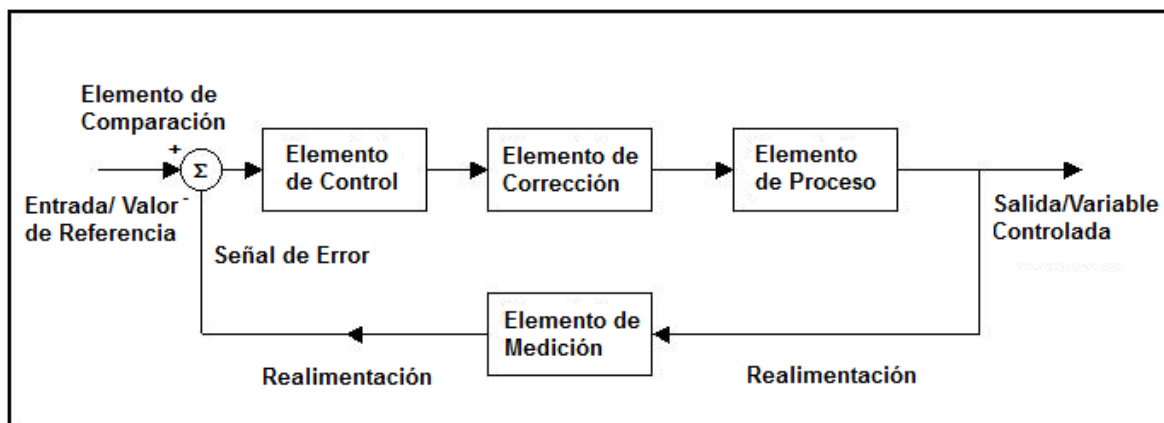
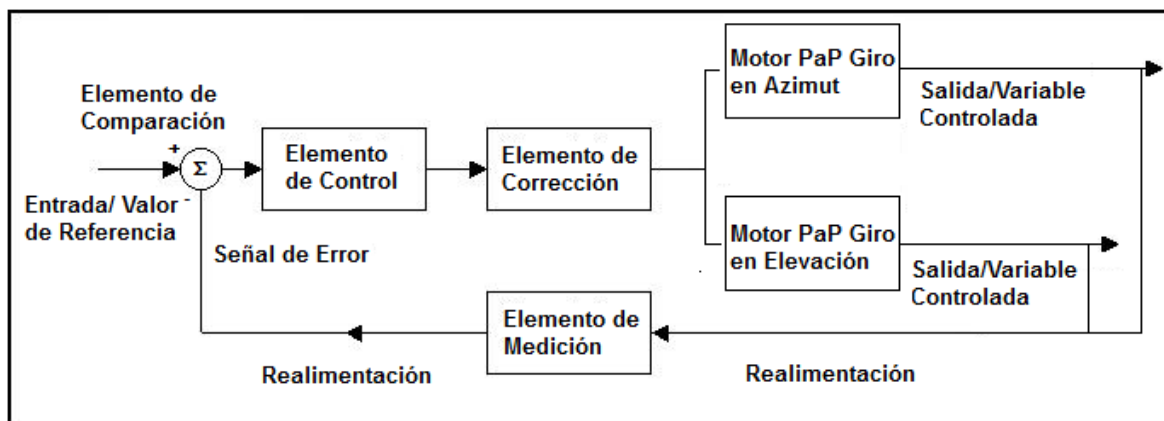


Figura I.15: Diagrama de Bloques de un Sistema en Lazo Cerrado.

De igual manera, se presenta un diagrama de bloques de sistemas de control en lazo cerrado de controladores de giro de motores paso a paso en dos grados de libertad, como es azimut y elevación:



**Figura I.16: Diagrama de Bloques de un Sistema en Lazo Cerrado para Controladores de Giro de Motores Paso a Paso en Dos Grados de Libertad.**

## 1.6 CONTROLADORES DE POSICIÓN Y MOTORES PASO A PASO

### 1.6.1 Controladores o Modos de Control

**1.6.1.1 Control On – Off.** En un sistema de control de dos posiciones, o control on – off, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente encendidos y apagados. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos [28].

**1.6.1.2 Control Proporcional (P).** El control proporcional, a diferencia del control on – off, en el cual el dispositivo corrector final es forzado a tomar una de dos posiciones disponibles; tiene un rango continuo de posiciones posibles. Es decir, la posición exacta es proporcional a la señal de error; en otras palabras, la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la magnitud del error.

En esencia, el controlador proporcional es un amplificador con ganancia variable, que tiene una ventaja importante sobre el control on – off; ya que elimina la constante oscilación alrededor del valor de referencia, con lo que proporciona un control de la planta más preciso, reduciendo el desgaste y rotura de actuadores mecánicos.

Además de esto, el control proporcional reduce tanto el tiempo de subida como el error de estado estable, tiene una instantaneidad de aplicación y facilita la comprobación de resultados.

Se debe tener en cuenta, que si la planta no posee integradores o un control integral, el control proporcional siempre presentará un offset, que es un error en estado estable o desplazamiento.

Otras desventajas que presenta el control proporcional incluyen la falta de inmunidad al ruido y la imposibilidad de corregir ciertos errores en el régimen permanente.

**1.6.1.3 Control Integral (I).** La acción de control integral se denomina control de reajuste (reset). Estos ajustes cambian la frecuencia con la cual la unidad integral reinicia a la unidad proporcional, y esta frecuencia puede ser expresada como “repeticiones por minuto”.

Con estos ajustes, se mide un valor de tiempo el cual multiplica a la integral del error para aumentar la ganancia efectiva del controlador. La salida del controlador continúa aumentando hasta eliminar el error y la variable medida regrese al punto de referencia; con lo cual el control integral produce una mejora en la exactitud del sistema

En resumen, un gran cambio en la carga de un sistema hará experimentar un gran cambio del punto de referencia, a la variable controlada [29].

Por lo general, una unidad integral es usada en conjunto con una unidad proporcional, y las dos unidades son denominadas “controladores PI – controladores proporcional - integral”, o también denominados “controlador de dos modos”.

**1.6.1.4 Control Derivativo (D).** La acción de control derivativo, en ocasiones llamada de control de velocidad, ocurre cuando la magnitud de la señal de salida del controlador  $u(t)$  es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error  $e(t)$ . Debido a esto, cuando la variable controlada está quieta, la señal derivativa es cero. Cuando el valor de la variable controlada está cambiando rápidamente, la señal derivativa es grande.

Por lo general se requiere de una acción de control derivativa cuando se tienen cambios rápidos en la señal de error; ya que esta acción de control puede anticipar un error basado en la velocidad de respuesta.

La señal derivativa cambia la salida del controlador. En este sentido, una señal de control más grande es producida cuando hay un cambio rápido en la variable controlada, y durante el cambio, el elemento final de control recibe una señal de entrada más grande. El resultado es una respuesta más rápida a los cambios de carga.

El ajuste de la acción derivativa es llamado la velocidad de ajuste. Si estos están solucionando el problema muy lentamente, el sistema de control no responderá lo suficientemente rápido a los cambios de carga. Si la acción de control es demasiado alta, la respuesta a cambios pequeños en la variable controlada será muy grande y el sistema de control se volverá inestable. La velocidad, por este motivo, debe ser ajustada por cada sistema de control para responder correctamente a los cambios en la carga [30].

Una ventaja de usar una acción de control derivativa es que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por tanto, el control derivativo prevé el error, inicia una acción oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema.

Aunque el control derivativo no afecta en forma directa el error en estado estable, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite el uso de un valor más grande en la ganancia, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

Debido a que el control derivativo opera sobre la velocidad de cambio del error, y no sobre el error mismo, este modo nunca se usa solo. Siempre se emplea junto con una acción de control proporcional o proporcional – integral.

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, aporta un medio de obtener un control con alta sensibilidad.

**1.6.1.5 Control Proporcional – Integral (PI).** Este controlador es la suma de una acción proporcional y una integral. Como se señala anteriormente, la acción proporcional nos acerca al valor deseado, aunque sólo se acerca a la referencia, su respuesta es rápida y no presenta oscilaciones; y la acción integral nos lleva exactamente al valor deseado, aunque la respuesta del integrador es relativamente lenta, es decir, se alcanza el estado estable muy lentamente.

Es por eso que se combinan ambas acciones para tener los beneficios de una respuesta rápida sin oscilaciones de una acción proporcional y una respuesta que nos lleve exactamente al valor deseado de una acción integral.

El control proporcional – integral decrementa el tiempo de subida, aumenta considerablemente la ganancia del sistema, mejorando por consiguiente la exactitud del sistema, sin modificar de manera importante la velocidad de respuesta transitoria y la estabilidad del mismo, y tiene el efecto de eliminar el error de estado estable [31].

**1.6.1.6 Control Proporcional Derivativo (PD).** Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

El control proporcional – derivativo tiende a modificar considerablemente el comportamiento del sistema, hablando en términos de estabilidad, velocidad y exactitud; ya que, aunque no afecta de manera directa al error en estado estacionario, añade

amortiguamiento al sistema, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable. Además reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, por lo cual tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema, mejorando la respuesta del mismo.

**1.6.1.7 Control Proporcional – Integral – Derivativo (PID).** La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional – integral – derivativo o PID. Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

## **1.6.2 Motores Paso a Paso**

Un motor es un servo mecanismo giratorio, capaz de transformar energía eléctrica en energía mecánica. Esto significa que, a diferencia de un motor convencional (que gira de forma continua), es capaz de avanzar una serie de grados (o pasos) a la vez, dependiendo del estado de sus entradas de control. En general basan su funcionamiento en las fuerzas ejercidas por un campo electromagnético y creadas al hacer circular una corriente eléctrica a través de una o varias bobinas.

La ventaja fundamental que poseen los motores paso a paso; con respecto a otros tipos de motores, como los motores de giro continuo, es que no necesitan “en principio” un sistema de realimentación para controlar la velocidad o posición del motor; ya que los motores paso a paso tienen básicamente dos entradas; una de dirección (DIR) con la que le indicamos en qué sentido queremos que gire el motor y otra de reloj (CLK) por la cual introduciremos un pulso por cada paso que queramos que dé el motor, esto nos permite controlar de una forma muy sencilla la posición y la velocidad del motor.

Igualmente, los motores de corriente continua giran libremente y a una velocidad alta. Cualquier intento de lograr que uno de estos motores gire una cantidad acotada de recorrido, como por ejemplo dos vueltas, es imposible. Los motores no giran enseguida a una velocidad conocida: hay que calcular un tiempo de arranque, porque la inercia no les permite llegar a la velocidad normal de inmediato. Y cuando se les corta la alimentación



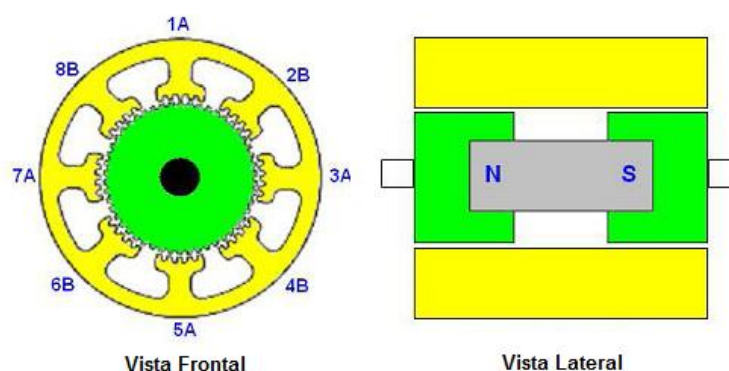
continúan girando, también por inercia. Presentado otra sería de desventajas frente a los motores paso a paso.

Un motor paso a paso está constituido por dos partes: una fija, llamada estator; y una móvil, llamada rotor.

El estator está construido en base de una serie de cavidades en las que se ubican las bobinas. Cuando una corriente eléctrica atraviesa una de estas bobinas, se forman los polos norte - sur necesarios para impulsar el motor.

El rotor puede basarse en un imán permanente o un inducido ferromagnético, siempre con el mismo número de pares de polos que el contenido en una sección de la bobina del estator. Todo esto se monta sobre un eje que a su vez se apoya en dos cojinetes que le permiten girar libremente.

La estructura interna de un motor paso a paso, mostrada en la Figura I.17, tiene en la vista frontal, que el estator está formado de 8 polos magnéticos con 5 dientes cada uno y una bobina en cada uno de esos polos. En la vista lateral se observa que el rotor está formado por un imán permanente que posee una tapa en cada extremo con 50 dientes cada una (no se representan los dientes en la gráfica), estando una de estas tapas polarizada como N (Norte) y la otra como S (Sur), además el tamaño de los dientes es el mismo que el del estator pero están desfasados de tal manera que el diente en una de las tapas coincide en el otro extremo con un hueco. Los dientes del estator tienen todos el mismo tamaño, pero están desfasados  $1,8^\circ$  entre los polos.

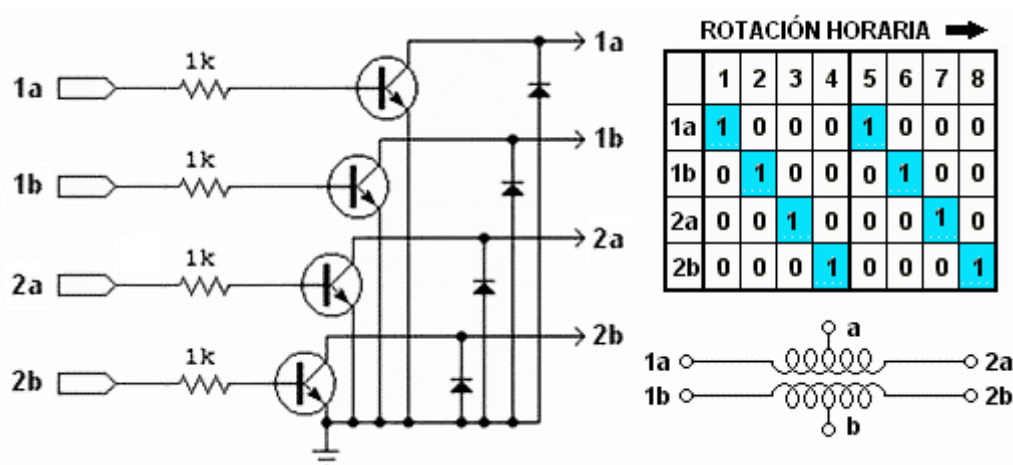


**Figura I.17: Estructura Interna Motores Paso a Paso.**

Un motor paso a paso (PaP) se caracteriza por que su alimentación se basa en un tren de pulsos con una secuencia previamente definida, a cada una de las bobinas que componen el estator. Cada vez que a alguna de estas bobinas se les aplica un pulso, el motor se desplaza un paso, y queda fijo en esa posición. Dependiendo de las características constructivas del motor este paso puede ser desde  $90^\circ$  hasta incluso  $0,9^\circ$ .

Logrando que las bobinas mencionadas se energicen en el orden y con la frecuencia adecuada, podremos hacer que el motor avance un paso en uno u otro sentido. Para ello, se necesita de un sistema de control adecuado.

En el esquema más común de conexión, para motores paso a paso unipolares, se unen los "puntos medios" de ambos ejes (a y b, como se muestra en la Figura I.18) y se les conecta al positivo de la alimentación del motor. El circuito de control de potencia, entonces, se limita a poner a masa los bobinados de manera secuencial.



**Figura I.18: Circuito y Secuencia para Controlar un Motor Unipolar [32].**

Se tiene además, los motores paso a paso de reluctancia variable, que son más simples de manejar. Su secuencia se limita a activar cada bobinado en orden, como lo indica la Figura I.18. Es común que estos motores tengan un cable común que une todas las bobinas. Estos motores, si se los mueven a mano, no tienen la sensación "dentada" de los otros motores paso a paso, sino que se mueven libres, como los motores de corriente continua.

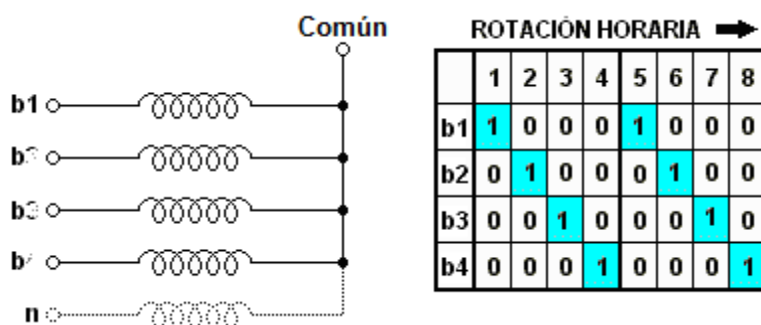


Figura I.19: Circuito y Secuencia para Controlar un Motor de Reluctancia Variable [33].

Por lo tanto, si somos capaces de mover el motor en pequeños pasos, esto nos va a permitir controlar su posición, con mayor o menor precisión dependiendo del avance de cada paso. Además, variando la frecuencia con la que se aplican los pulsos, también estaremos variando la velocidad con que se mueve el motor, lo que nos permite realizar un control de velocidad. Por último si invertimos la secuencia de los pulsos de alimentación aplicados a las bobinas, estaremos realizando una inversión en el sentido de giro del motor.

Resumiendo, definimos el motor paso a paso, como aquel motor cuyas bobinas del estator son alimentadas mediante trenes de pulsos, con una determinada frecuencia, y que permite:

- Controlar Posición.
- Controlar Velocidad.
- Controlar Sentido de Giro.

Los motores paso a paso presentan las siguientes características:

- **Voltaje:** Este se halla directamente impreso sobre la unidad o se especifica en su hoja de características. A veces es preciso exceder el voltaje nominal para obtener el par deseado, pero ello contribuye a un mayor calentamiento e incluso al acortamiento de la vida del motor.

- **Resistencia:** La resistencia por bobina determina la corriente del estator y, por tanto, afecta a la curva característica del par y a la velocidad máxima.

- **Resolución:** El ángulo girado en cada paso es el factor más importante de un motor PaP a efectos de una aplicación dada. La operación de medio paso dobla el número de pasos por revolución. Números grados/paso habituales son: 0.72, 1.8, 3.6, 7.5, 15 e, incluso, 90.

Los motores paso a paso presentan los siguientes parámetros:

- **Par Dinámico de Trabajo:** Depende de sus características dinámicas y es el momento máximo que el motor es capaz de desarrollar sin perder paso, es decir, sin dejar de responder a algún impulso de excitación del estator y dependiendo, evidentemente, de la carga.

- **Par de Mantenimiento:** Es el par requerido para desviar, en régimen de excitación, un paso el rotor cuando la posición anterior es estable ; es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable dada

- **Par de Detención:** Es una par de freno que siendo propio de los motores de imán permanente, es debida a la acción del rotor cuando los devanados del estator están desactivados.

- **Ángulo de Paso:** Se define como el avance angular que se produce en el motor por cada impulso de excitación. Se mide en grados.

- **Número de Pasos por Vuelta:** Es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa.

- **Frecuencia de Paso Máximo:** se define como el máximo número de pasos por segundo que puede recibir el motor funcionando adecuadamente.

▪ **Momento de Inercia del Rotor:** Es su momento de inercia asociado, que se expresa en gramos por centímetro cuadrado.

A continuación se presentan una variedad de motores paso a paso:













Tipo	Bipolar de Imán Permanente	Unipolar de Reluctancia Variable	Bipolar Híbrido
Características	2 Fases, 4 Espiras	4 Fases, 8 Espiras	2 Fases, 4 Espiras
Número Paso/Vueltas	8	24	12
Etapas de Funcionamiento			
Paso 1			
Etapas Intermedia			
Paso 2	45° 	15° 	30° 

Figura I.20: Variedad de Motores Paso a Paso [34].

## CAPÍTULO II

# SISTEMA DE MEDICIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS

### 2.1 MATERIALES

Las herramientas de software, dentro de la simulación y el diseño, tanto de las antenas de prueba como de las respectivas interfaces HMI, son de vital importancia, ya que mediante este tipo de instrumentos es posible que los resultados deseados provenientes de esta aplicación, y en términos generales, de cualquier aplicación en la cual se requiera una interacción hombre – máquina, sean los esperados, o por lo menos lo más cercano a una propuesta inicial.

En el presente trabajo, las herramientas de software son las siguientes:

- **MATLAB:** Es el software que permite la interacción PC – Analizador de Espectros. Esta interfaz HMI hace posible la adquisición de datos y la obtención del patrón de radiación de las antenas de prueba.

- **LABVIEW:** Es el software que permite la interacción PC – Minitorres de Sustentación. Esta interfaz HMI hace posible el movimiento de las antenas en dos grados de libertad, siendo estos azimut y elevación.

▪ **QY4:** Es el software que permite el diseño y simulación de antenas Yagi. Estas antenas fueron utilizadas en las pruebas, tanto al aire libre como dentro de la cámara anecoica, para la obtención de sus parámetros y patrón de radiación.

Posteriormente se ahonda en las características de cada uno de estas herramientas de software. De igual, se presentan los códigos necesarios para llevar a cabo esta aplicación.

### **2.1.1 Software de Simulación del Funcionamiento de Antenas**

**2.1.1.1 MATLAB.** Es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. MATLAB es un lenguaje técnico computacional de alto nivel y un ambiente interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y computación numérica. Usando MATLAB, se pueden resolver problemas técnicos de computación de una manera más rápida que si se utilizara lenguajes de programación tradicionales, tales como C, C++ y Fortran.

MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular puede también trabajar con números escalares, tanto reales como complejos, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas.

Se puede utilizar MATLAB en un amplio rango de aplicaciones, que incluyen procesamiento de imagen, procesamiento de señal, comunicaciones, diseño de control, mediciones y pruebas, modelamiento financiero y su análisis, y biología computacional.

MATLAB provee un número de características para documentar y compartir el trabajo que se realice dentro de este lenguaje de programación; ya que se puede integrar el código desarrollado en MATLAB con otros lenguajes y aplicaciones. También se puede distribuir las aplicaciones y algoritmos que uno mismo haya desarrollado dentro de MATLAB.

---

MATLAB tiene las siguientes características principales:

- Lenguaje de alto nivel para computación técnica.
- Ambiente de desarrollo para el manejo de código, archivos y datos.
- Herramientas interactivas para exploración iterativa, diseño y resolución de problemas.
- Funciones matemáticas para álgebra lineal, estadísticas, análisis de Fourier, filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones gráficas en 2-D y 3-D para la visualización de datos.
- Herramientas para la construcción de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Herramientas para integrar algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones y lenguajes externos, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel [35].

Las componentes más importantes del entorno de trabajo de MATLAB son las siguientes:

1. El Escritorio de Matlab (**Matlab Desktop**), que es la ventana o contenedor de máximo nivel en la que se pueden situar las demás componentes.

2. Las componentes individuales, orientadas a tareas concretas, entre las que se puede citar:

- La Ventana de Comandos (**Command Window**): Esta es la ventana en la que se ejecutan interactivamente las instrucciones de MATLAB y en donde se muestran los resultados correspondientes, si es el caso.



---

- La Ventana Histórica de Comandos (**Command History**): Ofrece acceso a las sentencias que se han ejecutado anteriormente en la Command Window.

- El Espacio de Trabajo (**Workspace**): Es el conjunto de variables y de funciones de usuario que en un determinado momento están definidas en la memoria del programa o de la función que se está ejecutando. La ventana Workspace constituye un entorno gráfico para ver las variables definidas en el espacio de trabajo.

- La Plataforma de Lanzamiento (**Launch Pad**): Da acceso a todos los módulos o componentes de MATLAB que se tengan instalados, por ejemplo al Help o a los Demos.

- El Directorio Actual (**Current Directory**): Permite explorar los directorios del ordenador en forma análoga a la del Explorador u otras aplicaciones de Windows. Cuando se llega al directorio deseado se muestran los ficheros y ficheros allí contenidos. La ventana Current Directory permite ordenarlos por fecha, tamaño, nombre, etc. El directorio actual cambia automáticamente en función del directorio seleccionado con este explorador, y también se puede cambiar desde la propia barra de herramientas del Matlab Desktop.

- La Ventana de Ayuda (**Help**): Ventana donde se puede encontrar la información que se desee acerca de MATLAB. Permite buscar información general sobre MATLAB o sobre otros productos de la familia a los que se tenga acceso. También permite buscar ayuda general sobre MATLAB o sobre la función o el concepto que se desee.

- El Editor de Ficheros y Depurador de Errores (**Editor&Debugger**): Permite tanto crear y modificar ficheros, como ejecutarlos paso a paso para ver si contienen errores (proceso de Debug o depuración).

- El Editor de Vectores y Matrices (**Array Editor**): permite ver los valores de los elementos de cualquier matriz o vector definido en el programa: es también

---

posible modificar estos valores clicando sobre la celda correspondiente. La ventana del Array Editor incluye una lista desplegable en la que se puede elegir el formato en el que se desea ver los datos. El Array Editor es muy útil también para entender bien ciertos algoritmos, ejecutando paso a paso un programa y viendo cómo cambian los valores de las distintas variables.

- La Ventana que Permite Estudiar cómo se Emplea el Tiempo de Ejecución (**Profiler**): Es un programa de utilidad que permite saber cómo se ha empleado el tiempo de la CPU en la ejecución de un determinado programa. El profiler es una herramienta muy útil para determinar los cuellos de botella de un programa, es decir las funciones y las líneas de código que más veces se llaman y que se llevan la mayor parte del tiempo de ejecución [36].

- Las interfaces gráficas de usuario GUI (Graphical User Interface), es la forma en que el usuario interactúa con el programa o el sistema operativo de una computadora. Una GUI contiene diferentes elementos gráficos tales como: botones, campos de texto, menús, gráficos, etc. Para crear una GUI en MatLab usamos GUIDE (Graphical User Interface Development).

A continuación se muestra la pantalla del ambiente de desarrollo MatLab:

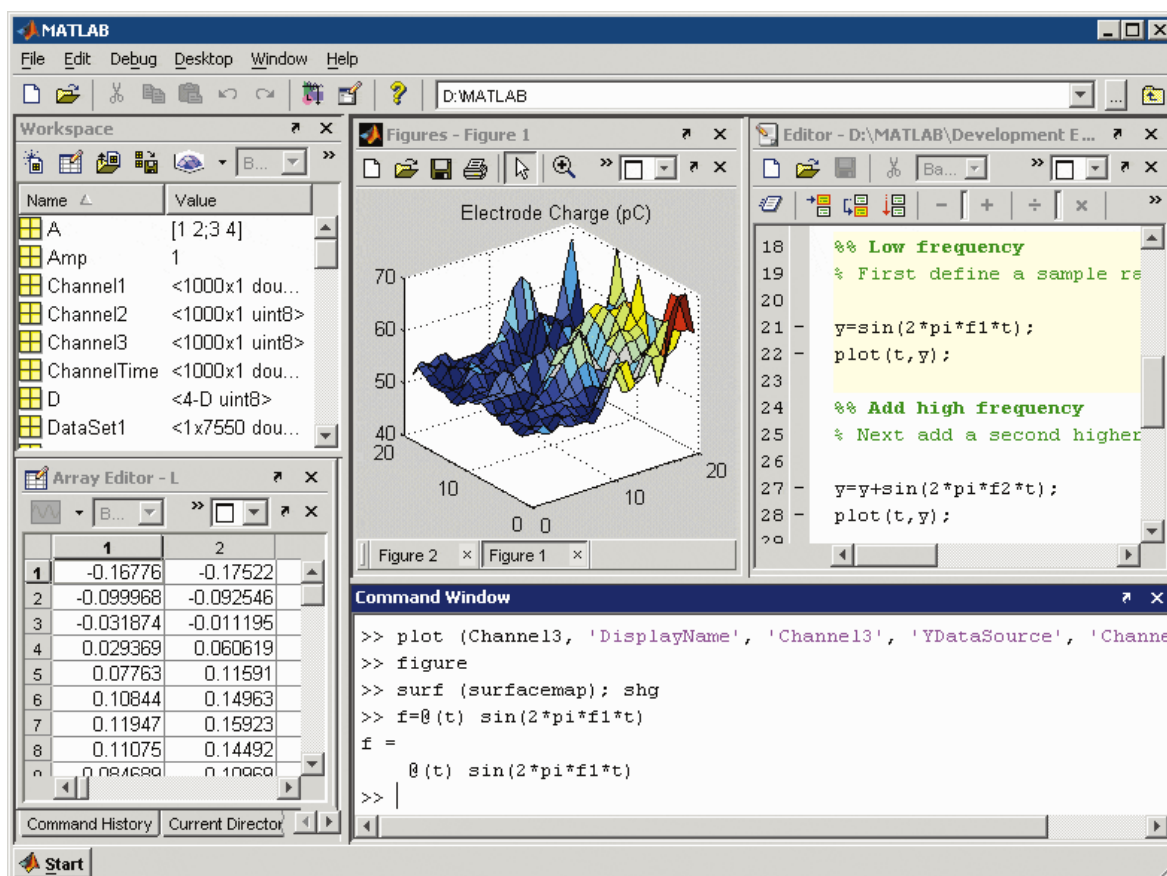


Figura II.1: Ambiente de Desarrollo MATLAB.

**2.1.1.2 Quick Yagui V.4 (QY4).** Este es un software de diseño, en MS – DOS, que permite el diseño y análisis de la antena Yagi de forma rápida y automática. Para esto el programa utiliza el método de “los momentos”, de tal manera, que cuando el usuario ingresa la frecuencia de resonancia, el número de elementos pasivos y el diámetro, el software despliega los valores de dimensiones y separación de los dipolos. Además genera los diagramas del lóbulo de radiación en el plano horizontal y vertical de la antena diseñada a partir del propio programa.

A continuación se muestra la pantalla principal del software de simulación QY4:

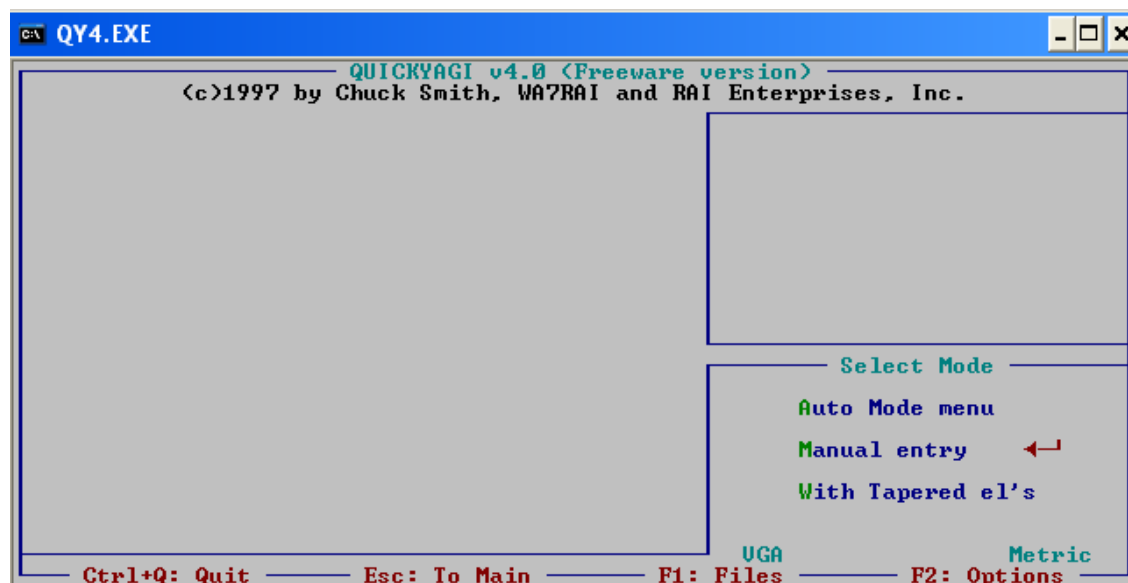


Figura II.2: Pantalla Principal del Software de Simulación QY4.

## 2.1.2 Antenas Tipo Yagui y Log Periódicas para UHF y Microonda

**2.1.2.1 Antenas Tipo Yagui para UHF y Microonda.** Inventada en Japón en 1926 por S. Uda y dada a conocer internacionalmente poco después por H. Yagi.

Esta antena, conocida como Yagi, cuya característica más significativa es su simplicidad, debida a la utilización de elementos parásitos, se utiliza habitualmente en las bandas de HF (3-30 MHz), VHF (30-300 MHz) y UHF (300-3000 MHz) en aplicaciones de radiodifusión de televisión, estaciones de radioaficionados y radioenlaces punto a punto.

De igual manera, los arreglos Yagi-Uda son bastante comunes en la práctica debido a que su peso es ligero, simples de construir, de bajo costo y proveen características moderadamente deseables (incluyendo un rayo unidireccional) para varias aplicaciones.

Esta antena consiste de un número de elementos de dipolo lineales, uno de los cuales es directamente energizado por una línea de transmisión de alimentación mientras que los otros elementos actúan como radiadores parásitos cuyas corrientes son inducidas por acoplamiento mutuo.

La configuración más habitual consta de un elemento activo, un reflector y entre uno y veinte directores; como se muestra en la siguiente figura:

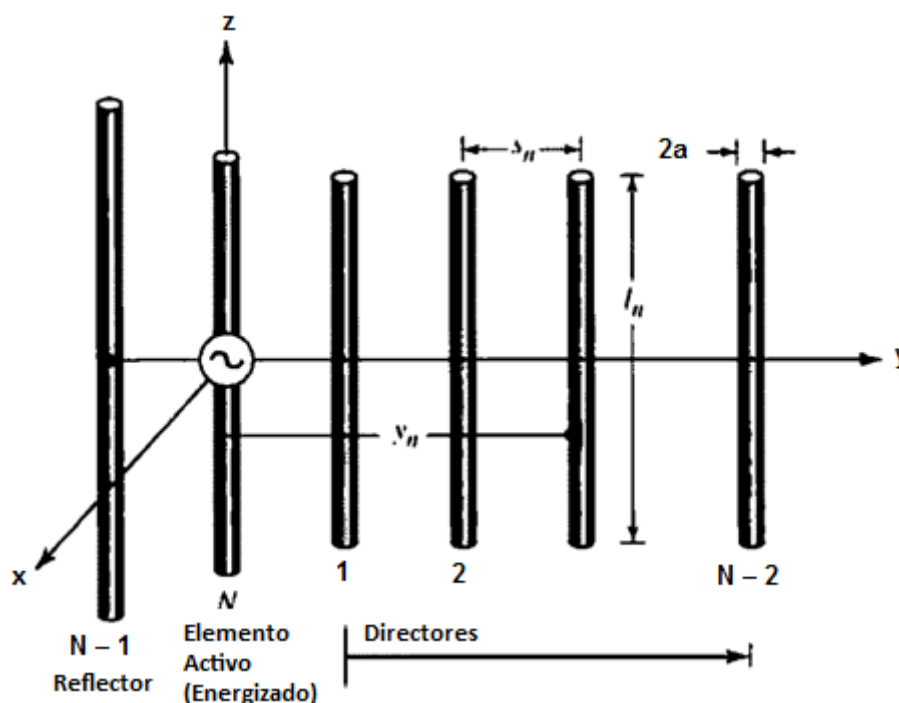


Figura II.3: Configuración Antena Yagi - Uda\*.

El elemento activo más común suele ser un dipolo doblado resonante, con objeto de aumentar el ancho de banda. El reflector suele tener una longitud un 5% mayor que la del activo, habitualmente entre  $0,5\lambda$  y  $0,52\lambda$ . La longitud de los directores oscila entre  $0,38\lambda$  y  $0,48\lambda$ , siendo típicamente un 5% o 10 % inferior a la del activo. La separación entre elementos es algo mayor para el reflector (típica  $0,15\lambda$ ) que para los directores (típica  $0,11\lambda$ ).

Por lo tanto, elementos apropiadamente separados con longitudes ligeramente menores que sus correspondientes longitudes de resonancia (menor que  $\lambda/2$ ) actúan como directores, debido a que forman un arreglo con corrientes aproximadamente iguales en magnitud y con iguales cambios de fase progresivos, lo cual refuerzan el campo del elemento energizado en dirección de los directores.

\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 514, 1997.

De igual manera, un elemento apropiadamente separado, con una longitud de  $\lambda/2$  o ligeramente mayor; actuara como un reflector.

En consecuencia, un arreglo Yagi-Uda puede ser considerado como una estructura que soporta una onda viajera cuyo funcionamiento está determinado por la distribución de la corriente en cada elemento y por la velocidad de fase de la onda viajera.

Este radiador es exclusivamente diseñado para operar como un arreglo endfire, y esto se logra haciendo que los elementos parásitos en el rayo delantero actúen como directores; mientras que los elementos en el rayo trasero actúan como reflectores. Yagi designó a la fila de directores como un “canal de onda”.

La antena Yagi no es estrictamente una agrupación, por no ser todos sus elementos iguales, pero como los diagramas de radiación de los elementos sí son casi iguales, suelen analizarse con las técnicas de agrupaciones lineales tomando como antena básica el dipolo en  $\lambda/2$ .

Las características de radiación que son de interés general en una antena Yagi-Uda son las ganancias hacia el frente y hacia atrás, la impedancia de entrada, el ancho de banda, la relación frente-espalda y la magnitud de los lóbulos menores. Las longitudes y los diámetros de los directores y los reflectores, como también su respectivo espaciamiento, determina las características óptimas.

Por lo general, un arreglo Yagi-Uda tiene una baja impedancia de entrada y un ancho de banda relativamente angosto. Mejoras en ambas características pueden ser alcanzadas a expensas de otras (como la ganancia, magnitud de los lóbulos menores, etc.). Por lo general, un compromiso es realizado, y depende del diseño particular.

Un arreglo Yagi-Uda puede ser resumido diciendo que su desempeño puede ser considerado en tres partes:

- El arreglo del reflector-alimentador.

- El alimentador.
  
- Las filas de los directores.

Se ha visto que, numérica y experimentalmente, el espaciamiento y el tamaño del reflector tienen efectos despreciables en la ganancia hacia adelante, pero tienen grandes efectos en la ganancia hacia atrás (relación frente-espalda) y en la impedancia de entrada. Estos reflectores pueden ser utilizados para controlar y optimizar los parámetros de la antena sin la necesidad de afectar la ganancia de una manera significativa.

Además, la longitud y el radio del mecanismo de alimentación, tienen un pequeño efecto en la ganancia hacia adelante pero un gran efecto en la ganancia hacia atrás. Su geometría es usualmente escogida para controlar la impedancia de entrada que más comúnmente se hace real (elemento resonante).

Finalmente, el tamaño y el espaciamiento de los directores tienen un gran efecto en la ganancia hacia adelante, ganancia hacia atrás y la impedancia de entrada. Estos son considerados como los elementos más críticos dentro del arreglo.

Las principales características de las antenas de Yagi-Uda son las siguientes:

- Ganancia relativa al dipolo en  $\lambda/2$  entre 5 dB y 18 dB. Esta ganancia, expresada en dB, es del orden de magnitud del número de elementos, hasta un máximo de 20.
  
- Relación delante-atrás entre 5 dB y 15 dB. Este parámetro suele mejorarse con ayuda de un reflector diédrico.
  
- Nivel de lóbulo principal a secundario bajo, entre 5 y 10 dB. Sin embargo, este parámetro no es crítico en las aplicaciones más habituales de estas antenas.

- Impedancia de entrada de unos 300 ohmios, debido a la utilización de un dipolo doblado como elemento activo, por lo que es necesario el uso de simetrizadores para poder conectarlas a cables coaxiales de 50 y 75  $\Omega$ .

Finalmente, debe destacarse que la antena Yagi presenta un ancho de banda relativamente grande, y muy superior al que se espera de una agrupación, por comportarse como una antena de onda progresiva [37].

**2.1.2.2 Antenas Tipo Log Periódicas para UHF y Microonda.** Introducidas por DuHamel e Isbell, este tipo de configuración de antena, sigue de cerca el concepto de independencia de frecuencia. Aunque hay que tener en cuenta, que debido a que la forma entera no puede ser completamente especificada por ángulos, no es verdaderamente independiente de la frecuencia.

**2.1.2.2.1 Superficies Planas y de Cable.** Esta estructura consiste de una tira de metal cuyos bordes son especificados por el ángulo  $\alpha/2$ . Sin embargo, para poder especificar la longitud desde el origen hasta cualquier punto dentro de la estructura, una distancia característica debe ser incluida.

En coordenadas esféricas  $(r, \theta, \phi)$  la forma de la estructura puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\theta = \text{funcion periodica de} [b \ln(r)] \quad (2.1)$$

Como por ejemplo:

$$\theta = \theta_0 \sin \left[ b \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) \right] \quad (2.2)$$

Se puede evidenciar por las formulas anteriormente expuestas, que los valores de  $\theta$  son repetidos cuando el logaritmo de la frecuencia radial  $\ln(w) = \ln(2\pi f)$  difiere por  $2\pi / b$



. Por lo tanto el desempeño del sistema es periódico como una función del logaritmo de la frecuencia; de aquí proviene el nombre logarítmico-periódico o log-periódico.

Una estructura log-periódica plana y una configuración de una antena log-periódica típica es mostrado en la siguiente figura:

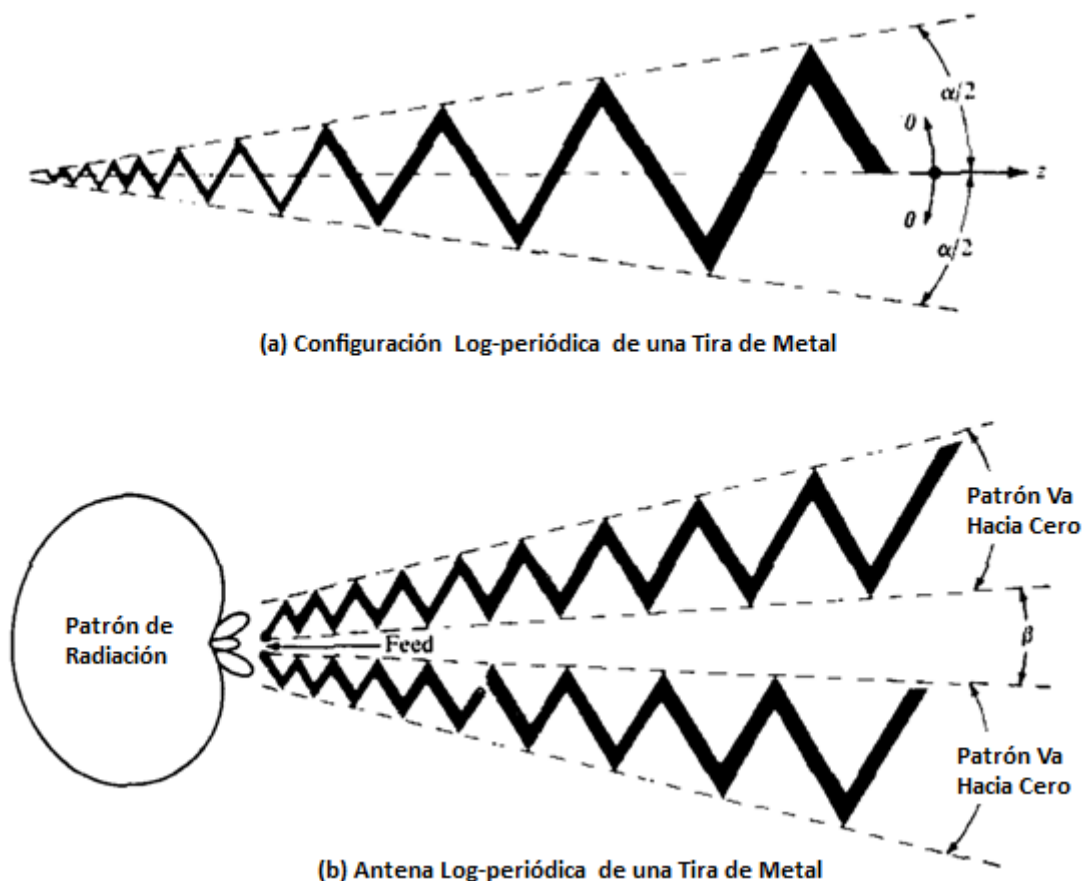


Figura II.4: Típica Configuración Log-periódica de Tira de Metal y Estructura de la Antena\*.

Esta consiste de dos brazos coplanares. El patrón es unidireccional en dirección del vértice del cono formado por los dos brazos, y es linealmente polarizada.

\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 551, 1997.

Como se menciona anteriormente, las antenas log-periódicas de cable fueron introducidas por DuHamel. Mientras investigaba la distribución de la corriente en estructuras de superficie log-periódicas mostradas en la Figura II.4(a), DuHamel descubrió que los campos en los conductores se atenuaban muy fuertemente con la distancia. Esto sugería que quizás había una fuerte concentración de corriente en o cerca de los bordes de los conductores. Por lo tanto, si se remueve parte de la superficie interna para formar una antena de cable como la mostrada en la Figura II.4 (b), esta no debería degradar el desempeño de la antena de una manera grave. De esta manera se encontró una antena más simple, más ligera, más barata y menos resistente al viento.

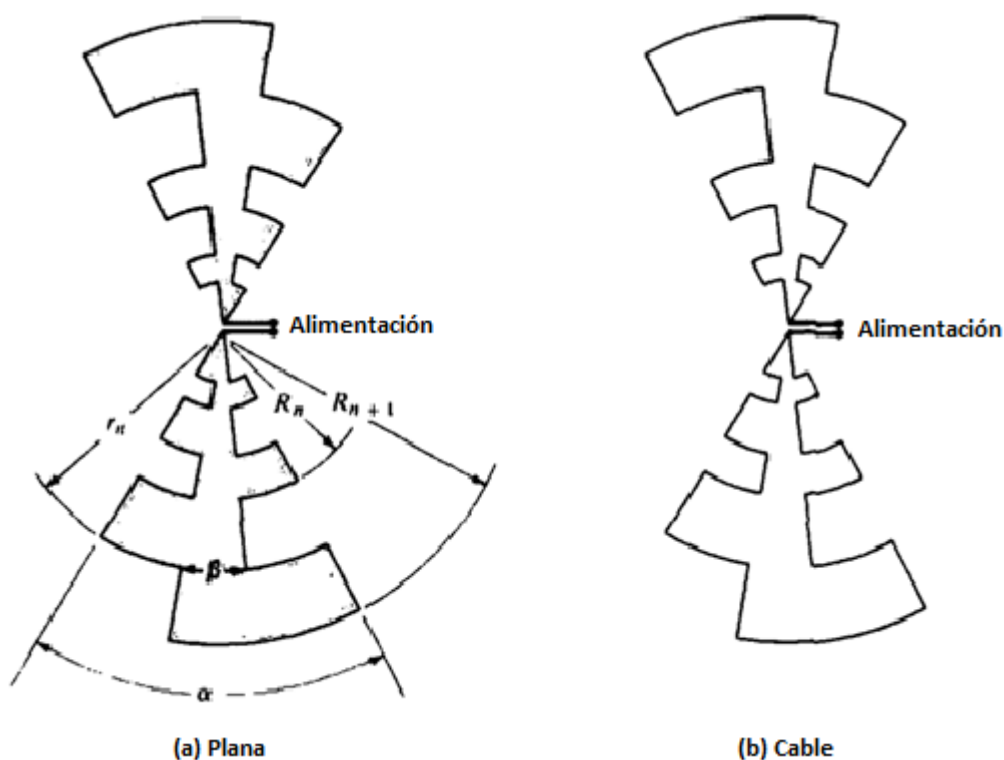
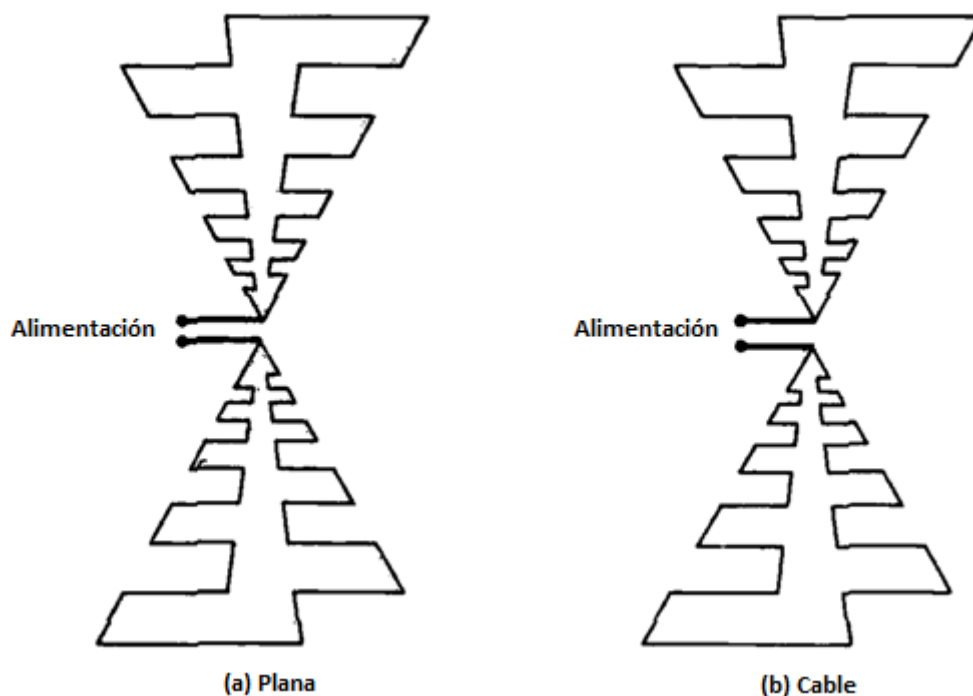


Figura II.5: Antenas Log-periódicas\*.

\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 552, 1997.

De igual manera se encontró que si los cables de los bordes de los platos son lineales en vez de curvos, la geometría de las superficies log-periódicas mostradas en la Figura II.4 se reduce, respectivamente, a estructuras log-periódicas de diente trapezoidal, como los que se muestran en la Figura II.5. Estas simplificaciones resultan en geometrías de fabricación más convenientes que carecen de pérdida de desempeño operacional.



**Figura II.6: Antenas Log-periódicas de Diente Trapezoidal\*.**

Si la geometría de las estructuras log-periódicas mostradas en la Figura II.4 usan dientes periódicos uniformes, el radio geométrico de la estructura log-periódica ( $\tau$ ) se define como:

$$\tau = \frac{R_n}{R_{n+1}} \quad (2.3)$$

\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 553, 1997.

De igual manera, el ancho de la ranura de la antena ( $X$ ), se define como:

$$(X) = \frac{r_n}{R_{n+1}} \quad (2.4)$$

El periodo de operación es definido mediante el radio geométrico ( $\tau$ ). Por lo tanto, si dos frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  se encuentran a un periodo de distancia, estas se encuentran relacionadas al radio geométrico ( $\tau$ ) de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{f_1}{f_2}, \quad f_2 > f_1 \quad (2.5)$$

En general, estas estructuras tienen un desempeño casi tan bueno como el que tienen las estructuras planas y cónicas. La única gran diferencia es que las configuraciones log-periódicas son linealmente polarizadas en vez de circularmente polarizadas.

**2.1.2.2.2 Arreglo de Dipolo.** La estructura de antena log-periódica más reconocida es la configuración introducida por Isbell, la cual se muestra en la siguiente figura:

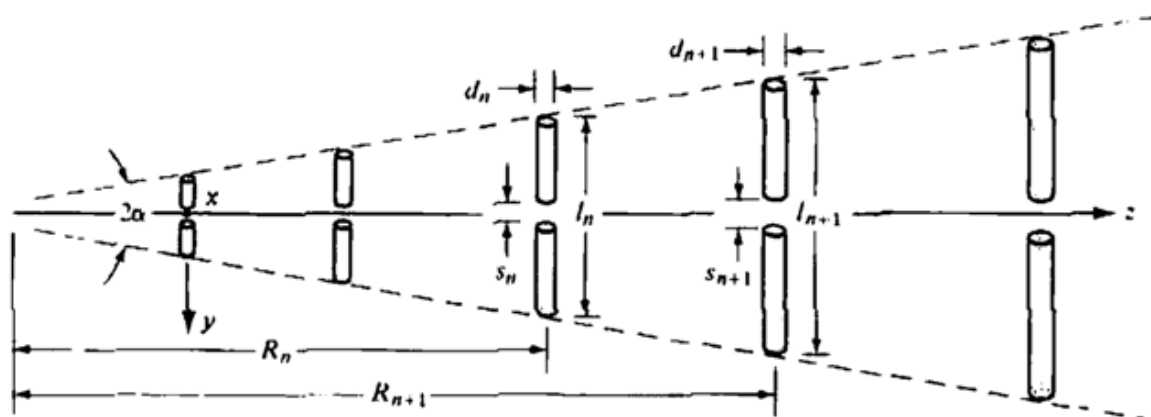


Figura II.7: Arreglo de Dipolo Log-periódico\*.

\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 555, 1997.

Esta configuración consiste de una secuencia de dipolos lineales paralelos ubicados uno al lado del otro, formando un arreglo coplanar. Aunque esta antena tiene directividades similares a las de una antena Yagi-Uda (7 -12 [dB]); estas se pueden conseguir y mantener sobre anchos de banda mucho más grandes.

Se debe tener en cuenta que entre estos dos tipos de antenas existen diferencias considerables. Por ejemplo, mientras que las dimensiones geométricas de los elementos de un arreglo Yagi-Uda no siguen un patrón determinado, las longitudes ( $l_n$ 's), los espaciamientos ( $R_n$ 's), los diámetros ( $d_n$ 's) e incluso las brechas de espaciamiento en los centros del dipolo ( $s_n$ 's) de un arreglo log-periódico se incrementan logarítmicamente. Esto está definido como el inverso del radio geométrico ( $\tau$ ), de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{s_2}{s_1} = \frac{s_{n+1}}{s_n} \quad (2.6)$$

Otro parámetro que es usualmente asociado con un arreglo de dipolo es el factor de espaciamiento ( $\sigma$ ), definido de la siguiente manera:

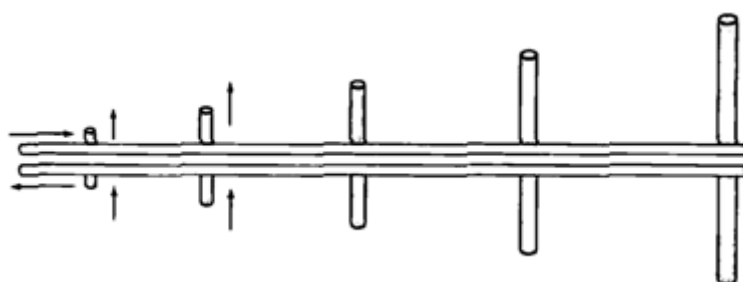
$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2l_{n+1}} \quad (2.7)$$

Las líneas directas a través de los extremos del dipolo se encuentran para formar un ángulo de  $2\alpha$ , lo cual es una característica de las estructuras independientes de la frecuencia.

Otra diferencia que se debe tener en cuenta entre un arreglo Yagi-Uda y un arreglo log-periódico, es que en el primero solamente un elemento del arreglo es directamente energizado por la línea de alimentación, mientras los otros elementos operan en modo parasito; y en el segundo todos los elementos del arreglo están conectados. De esta manera

se tiene dos métodos básicos, con los cuales se podría conectar y alimentar a los elementos de un arreglo de dipolo log-periódico. En ambos casos la antena es alimentada en el extremo pequeño de la estructura.

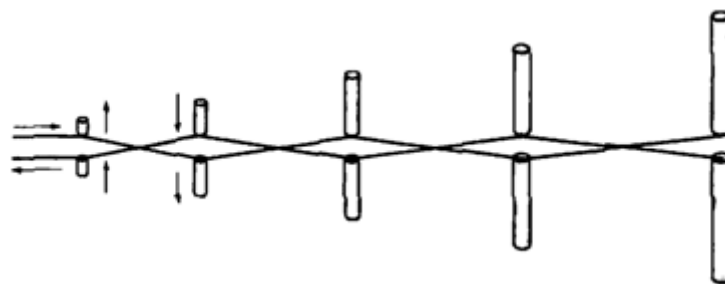
El primer método es una conexión directa, como se muestra en la Figura II.7, en la cual las corrientes en los elementos tienen la misma relación de fase que las fases terminales. Si además, los elementos se encuentran cercanamente separados, la progresión de fase de las corrientes es hacia la derecha. Esto produce un rayo endfire en dirección de los elementos más largos y resulta en efectos de interferencia al patrón de radiación.



**Figura II.8: Conexión Directa de un Arreglo de Dipolo Log-periódico\*.**

El segundo método consiste en entrecruzar o transponer, mecánicamente, la alimentación entre los elementos adyacentes, como se muestra en la Figura II.8. Esto genera que una fase de  $180^\circ$  sea añadida al terminal de cada elemento. Como la fase entre los elementos pequeños adyacentes que se encuentran espaciados cercanamente esta casi en oposición, muy poca energía es radiada por estos y sus efectos de interferencia son despreciables. Sin embargo, al mismo tiempo, los elementos más largos y con espaciamientos más grandes, sí radian. La reversión de fase mecánica entre estos elementos produce una progresión de fase, que hace que la energía sea transmitida en dirección de los elementos más cortos. Los elementos más activos para este arreglo de alimentación son aquellos que se encuentran cerca de la resonancia con un patrón de radiación combinado en dirección del vértice del arreglo.

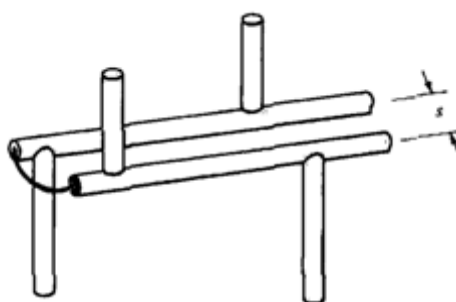
\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 555, 1997.



**Figura II.9: Conexión Entrecruzada de un Arreglo de Dipolo Log-periódico\*.**

Este tipo de arreglo de alimentación es conveniente, siempre que la línea de alimentación de entrada es una línea balanceada, como una línea de transmisión de dos conductores.

A parte de estos dos métodos de conexión, también se puede incluir la conexión coaxial, como se muestra en la Figura II.9. Usar un cable coaxial como una línea de alimentación, es un modo práctico de alcanzar la reversión de fase de  $180^\circ$  entre los elementos adyacentes. Este arreglo de alimentación proporciona un balun de banda ancha incorporado, lo que resulta en un sistema balanceado en general. Los elementos de este arreglo son usualmente hechos de tubería. El cable coaxial es traído a la alimentación a través de la parte hueca de uno de los tubos de alimentación de línea. Mientras que el conductor exterior del cable coaxial es conectado al conductor de la alimentación, su conductor interno es extendido y conectado al otro tubo de la línea de alimentación.



**Figura II.10: Conexión Coaxial de un Arreglo de Dipolo Log-periódico\*.**

\* Constantine A. Balanis, "Antenna Theory – Analysis and Design", Segunda Edición, Págs. 555, 1997.

Si el patrón geométrico de un arreglo de dipolo log-periódico es mantenido para alcanzar una verdadera configuración log-periódica; esto resultaría en una estructura infinita. Sin embargo, para que sea útil como un práctico radiador de banda ancha, la estructura es truncada en ambos extremos. Esto limita la frecuencia de operación a un ancho de banda determinado.

Las frecuencias de corte de una estructura truncada pueden ser determinadas por las longitudes eléctricas del elemento más largo y más corto de la estructura. La frecuencia de corte más baja ocurre aproximadamente cuando el elemento más largo es  $\lambda/2$ ; mientras que la frecuencia de corte más larga ocurre cuando el elemento más corto está cercano a  $\lambda/2$ , solamente cuando la región activa es muy angosta. La región activa del arreglo de dipolo log-periódico está cercana a los elementos cuyas longitudes se encuentran cercanas o son ligeramente más pequeñas que  $\lambda/2$ . El rol de elemento activo es pasado desde el elemento más largo hacia el elemento más corto a medida que la frecuencia se incrementa. De igual manera, la energía de los elementos activos más cortos, que viaja en dirección de los elementos inactivos más largos; decrece muy rápidamente, logrando que una cantidad despreciable de energía sea reflejada por el extremo truncado.

El movimiento de la región activa de la antena, y su centro de fase asociado, es una característica no deseada en el diseño de alimentaciones para reflectores y antenas de lente [38].

## **2.2 Especificaciones del Sistema**

### **2.2.1 Tipos de Antenas de Prueba**

Se planea utilizar antenas tipo Yagi, de construcción artesanal, la primera antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), cuatro elementos Directores, una Ganancia de 8.5 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,08 [dB] y trabajan a una frecuencia de 911 [MHz].



La segunda antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), siete elementos Directores, una Ganancia de 12.56 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,03 [dB] y trabajan a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Finalmente, también se planea utilizar antenas omnidireccionales de fabrica, que poseen entre sus características principales una Ganancia de 12 [dBi], y trabajan a una frecuencia de 2.4 - 2.5 [GHz].

Para el diseño y simulación de dichas antenas se utilizó la herramienta de software QY4.

La siguiente figura muestra las características de la antena tipo Yagi, que trabaja a 911 [MHz]:

```

C:\ QY4.EXE
QUICKYAGI v4.0 (Freeware version)
(c)1997 by Chuck Smith, WA7RAI and RAI Enterprises, Inc.
YAGI_TEO.ANT
OPERATING FREQUENCY..... <MHz> 911
REFLECTOR LENGTH..... < m > .16416
FED ELEMENT LENGTH..... < m > .15548
REFLECTOR SPACING..... < m > .045790
#of DIRECTORS 2 Rfl EL DIAM <mm > 2.7
D 1 SP < m > .034320 D 1 LEN < m > .14859
D 2 SP < m > .067920 D 2 LEN < m > .1266
FORWARD GAIN = 8.50 dBi
F to B RATIO = 30.09 dB
INPUT IMPEDANCE =
97.8 -j 0.0 Ohms
ARRAY LENGTH = 0.15 m
F4: Optimize F6: BW
F3: Plot F5: Mode M
↑ ↓ ← → keys: Step highlight UGA FD Metric
Ctrl+Q: Quit Esc: Restart F1: Files F2: Options

```

Figura II.11: Características Antena Yagi – 911 [MHz] - Software de Simulación QY4.

La Figura II.11 muestra la frecuencia de operación de la antena, la longitud total de la antena, las longitudes del reflector, elemento activo (en este caso un dipolo doblado), y de los cuatro directores, además del espaciamiento que debe existir entre cada elemento de la antena.

De igual manera, la Figura II.11 presenta la ganancia de la antenna, impedancia de entrada y la relación frente/espalda. Características de la antenna mencionadas con anterioridad.

De igual manera, la siguiente figura muestra las características de la antenna tipo Yagi, que trabaja a 2.4 [GHz]:

```

  QY4.EXE
  QUICKYAGI v4.0 (Freeware version)
  (c)1997 by Chuck Smith, WA7RAI and RAI Enterprises, Inc.
  YAGIOTRA.ANT

  OPERATING FREQUENCY..... <MHz> 609.24
  REFLECTOR LENGTH..... < m > .244
  FED ELEMENT LENGTH..... < m > .222
  REFLECTOR SPACING..... < m > .108
  #of DIRECTORS 7          EL DIAM <mm > 8
  D 1 SP < m > .06611      D 1 LEN < m > .216
  D 2 SP < m > .0881       D 2 LEN < m > .206
  D 3 SP < m > .08299      D 3 LEN < m > .19942
  D 4 SP < m > .08581      D 4 LEN < m > .19609
  D 5 SP < m > .11598      D 5 LEN < m > .19147
  D 6 SP < m > .11596      D 6 LEN < m > .18424
  D 7 SP < m > .1663       D 7 LEN < m > .1795

  FORWARD GAIN = 12.56 dBi
  F to B RATIO = 30.03 dB
  INPUT IMPEDANCE =
  99.6 -j 0.1 Ohms
  ARRAY LENGTH = 0.83 m

  F4: Optimize      F6: BW
  F3: Plot          F5: Mode M

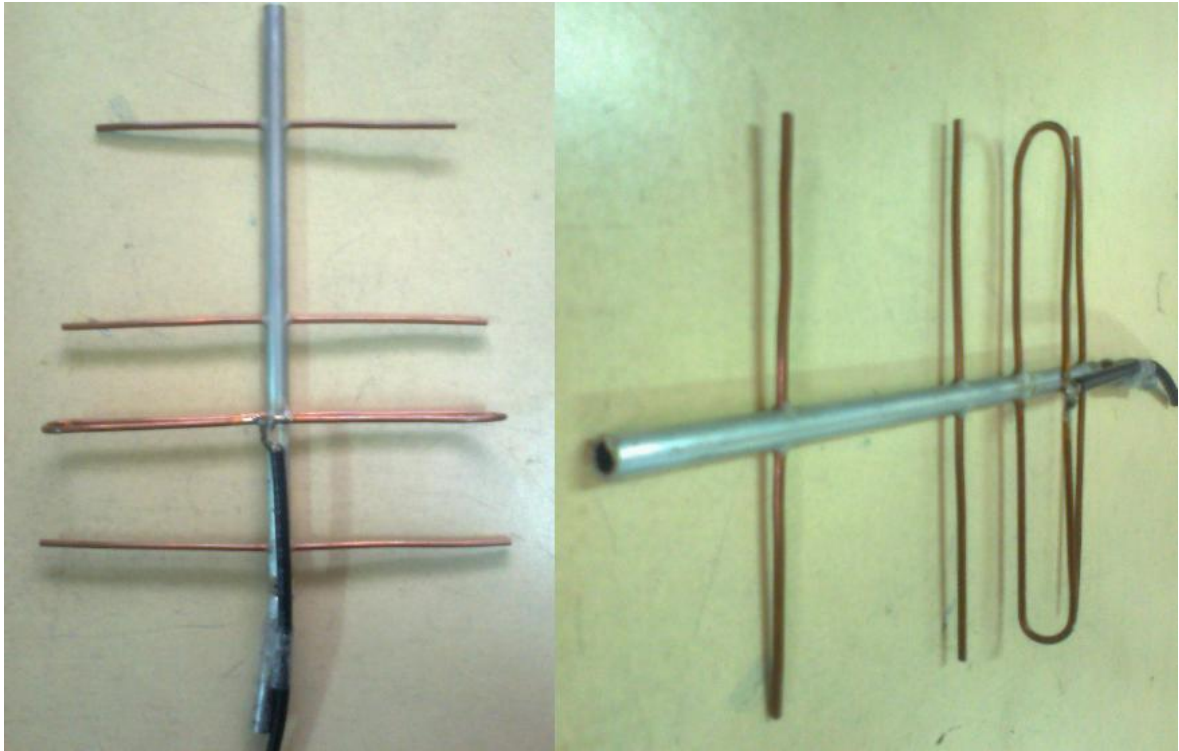
  ↑ ↓ ← → keys: Step highlight      UGA          FD Metric
  Ctrl+Q: Quit      Esc: Restart      F1: Files    F2: Options
  
```

Figura II.12: Características Antena Yagi – 2.4 [GHz] - Software de Simulación QY4.

La Figura II.12 muestra la frecuencia de operación de la antenna, la longitud total de la antenna, las longitudes del reflector, elemento activo (en este caso un dipolo doblado), y de los siete directores, además del espaciamento que debe existir entre cada elemento de la antenna. Hay que tener en cuenta que QY4 solo permite trabajar con valores de frecuencia menores a 1 [GHz], por lo que a la frecuencia de trabajo hay que multiplicarla por cuatro, mientras que a las longitudes de los elementos directores, con sus respectivos espaciamentos, hay que dividirlos para cuatro.

De igual manera, la Figura II.12 presenta la ganancia de la antenna, impedancia de entrada y la relación frente/espalda. Características de la antenna mencionadas con anterioridad.

Una vez obtenidos todos los datos, la construcción de los elementos de las antenas Yagi (reflector, elemento activo, y directores) se las realizó en base a alambre de cobre, que fueron sostenidos en un tubo ligero de aluminio, como se presenta en las siguientes figuras:



**Figura II.13: Antena Yagi – 911 [MHz] - Construcción Artesanal.**



**Figura II.14: Antena Yagi – 2.4 [GHz] - Construcción Artesanal.**

Dentro de la construcción de las antenas Yagi, no se debe olvidar de mencionar la longitud física del cable coaxial, ya que estos permiten la conexión de las antenas tanto al generador de señales como al analizador de espectros.

En este punto hay que tener en cuenta la velocidad o el factor de propagación, en este caso del 66,6666%. Dando así como resultado, la siguiente fórmula:

$$\text{longitud cable [m]} = n \times 0.66666 \times \frac{C}{f} \quad (2.8)$$

Donde:

$n$  : Número entero.

$C$  : Velocidad de la luz.

$f$  : Frecuencia de trabajo en Hz, para la que fue diseñada la antena.

Para esta aplicación en específico, las longitudes de los cables fueron las siguientes:

$$\text{longitud cable antena Tx} = n \times 0.66666 \times \frac{C}{f} = 25 \times 0.66666 \times \frac{3 \times 10^8}{911 \times 10^6} = 5,4829[m]$$

$$\text{longitud cable antena Rx} = n \times 0.66666 \times \frac{C}{f} = 23 \times 0.66666 \times \frac{3 \times 10^8}{911 \times 10^6} = 5,0443[m]$$

Una característica importante de estos cables coaxiales es que cada  $\lambda/2$  se repite la impedancia en la carga, al comienzo de dichos cables de conexión.

Finalmente, la siguiente figura muestra las antenas omnidireccionales:



**Figura II.15: Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**

### 2.2.2 Bandas de Operación de las Antenas y Cámara Anecoica

Las antenas tipo Yagi, de construcción artesanal, están diseñadas para resonar a una frecuencia de 911 [MHz] y 2.4 [GHZ], respectivamente.

Las antenas omnidireccionales, de igual manera están construidas para resonar a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Finalmente, la cámara anecoica, en la cual se van a realizar las diferentes pruebas, debido al diseño y su construcción, posee una banda de operación que se encuentra entre los 2 – 3 [GHz]

### 2.3 Esquema General del Sistema de Medida de Patrones de Radiación de Antenas

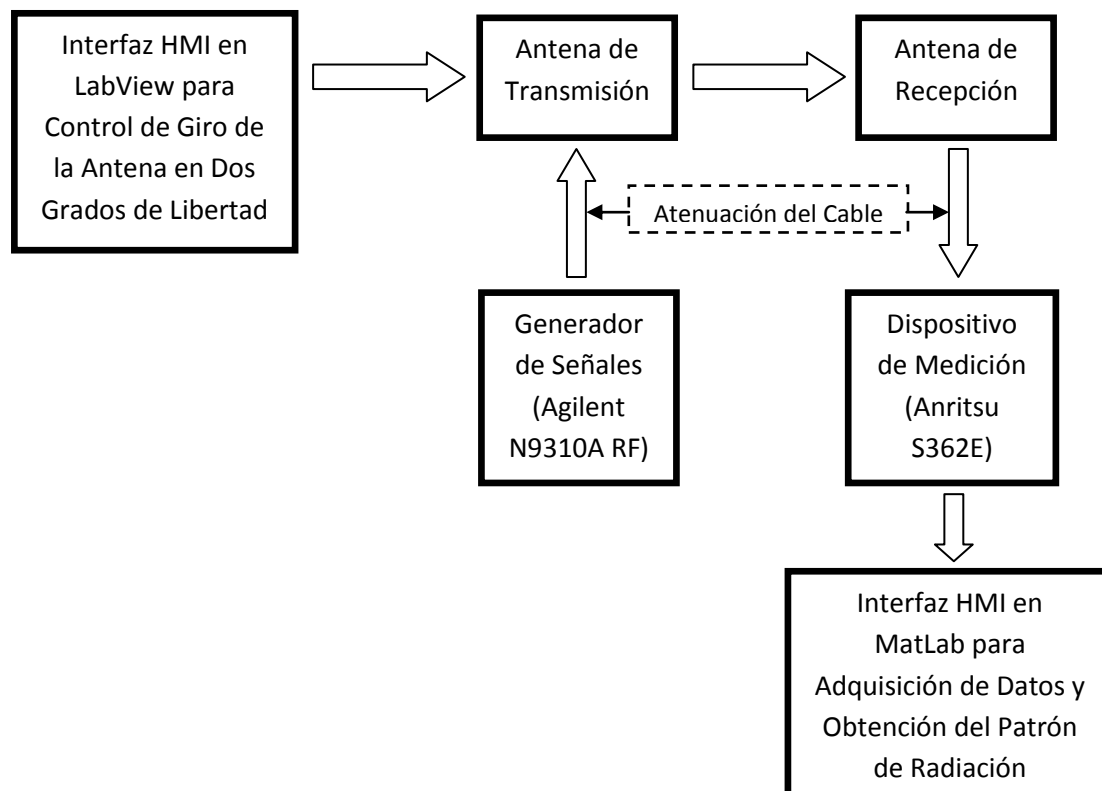


Figura II.16: Esquema General Del Sistema de Medida de Patrones de Radiación.

---

El diagrama de bloques anteriormente presentado en la Figura II.16, muestra en resumen el esquema general del sistema de medida de patrones de radiación de antenas.

En una primera parte, se muestra lo referente a todo lo involucrado con la antena de transmisión, es decir:

- La interfaz HMI realizada en LabView, la cual permite al usuario controlar, desde la PC, el giro de la antena transmisora en dos grados de libertad. Siendo estos grados de libertad azimut y elevación.
  
- El generador de señales Agilent N9310A RF, el cual permite generar la frecuencia y amplitud deseada dentro del sistema de transmisión. En este caso en particular, se utiliza la frecuencia para la cual fue diseñada la antena, 911 [MHz] y 2.4 [GHz], y una amplitud de 0 [dBm] y 20 [dBm], respectivamente.

En una segunda parte, se muestra lo referente a todo lo involucrado con la transmisión de señales entre la antena transmisora y la antena receptora. Dentro de esto hay que tener en cuenta que, inicialmente el sistema de transmisión tuvo lugar al aire libre, para posteriormente trasladarlo dentro de la cámara anecoica.

Finalmente, en una tercera parte, se muestra lo referente a todo lo involucrado con la antena de recepción, es decir:

- El analizador de espectros Anritsu S362E, con el cual se van a obtener los parámetros de la antena, además de los datos de potencia necesarios para la obtención del patrón de radiación.
  
- La interfaz HMI realizada en MatLab, la cual permite al usuario, desde la PC, la adquisición de los datos de potencia; obtenidos a través del analizador de espectros Anritsu S362E, y la posterior gráfica del patrón de radiación de la antena de prueba.

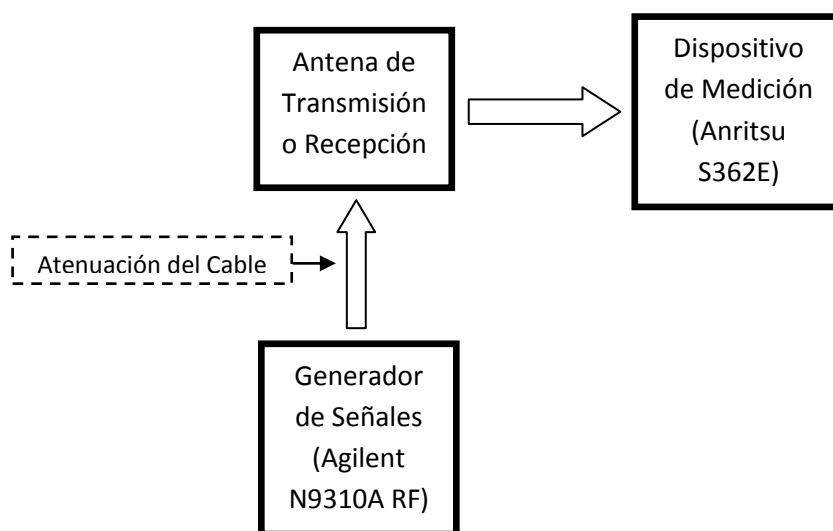
Se debe tener siempre presente, la atenuación de los cables, tanto en la antena transmisora como en la antena receptora. Esta atenuación depende de la velocidad de propagación y de la longitud misma de los cables.

En este caso se conoce que para un cable RG -58, la atenuación a 1 [GHz] es de 78,7 [db] por cada 100 [m]. Por lo que se obtienen las siguientes atenuaciones aproximadas, para nuestros cables coaxiales:

$$\text{atenuación cable antena Tx} = \frac{5.4829 \times 78.7}{100} = 4.3150[\text{dB}]$$

$$\text{atenuación cable antena Rx} = \frac{5.0443 \times 78.7}{100} = 3.9699[\text{dB}]$$

De igual manera, se presenta el esquema general de las mediciones para obtener las diferentes características de radiación de las antenas de prueba:



**Figura II.17: Esquema General Del Sistema de Medida de Características de Radiación.**

El diagrama de bloques presentado en la Figura II.13, muestra en resumen el esquema general de las mediciones para obtener las diferentes características de radiación de las antenas de prueba y se lo describe a continuación:



---

- El generador de señales Agilent N9310A RF, el cual permite generar la frecuencia y amplitud deseada dentro del sistema de transmisión. En este caso en particular, se utiliza la frecuencia para la cual fue diseñada la antena, 911 [MHz] y 2.4 [GHz], y una amplitud de 0 [dBm] y 20 [dBm], respectivamente.

- La antena de transmisión o de recepción de la cual se desee obtener las diferentes características de radiación; ya sean estas: pérdida de retorno, carta de Smith, VSWR, etc.

- El analizador de cables y antenas Anritsu S362E, el cual permite la adquisición de las diferentes características de radiación de las antenas de prueba.

De igual manera hay que tener presente atenuación de los cables, tanto en la antena transmisora como en la antena receptora.

## **CAPÍTULO III**

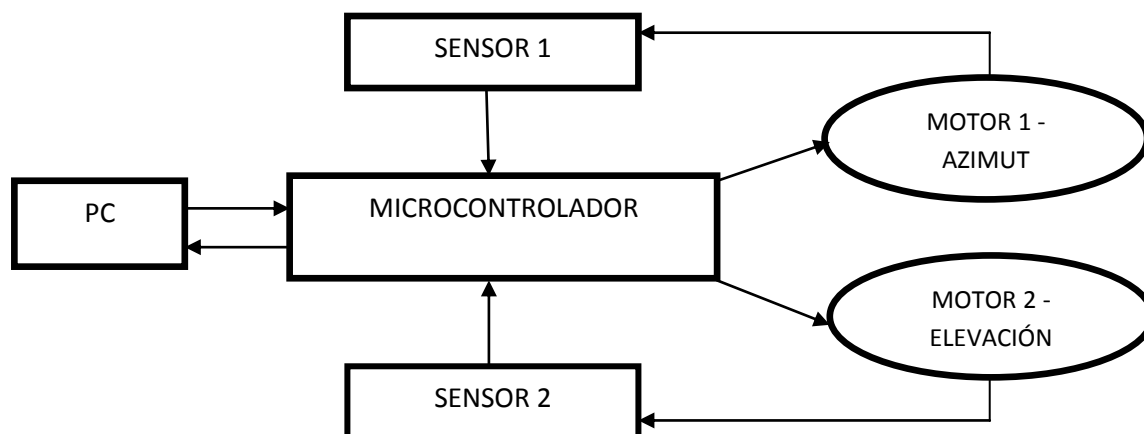
### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN EN AZIMUT Y ELEVACIÓN**

#### **3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN EN AZIMUT Y ELEVACIÓN**

Para el diseño y construcción del sistema de control de posición en dos grados de libertad, azimut y elevación, es necesario considerar el siguiente punto:

- Realizar las adecuaciones, electrónicas y mecánicas, que se ajusten a las peticiones dadas por los ingenieros, jefes o personas interesadas en el desarrollo del proyecto.

Una vez que se ha tenido en cuenta esta consideración, se presenta a continuación el diagrama de bloques del sistema de control de posición en azimut y elevación:



**Figura III.1: Diagrama de Bloques del Sistema de Control en Azimut y Elevación.**

El diagrama de bloques, anteriormente presentado en la Figura III.1, muestra en resumen el esquema general del sistema de control de posición en azimut y elevación. Destacando los siguientes aspectos:

- La interfaz HMI realizada en LabView, la cual permite al usuario controlar, desde la PC, el giro de la antena transmisora en dos grados de libertad. Siendo estos grados de libertad azimut y elevación.
- El microcontrolador PIC18F2550, el cual permite la habilitación de los puertos necesarios para la comunicación entre el prototipo y la computadora. Además de enviar los pulsos necesarios para conseguir el movimiento de los motores paso a paso, que permiten que las antenas giren en los dos grados de libertad, requeridos para la obtención del patrón de radiación.
- Los motores, que como se indica anteriormente, son los encargados del movimiento de las antenas en dos grado de libertad.
- Los sensores, tanto en el motor del movimiento en azimut como en el motor de movimiento en elevación; los cuales permiten conocer si las antenas efectivamente se encuentran girando, y si han llegado a la posición deseada por el usuario.

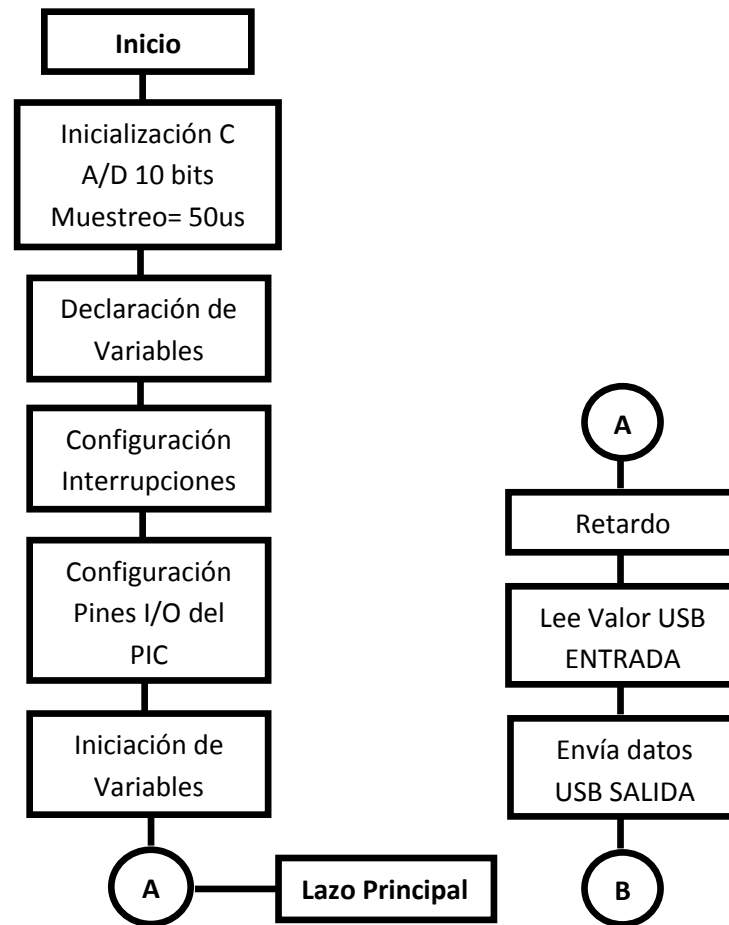
### 3.2 DISEÑO DEL SERVOMECANISMO EN BASE A MICROCONTROLADORES

El microcontrolador PIC18F2550; a través de la información enviada por el usuario, gracias a la interfaz HMI realizada en LabView, es el encargado de realizar el giro de los motores. De esta manera, es posible obtener el movimiento de las antenas de prueba en dos grados de libertad, azimut y elevación.

Además el microcontrolador PIC18F2550, permite la recepción de información hacia la interfaz HMI, a través de los sensores instalados en el prototipo; permitiendo así el monitoreo del giro de las antenas de prueba.

La programación del microcontrolador PIC18F2550, se la realizó en un pequeño programa llamado *PICBASICPRO*, que es un lenguaje de programación de nueva generación que hace más fácil y rápido para el usuario, el programar microcontroladores PIC. El lenguaje Basic es mucho más fácil de leer y escribir que el lenguaje ensamblador, además de que tiene muchas librerías y funciones. Igualmente, como es un compilador real, los programas se ejecutan mucho más rápido y pueden ser mayores que sus equivalentes.

La Figura III.2 muestra el diagrama de flujo del programa realizado dentro del microcontrolador:



**Figura III.2: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador.**

La Figura III.3 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para el inicio del movimiento de los motores paso a paso:

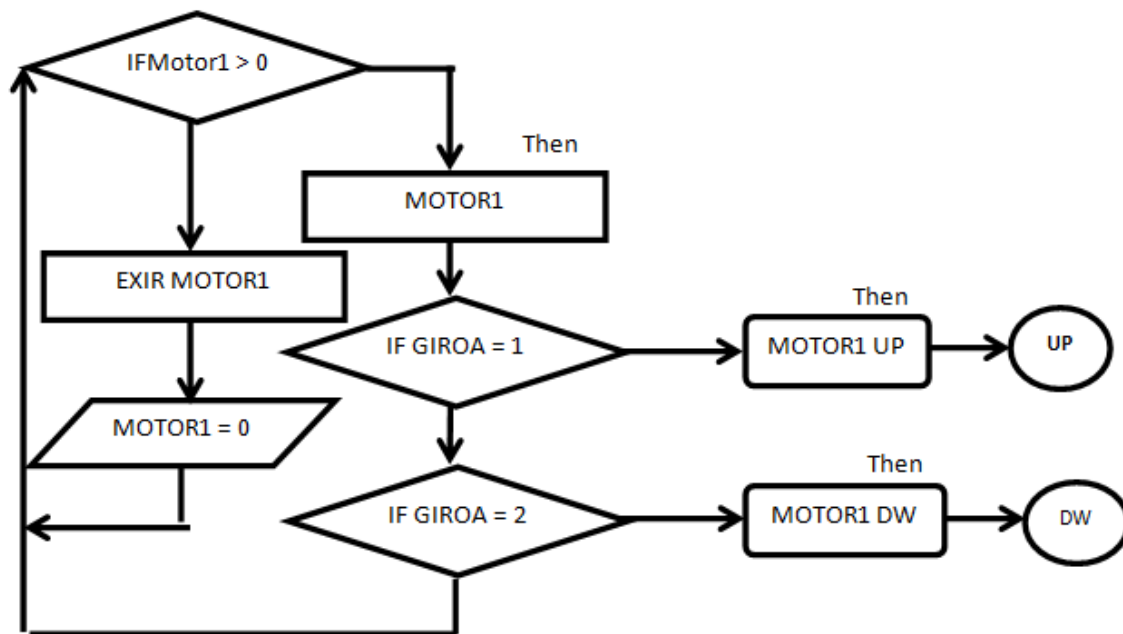


Figura III.3: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Inicio de Programa.

La Figura III.4 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para el movimiento de los motores paso a paso en modo manual:

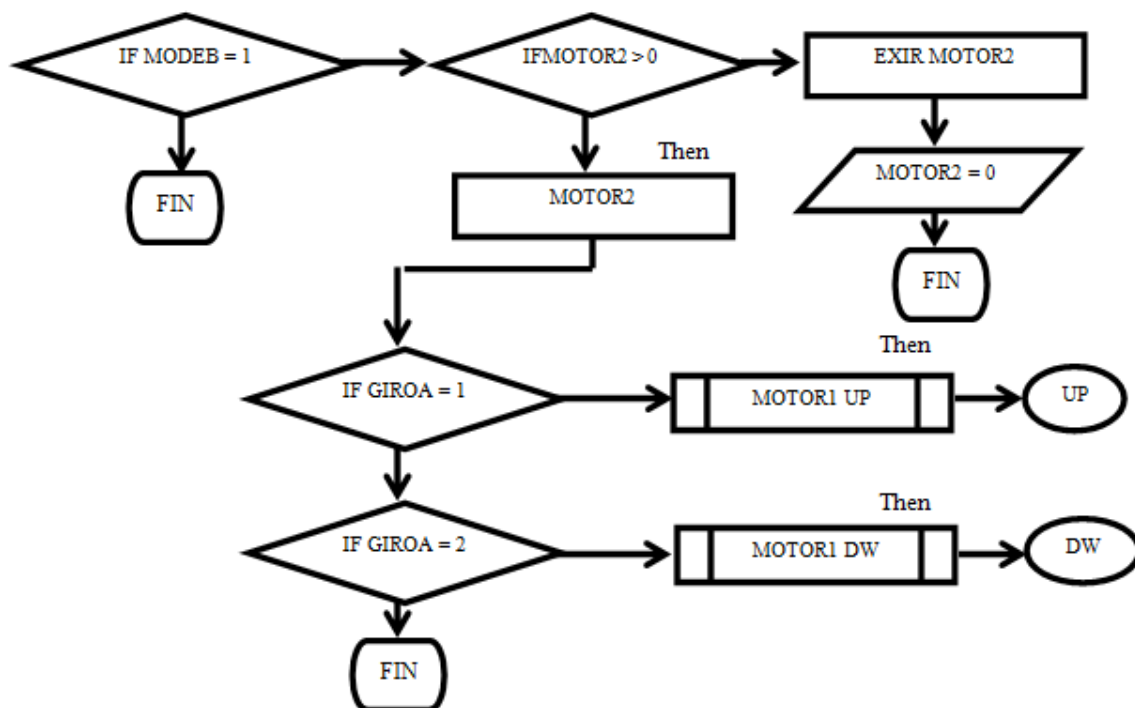
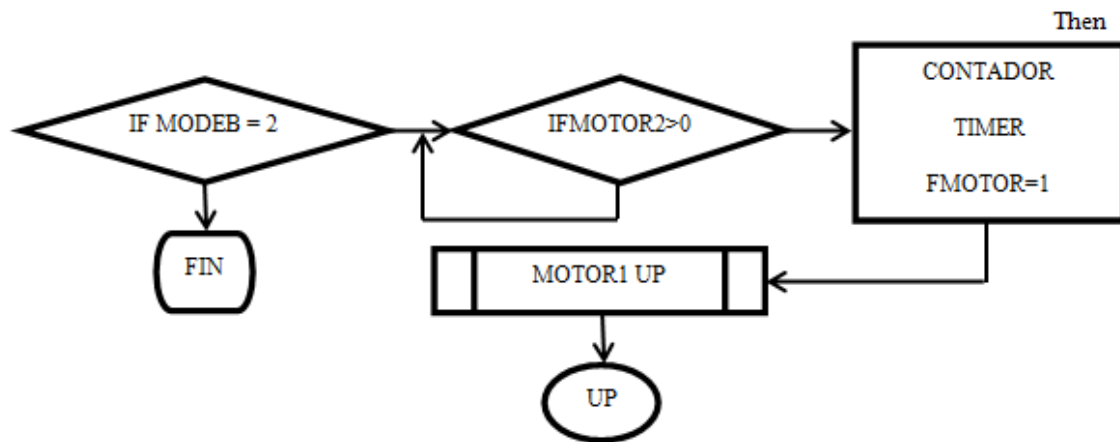


Figura III.4: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Modo Manual.

La Figura III.5 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para el movimiento de los motores paso a paso en modo automático:



**Figura III.5: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Modo Automático.**

La Figura III.6 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para el movimiento de los motores paso a paso en una resolución de  $-45^\circ$  a  $0^\circ$  en elevación:

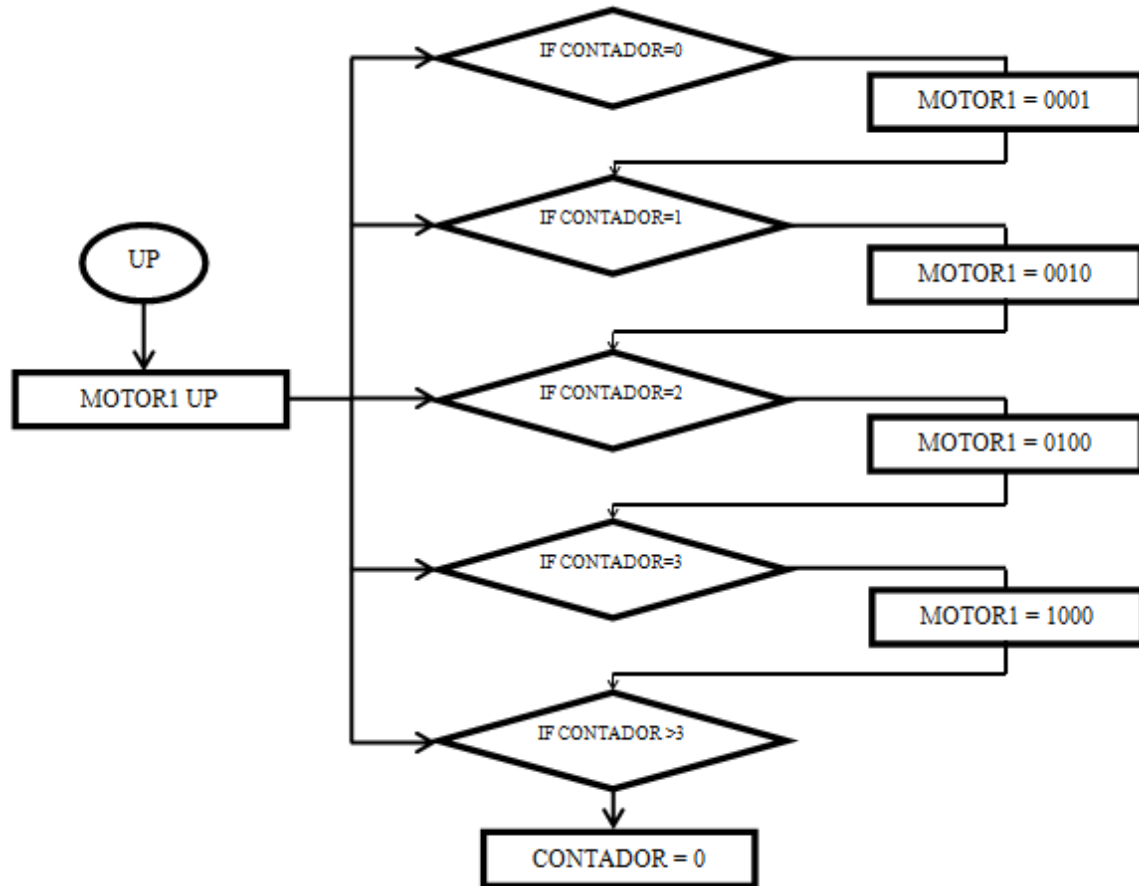
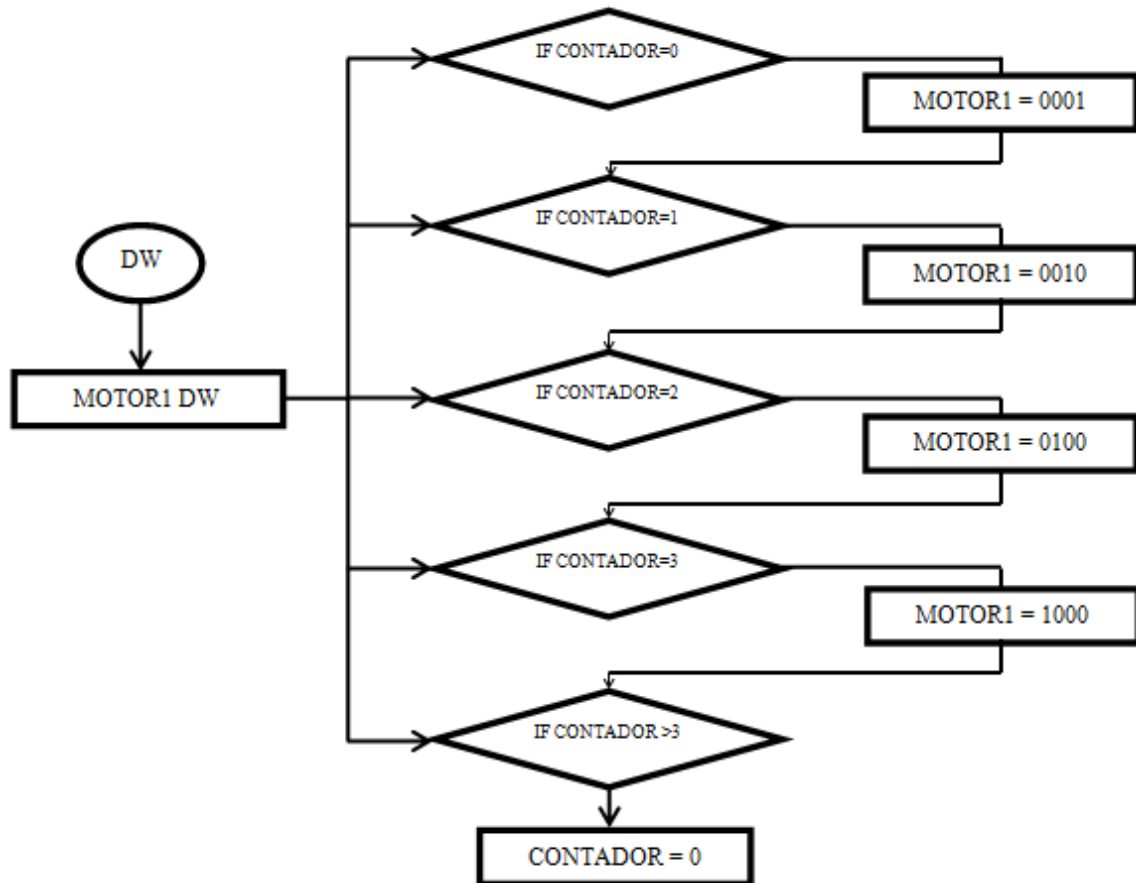


Figura III.6: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Resolución de -45° a 0° en Elevación.

La Figura III.7 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para el movimiento de los motores paso a paso en una resolución de 0° a 45° en elevación:





**Figura III.7: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Resolución de 0° a 45° en Elevación.**

La Figura III.8 muestra el diagrama de flujo del programa realizado para el movimiento de los motores paso a paso en una resolución de 0° a 360° en azimut:

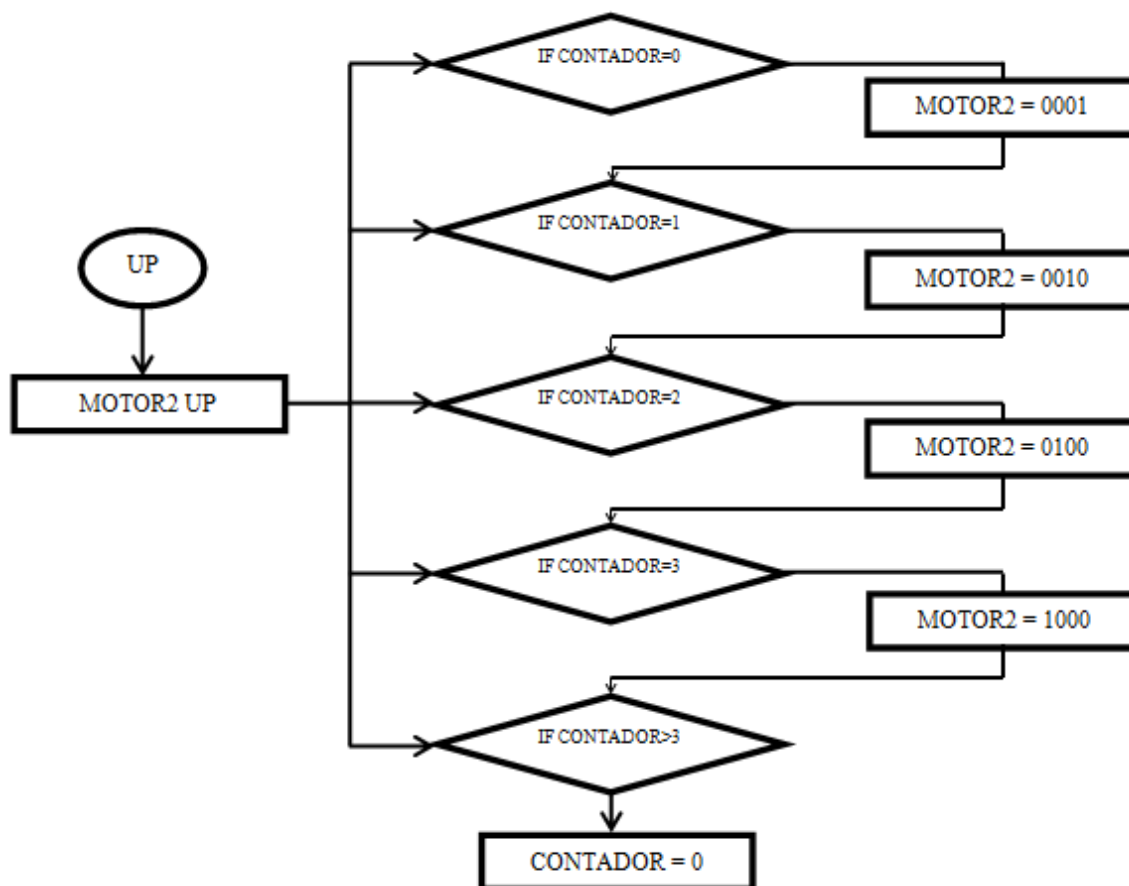


Figura III.8: Diagrama de Flujo - Programa Microcontrolador – Resolución de 0° a 360° en Azimut.

La programación detallada del microcontrolador PIC18F2550, se encuentra en los anexos.

### 3.3 SIMULACIÓN DEL SERVOMECANISMO MEDIANTE SOFTWARE

La simulación del servomecanismo mediante software es una manera de comprobar el correcto funcionamiento del programa grabado en el microcontrolador, antes de fabricar la tarjeta definitiva.

Para ello se utilizó la herramienta de simulación *PROTEUS*, el cual es una compilación de programas de diseño y simulación electrónica, desarrollado por Labcenter Electronics; que permite diseñar el circuito que se desee, con componentes muy variados, que pueden ir desde una simple resistencia hasta algún microprocesador o

microcontrolador, incluyendo entre estos a fuentes de alimentación, generadores de señales y muchas otras prestaciones.

A continuación se presenta la gráfica de la simulación del funcionamiento del microcontrolador:

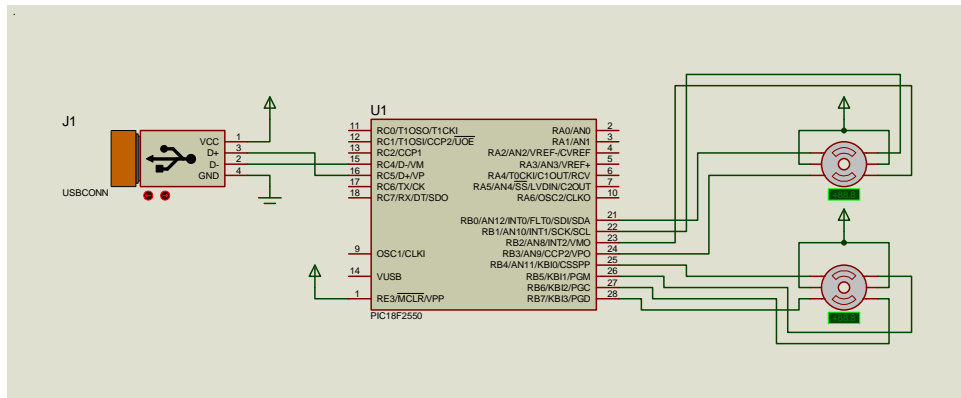


Figura III.9: Simulación del Funcionamiento del Microcontrolador.

### 3.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA INTERFAZ HMI

El diseño y la construcción de la interfaz HMI, tanto para el control del movimiento de las antenas de prueba, en dos grados de libertad, como para la adquisición del dato de potencia proveniente del analizador de espectros, es la parte esencial de este proyecto; ya que mediante estas interacciones hombre – máquina es posible el control y monitoreo del sistema de control, implementado a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

**3.4.1 Comunicación PC con Analizador de Cables y Antenas.** La comunicación entre la PC y el Analizador de Cables y Antenas es establecida mediante programación remota a través de la interface USB, mediante la transmisión al instrumento de comandos SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation); utilizando GUIDE de MatLab.

El consorcio SCPI fue una organización, dentro de la cual sus miembros compartieron un sólo compromiso de desarrollar un lenguaje de interfaz común entre las computadoras y los instrumentos de prueba. El Estándar SCPI está construido en base al estándar IEEE – 488.2 de Códigos y Formatos. Este requiere conformidad al IEEE – 488.2,

pero es un estándar de software puro. La sintaxis es texto ASCII, y por lo tanto puede ser adjuntado a cualquier lenguaje de prueba informático, tal como BASIC, C o C++. También puede ser usado con Entornos de Prueba de Aplicaciones como LabWindows/CVI, LabVIEW, MatLab, Microsoft Visual Studio, o Agilent VEE. SCPI es independiente del hardware y sus cadenas de comandos pueden ser enviados sobre cualquier interface de instrumento. Trabaja igual de bien sobre GPIB, RS – 232, USB o redes LAN [39].

La arquitectura USB (Universal Serial Bus) es un estándar de red de alto rendimiento, que es considerado “plug and play” compatible. El software del driver del USB es detectado y configurado automáticamente por el sistema operativo del equipo al cual está conectado el bus.

El Analizador de Cables y Antenas cumple con el estándar USB 2.0, que es un dispositivo USB de alta velocidad que soporta tasas de hasta 10 Mbps con las siguientes restricciones:

- Una red USB puede soportar hasta 127 dispositivos.
- El largo máximo de un cable USB entre dispositivos activos es de 5 metros (para USB 2.0) y de 3 metros (para USB 1.0) [40].

Para que el control USB remoto sea posible, la PC controladora necesita tener instalada una versión de VISA que soporte dispositivos USBTMC (USB Test and Measurement Class).

VISA (Virtual Instrument Software) es un estándar para configurar, programar y solucionar problemas de sistemas de instrumentación que comprenden GPIB, VXI, PXI, Serial, Ethernet, y/o interfaces USB. VISA proporciona la interface de programación entre el hardware y el ambiente de desarrollo como LabWindows/CVI, y Measurement Studio para Microsoft Visual Studio [41].

La implementación del estándar VISA I/O que se utiliza dentro de la aplicación es el NI-VISA, perteneciente a National Instruments.

**3.4.2 Control y Monitoreo de Servomecanismos.** El lenguaje de programación que se utilizó para el control y monitoreo del giro de las antenas en dos grados de libertad, azimut y elevación, para el prototipo SCAE (Sistema de Control en Azimut y Elevación), es ***LABVIEW***.

LabView es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante instrumentación virtual. Es un entorno de programación gráfica que permite desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen como un diagrama de flujo. Ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.

El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Se denomina instrumentos virtuales debido a su apariencia e imitación a instrumentos físicos.

Este tipo de lenguaje de programación tiene dos tipos de paneles o pantallas:

- **Pantalla/Panel Frontal:** Donde se encuentra controles e indicadores. Los controles son texto, perillas, botones de acción y otros dispositivos de entrada mientras que los indicadores son gráficas, led y otros despliegues.

- **Pantalla/Panel de Programación:** Donde se agrega códigos utilizando los instrumentos virtuales y estructuras para controlar los objetos del panel frontal.

A continuación se muestra la pantalla del ambiente de desarrollo LabView:



Figura III.10: Ambiente de Desarrollo MATLAB\*.

Para la comunicación con hardware LabView utiliza adquisición de datos, dispositivos de control de movimiento y visión, instrumentos GPIB, PXI, VXI, RS-232 y RS-485.

La interfaz HMI realizada en LabView permite al usuario establecer los grados en los cuales se desea que el prototipo SCAE realice los movimientos, tanto en azimut como en elevación. Además de permitir sensar si el prototipo efectivamente se encuentra girando o no.

La interfaz HMI se presenta como la siguiente ventana gráfica al usuario:

---

\* <http://www.programaswarez.com/appz-programas-gratis/259794-labview-2009-full-todos-los-modulos-y-toolkits-manual-espanol.html>

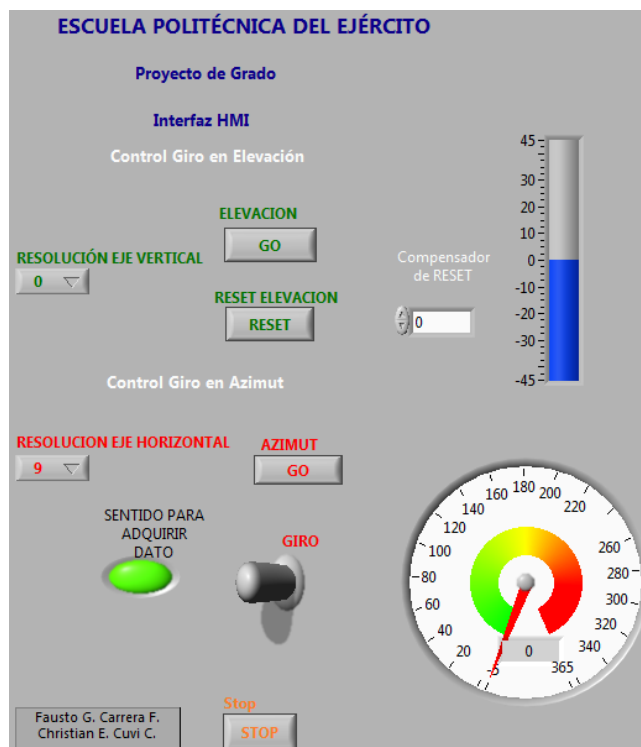





Figura III.11: Interfaz HMI Desarrollada en LABVIEW.

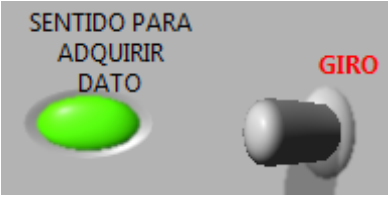
El usuario, tanto en los controles de azimut como en los controles de elevación, deberá escoger el valor de grados, a los cuales se desea que el prototipo SCAE gire, a

través de las siguientes selecciones,  para azimut y

 para elevación. Posteriormente se debe presionar el botón

 para azimut y el botón  para elevación, respectivamente; con lo cual se envía la orden de movimiento a los respectivos motores paso a paso.

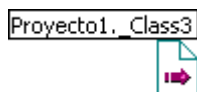
Para el movimiento en azimut hay que tener en cuenta el sentido de giro en el cual

se encuentra el prototipo SCAE, a través del botón .





La Figura III.13 muestra la Clase SUB VI, la cual permite crear la referencia de la librería dinámica, que sirve para la comunicación entre el programa y el micro-controlador.



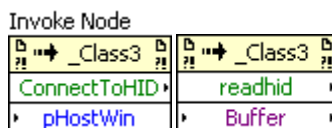
**Figura III.13: Clase SubVI - Creación de Referencias con Librerías Dinámicas.**

La Figura III.14 muestra la subrutina Automation OPEN, la cual permite abrir la librería dinámica con la referencia creada.



**Figura III.14: Subrutina Automation Open.**

La Figura III.15 muestra la subrutina Invoke Node, la cual muestra los parámetros de entrada y salida que contiene la librería dinámica.



**Figura III.15: Parámetros de Entrada y Salida de la Librería Dinámica.**

La Figura III.16 muestra la subrutina que contiene el procedimiento para calcular el número de pasos (pasos/grados de resolución del motor) de giro de los motores paso a paso, tanto en azimut como en elevación. Además de establecer el nivel de referencia “Cero” para la utilización del Reset.

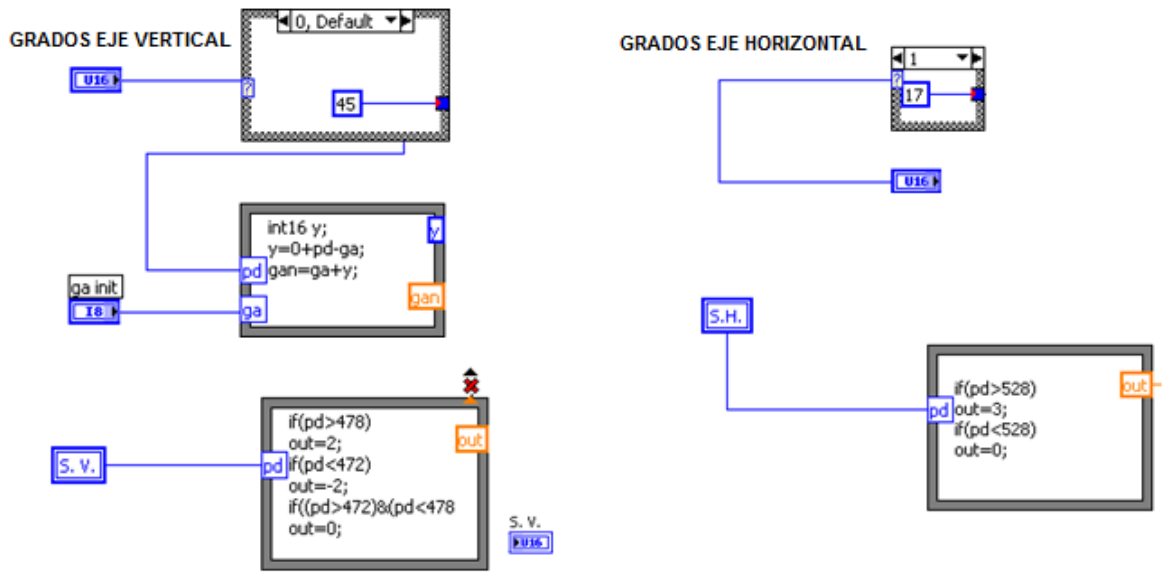


Figura III.16: Subrutinas para el Cálculo del Número de Pasos (Grados de Giro) – Fijación del Nivel de Referencia “Cero”.

La Figura III.17 muestra las subrutinas necesarias para enviar datos hacia el microcontrolador, mediante el puerto USB.

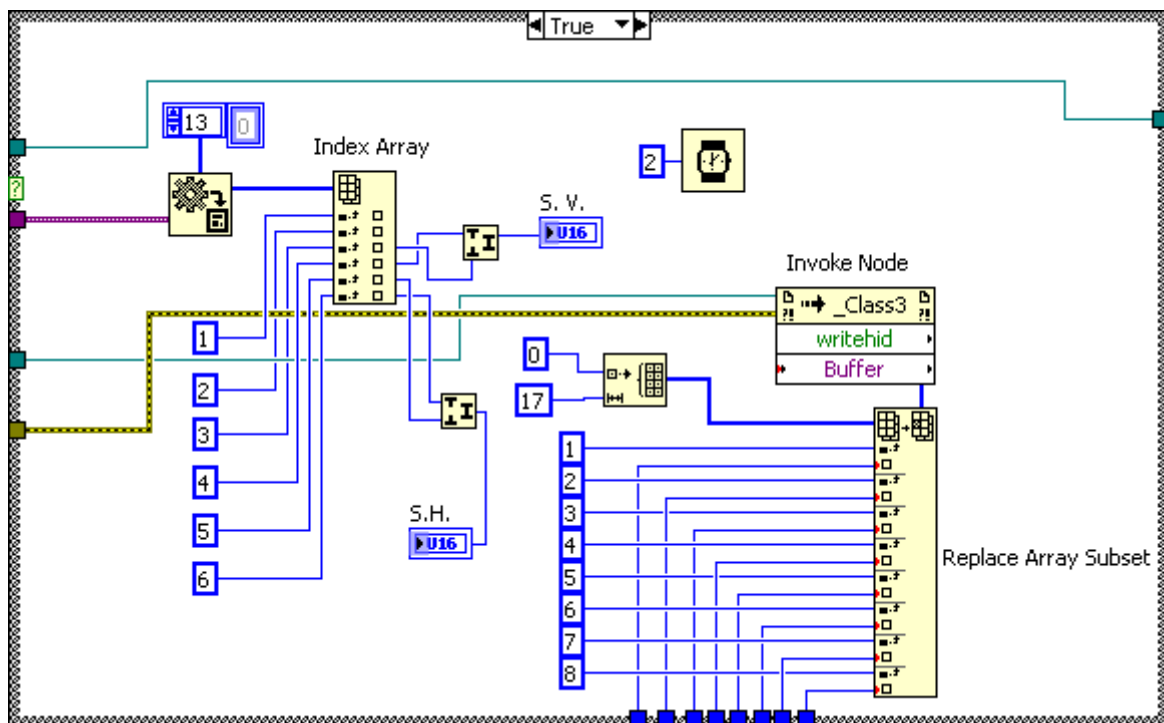


Figura III.17 Subrutinas para la Comunicación Microcontrolador – Puerto USB.



### 3.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MINITORRES DE SUSTENTACIÓN

La minitorre de sustentación es el lugar donde se ubican las antenas de prueba, además de ser el aparato que permite el giro en dos grados de libertad, de dichas antenas de prueba.

El prototipo SCAE (Sistema de Control en Azimut y Elevación) está formado por 3 etapas:

- **Base de Sustentación:** Lugar donde se encuentra ubicada la tarjeta controladora de los motores paso a paso, que permiten el movimiento en dos grados de libertad. Además contiene al transformador de 110 [V] a 12 [V], junto con la fuente de alimentación y el motor paso a paso que permite el giro en azimut. Como lo indica la siguiente figura:



a) Base de Sustentación



b) Tarjeta Controladora - Fuente de Alimentación con Transformador - Motor Paso a Paso Giro en Azimut

Figura III.19: Base de Sustentación.

- **Estructura de Elongación:** Estructura que permite darle altura al prototipo SCAE. Está formada por dos barras, una hueca con un diámetro de 7 [cm], que recubre a una barra sólida, de 1.4 [cm], la cual es la que permite el giro de 360° en azimut. Para evitar que la barra solida interna sufra algún tipo de vibración en el giro, esta se encuentra sujeta por dos rulimanes, uno de 6.8 [cm] de diámetro externo y el otro de 1.4 [cm] de diámetro interno. Como lo indica la siguiente figura:



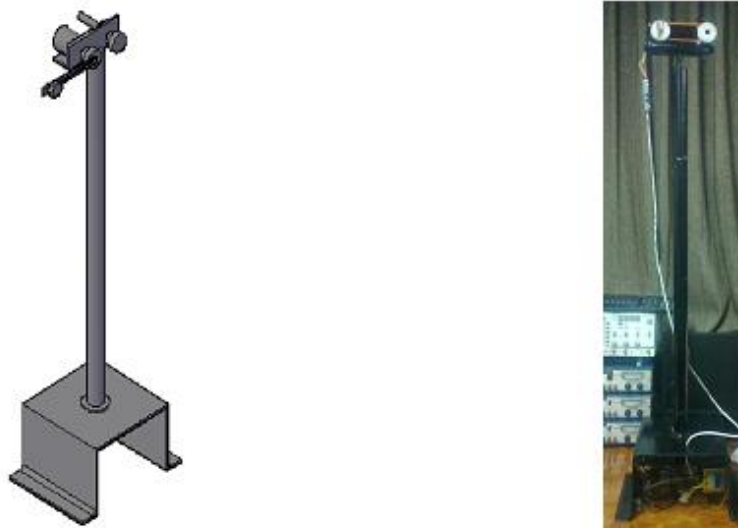
**Figura III.20: Estructura de Elongación.**

▪ **Base de Sustentación de Motor en Elevación:** Estructura metálica en forma de L, la cual sujeta al motor a pasos (para más detalle acerca de los motores paso a paso, referirse a los anexos) que permite el giro en elevación. Contiene los rodamientos y la banda circular dentada, que son la estructura física y mecánica que permite el giro de la antena en elevación. Los rodamientos tienen un diámetro externo de 4.6 [cm] y un diámetro interno, donde se adhiere con la banda dentada, de 4.1 [cm]. Finalmente la base de suspensión de la antena, donde se coloca las diferentes antenas de prueba. Como lo indica la siguiente figura:



**Figura III.21: Base de Sustentación de Motor en Elevación.**

Finalmente, la siguiente gráfica muestra a la minitorre de sustentación completamente armada y lista para su uso:



a) Minitorre de Sustentación - Diseño en Autocad.    b) Minitorre de Sustentación - Diseño en Vida Real.

**Figura III.22: Minitorre de Sustentación Prototipo SCAE.**

### 3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL SERVOMECANISMO

Para la implementación del servomecanismo, se diseñaron dos tarjetas. Una tarjeta para permitir la comunicación entre la PC y el Microcontrolador y otra para permitir la manipulación de los motores, obteniendo el giro en dos grados de libertad, a través de la interfaz HMI desarrollada en LabView.

**3.6.1 Comunicación PC con Microcontrolador.** Para poder establecer entre la PC y el microcontrolador es necesario el diseño de una tarjeta. La programación se realiza en el programa *PICBASICPRO*, que se menciona anteriormente, y es mucho más amigable para leer y escribir que el lenguaje ensamblador Microchip.

La comunicación se realiza mediante el puerto USB, para lo cual se utiliza como fuente de alimentación a los 5 [V] procedentes del puerto USB; ya que el consumo de corriente está condicionado a la potencia utilizada por el micro-controlador. La Figura

III.23 muestra tanto el diagrama de bloques como el diagrama de la tarjeta, que permiten establecer esta comunicación.

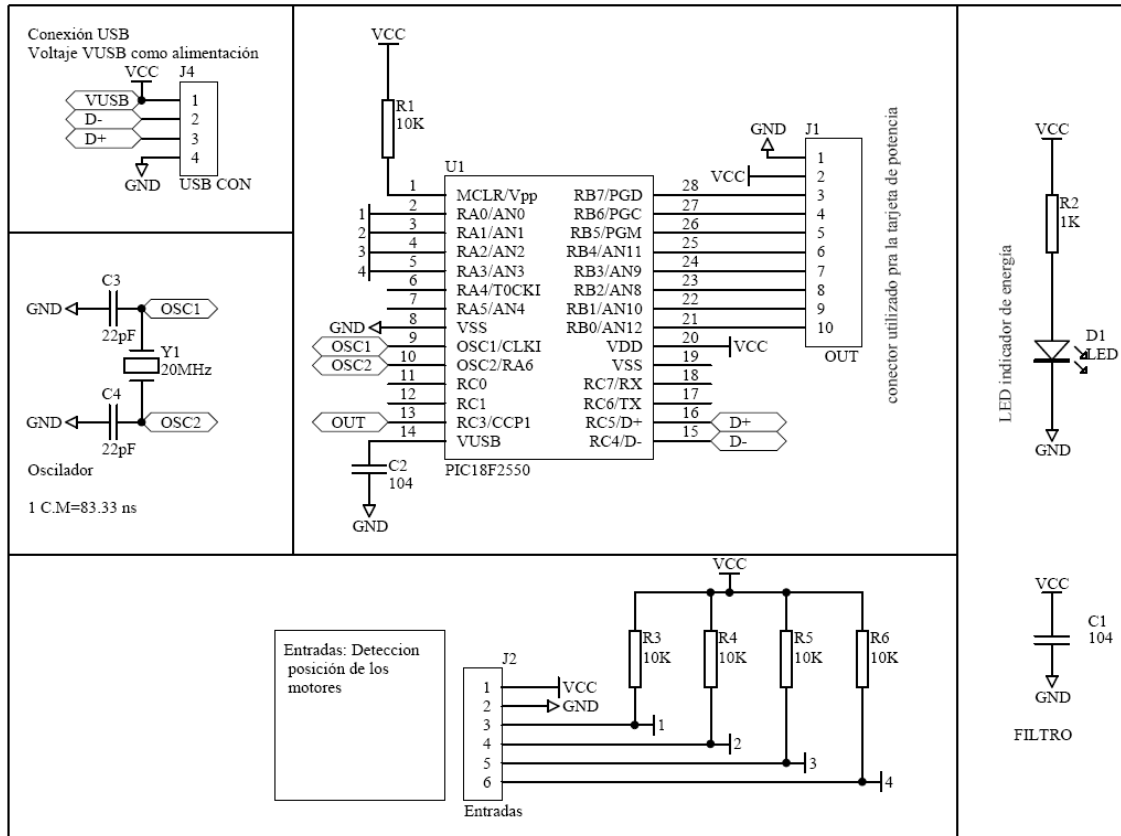


Figura III.23: Diagrama de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador.

La Figura III.24 muestra diagrama de la tarjeta, realizado en *Proteus*, que permite la comunicación entre la PC y el microcontrolador:

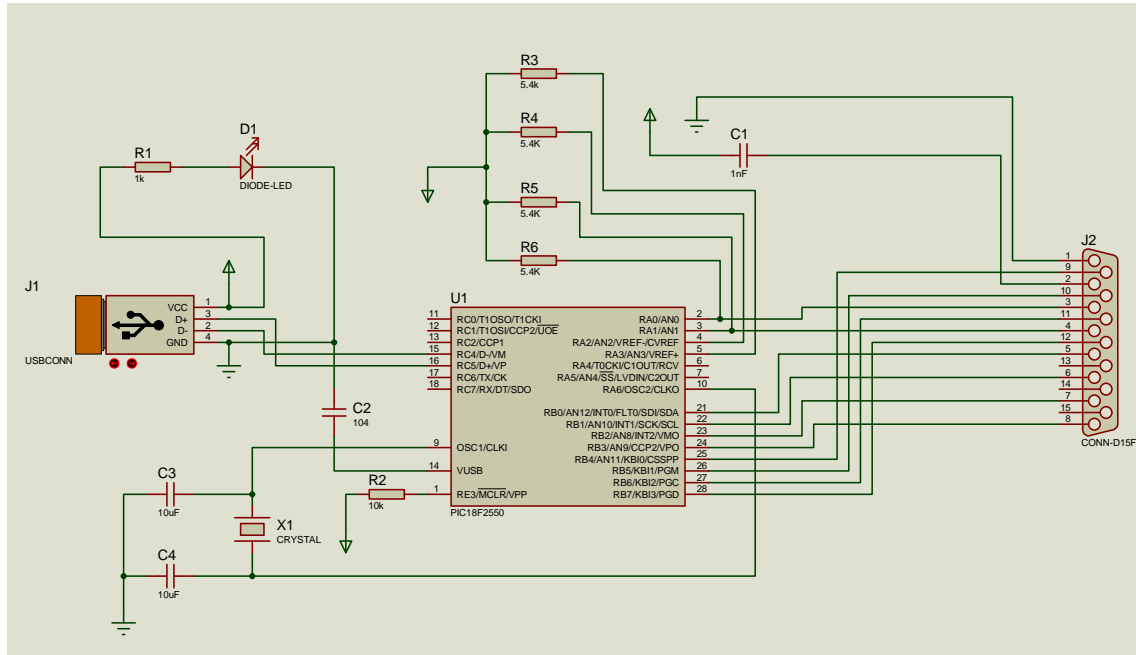


Figura III.24: Diagrama de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador - Proteus.

La Figura III.25 muestra la posición de cada uno de los elementos pertenecientes a la tarjeta realizada:

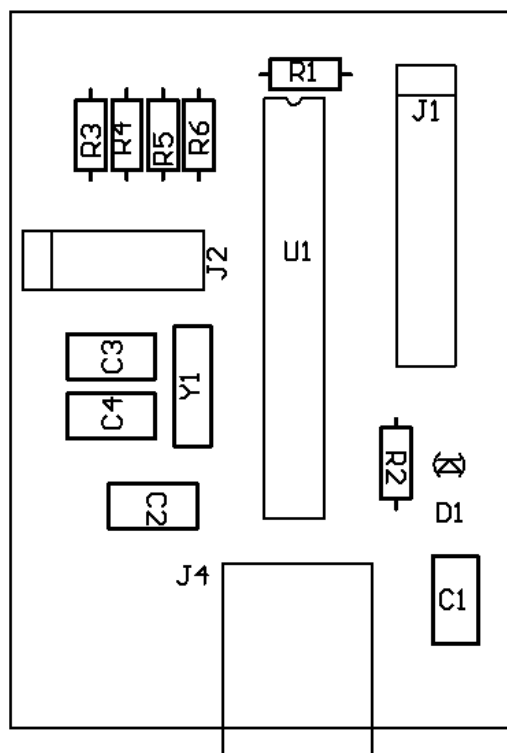
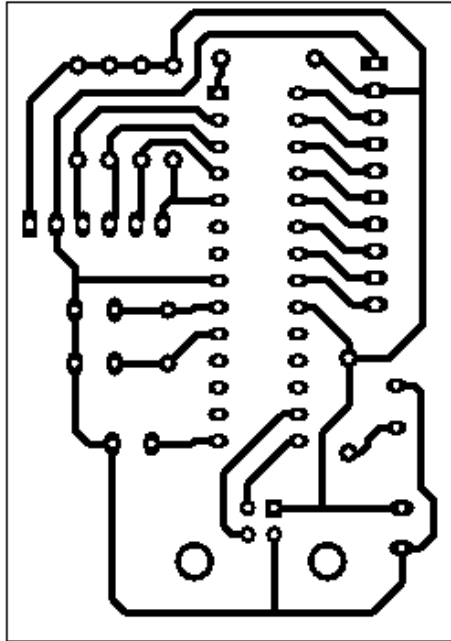


Figura III.25: Posición Elementos Dentro de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador.



Mientras que la Figura III.26 muestra las pistas de la tarjeta diseñada:



**Figura III.26: Pistas de la Tarjeta - Comunicación PC y Microcontrolador.**

Finalmente, la Figura III.27 muestra la tarjeta final implementada para establecer la comunicación entre la PC y el Microcontrolador:



**Figura III.27: Tarjeta Implementada – Comunicación PC y Microcontrolador.**

**3.6.2 Control de los Motores Paso a Paso:** Para poder controlar las bobinas de los motores a pasos se utiliza transistores bipolares TIP110 (transistor NPN), los cuales operan en la región de corte y saturación, es decir similar a un interruptor.

Además de los transistores, existe una fuente de voltaje (mediante el regulador de voltaje LM7805 y un transformador de 110 [V] a 12 [V]), que permite dar energía a los motores; ya que la corriente necesitada por los motores es 0.8 [A] (datos nominales del motor) y este valor de corriente no puede ser proporcionada por la interfaz USB. La Figura III.28 muestra tanto el diagrama de bloques como el diagrama de la tarjeta, que permiten el control de los motores paso a paso, para obtener el giro de las antenas de prueba en dos grados de libertad.

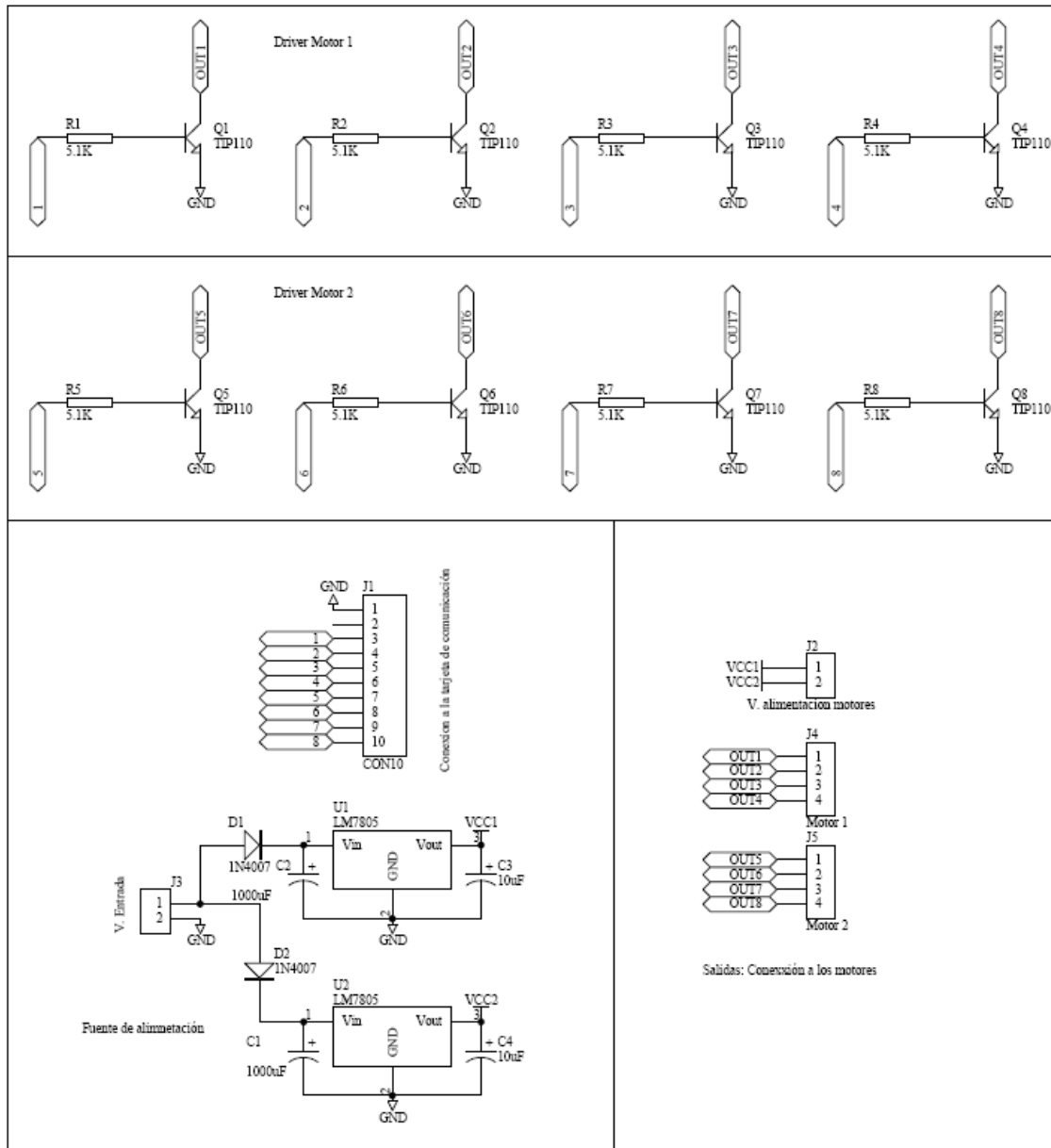
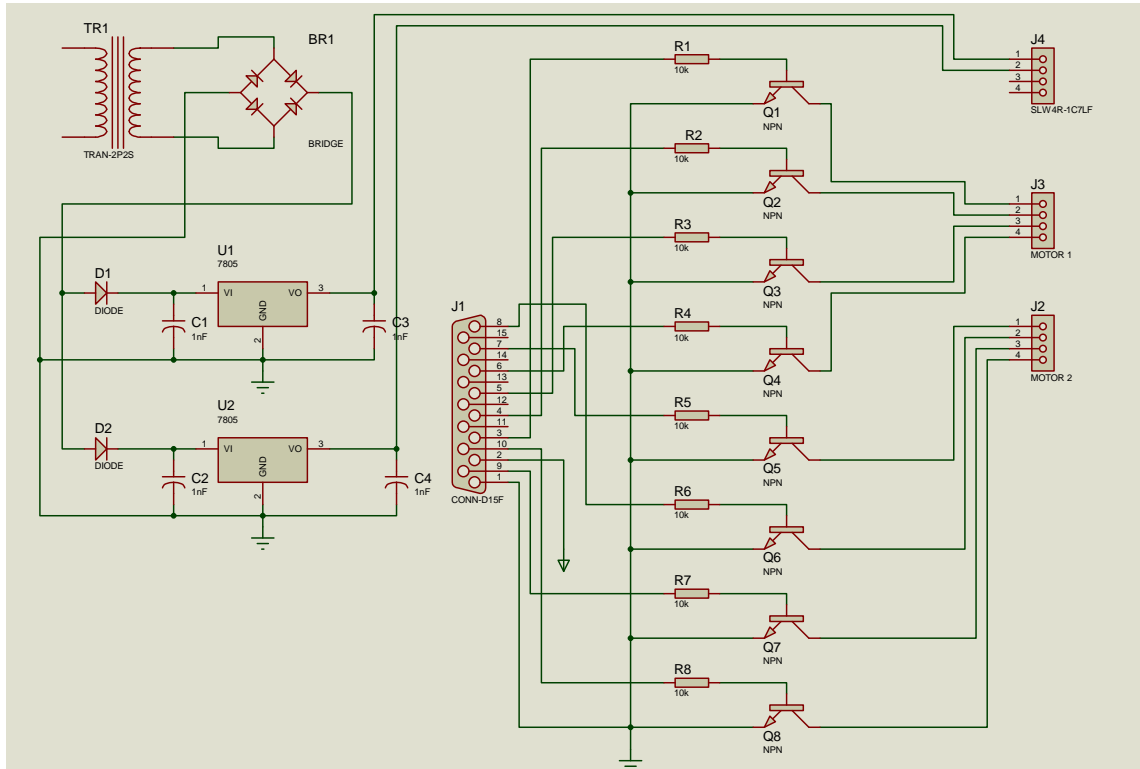


Figura III.28: Diagrama de la Tarjeta - Control Motores Paso a Paso.

La Figura III.29 muestra diagrama de la tarjeta, realizado en *Proteus*, que permite el control de los motores paso a paso:



**Figura III.29: Diagrama de la Tarjeta - Control Motores Paso a Paso - Proteus.**

La Figura III.30 muestra la posición de cada uno de los elementos pertenecientes a la tarjeta realizada:

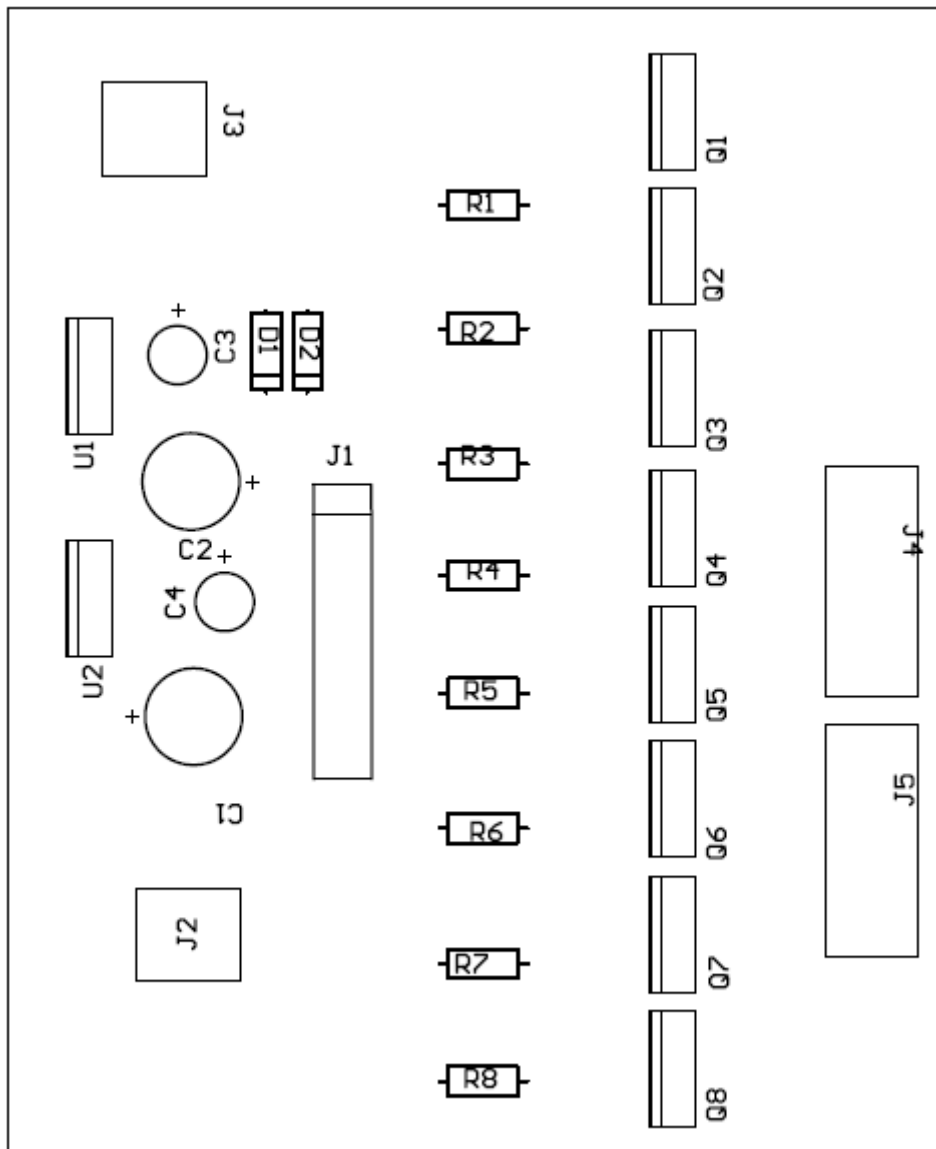
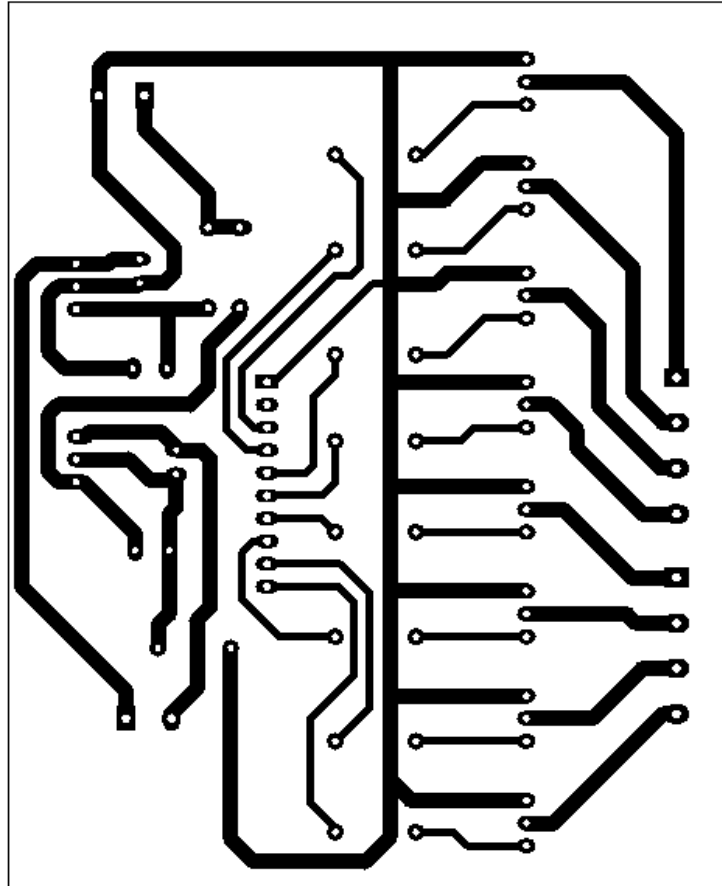


Figura III.30: Posición Elementos Dentro de la Tarjeta – Control Motores Paso a Paso.

Mientras que la Figura III.31 muestra las pistas de la tarjeta diseñada:



**Figura III.31: Pistas de la Tarjeta – Control Motores Paso a Paso.**

Hay que tener presente la etapa de acondicionamiento de voltaje. Esta etapa consta de un circuito que integra un regulador de voltaje LM7805, que da un voltaje de salida de 5 [V]. Este voltaje necesario para alimentar las salidas del microcontrolador 18F2550.

Este acondicionamiento es necesario debido a que el transformador utilizado para la fuente de alimentación brinda un voltaje de salida de 12 [V]. Este valor de voltaje causaría que el microcontrolador se quemara.

A continuación se muestra la figura correspondiente a la etapa de acondicionamiento de voltaje:

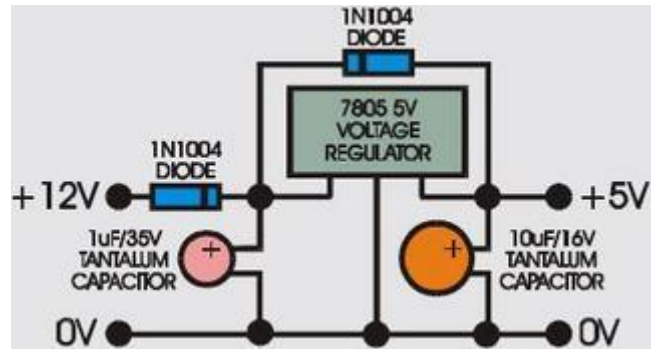


Figura III.32: Etapa de Acondicionamiento de Voltaje [42].

Finalmente, la Figura III.33 muestra la tarjeta final implementada para poder controlar los motores paso a paso y obtener el giro de las antenas de prueba en dos grados de libertad:



Figura III.33: Tarjeta Implementada – Control Motores Paso a Paso.

## **CAPÍTULO IV**

### **PRUEBAS Y MEDICIONES**

#### **4.1 OBTENCIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE ANTENAS MEDIANTE SOFTWARE DE SIMULACIÓN**

La obtención del patrón de radiación de las antenas se realiza mediante una interfaz HMI realizada con MATLAB, la cual permite la comunicación entre la PC y el Analizador de Espectros Anritsu S362E.

Esta interfaz permitirá al usuario establecer, en el analizador de espectros, los valores de frecuencia iniciales como finales; adquirir el dato de potencia que presenta el analizador de espectros; archivar dicho dato y finalmente procesar esta información; para posteriormente poder graficar el patrón de radiación.

La interfaz HMI se presenta como la siguiente ventana gráfica al usuario:





Figura IV.1: Interfaz HMI Desarrollada en MATLAB.

El usuario deberá ingresar el valor deseado de las diferentes frecuencias dentro de las cajas de texto correspondientes **Frecuencia Inicio:**  MHz y **Frecuencia Final:**  MHz, para finalmente presionar el botón **Establecer Frecuencia**, el cual establecerá dichas frecuencias en el analizador de espectros.

Si la operación carece de fallas, es decir el usuario ingresó valores válidos dentro de las cajas de texto y la conexión con el equipo está funcionando de una manera correcta, la interfaz HMI presentará el siguiente mensaje:

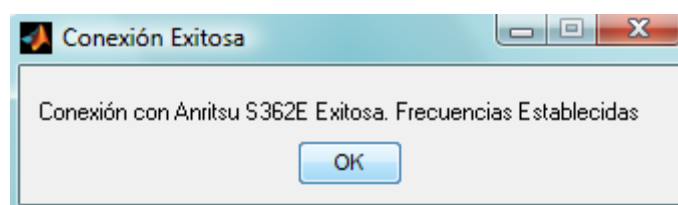
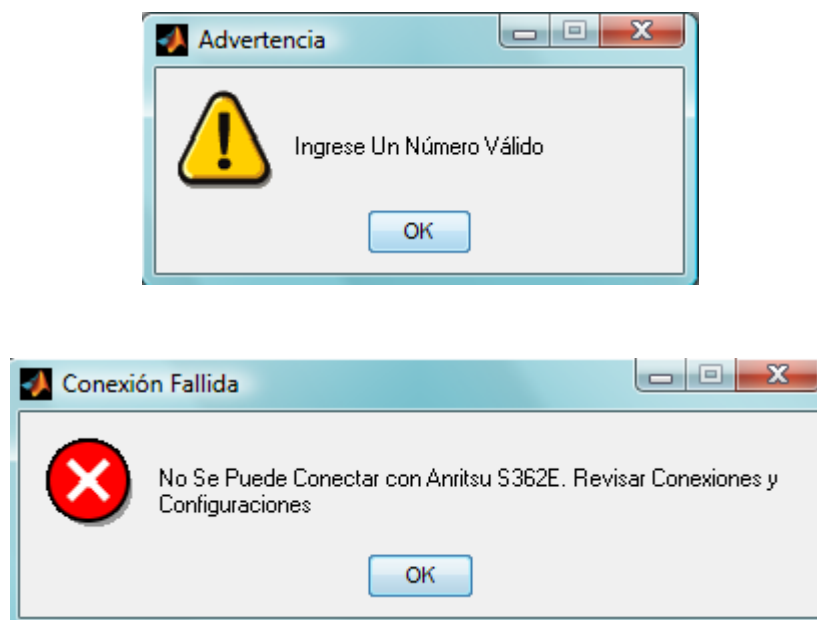


Figura IV.2: Mensaje de Conexión Exitosa.

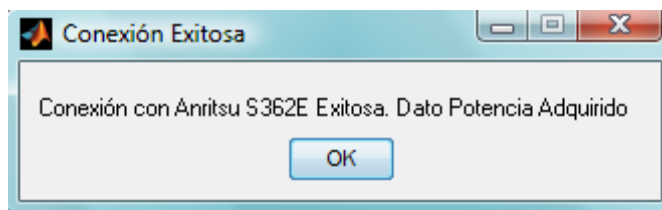
Caso contrario, si existió algún problema de conexión, o si los valores ingresados en las cajas de texto no son correctos, la interfaz HMI presentará cualquiera de los siguientes mensajes:



**Figura IV.3: Mensajes de Advertencia y Error.**

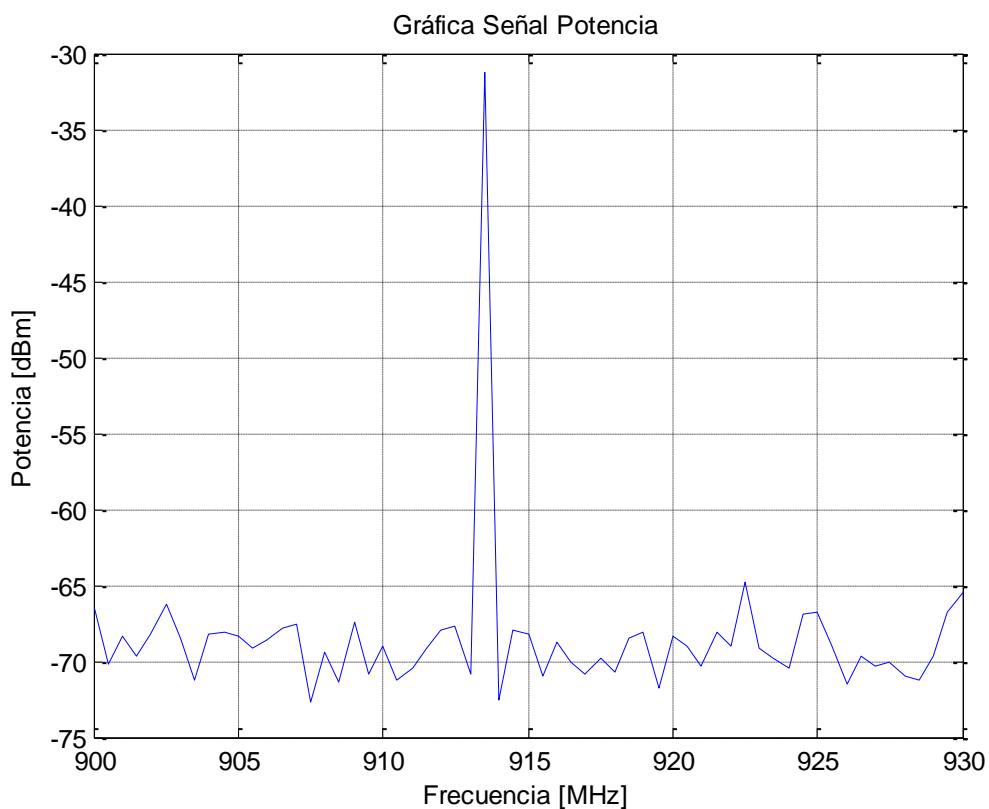
Una vez establecidas correctamente las frecuencias, el usuario deberá escoger el valor de grados cada cuanto se desee que se tomen los valores de potencia (resolución), mediante la siguiente lista de selección **Resolución** 9 **Grados**, una vez realizada esta selección, el usuario deberá presionar el botón **Adquirir Dato Potencia**, con lo cual el programa adquirirá y almacenará dicho valor y lo presentara al usuario en pantalla para visualización a través de la caja de texto correspondiente **Potencia:**  **dBm**. De igual manera el usuario cuenta con la caja de texto **Posición Actual:**  **Grados**, la cual indica la posición, en azimut, del prototipo SCAE en el momento de la adquisición del dato de potencia.

Si la adquisición del dato de potencia fue exitosa, la interfaz HMI presentará el siguiente mensaje:



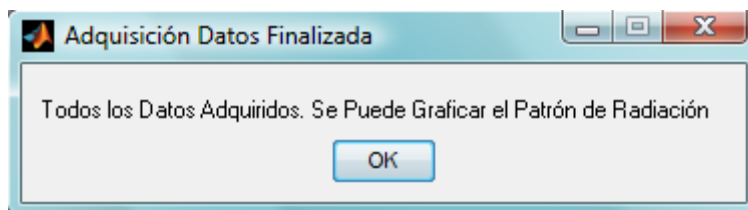
**Figura IV.4: Mensaje de Adquisición de Dato Exitosa.**

De igual manera, cada vez que se adquiriera un dato de potencia, se mostrará en pantalla la señal de potencia proveniente del analizador de espectros, correspondiente a dicho dato de potencia. Como se indica en la siguiente figura:



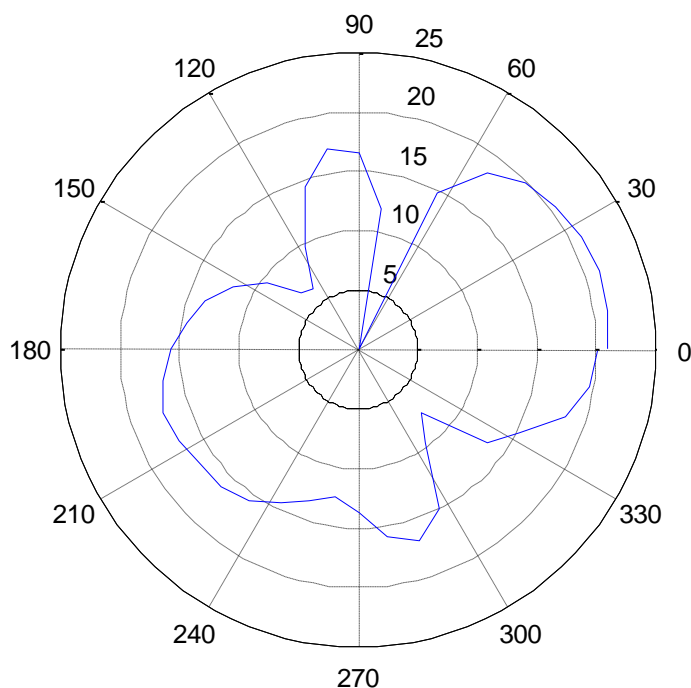
**Figura IV.5: Gráfica Señal de Potencia – Obtenida del Analizador de Espectros Anritsu S362E.**

Cuando todos los valores de potencia necesarios, para graficar el patrón de radiación, hayan sido adquiridos, la interfaz HMI presentará el siguiente mensaje:



**Figura IV.6: Mensaje de Adquisición de Dato Finalizada.**

De esta manera el usuario estará en capacidad de presionar el botón **Graficar Patrón Radiación**, con lo cual la interfaz HMI presentará en pantalla el patrón de radiación, de la siguiente manera:



**Figura IV.7: Patrón de Radiación Obtenido Mediante Interfaz HMI.**

De igual manera, el usuario dispondrá tanto del botón **Limpiar**, el cual permite borrar las variables y los valores de las frecuencias ingresadas en las cajas de texto, borrar la variable y el valor de potencia adquirido, desde el analizador de espectros, que fue presentado en pantalla; y del botón **Salir**, el cual finalizara y cerrará el programa que contiene a la interfaz HMI.

## 4.2 CONTROLES DE GIRO EN AZIMUT Y ELEVACIÓN

Los controles de giro, tanto en azimut y elevación, llevados a cabo gracias a la interfaz HMI desarrollada en LabView, permitirán, a la antena de prueba moverse, en dos grados de libertad. De esta manera será posible la obtención del patrón de radiación de dicha antena de prueba.

El control de giro en azimut permite que la antena gire en un rango de  $0^\circ$  -  $360^\circ$ , en intervalos de  $9^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ .

El control de giro en elevación permite que la antena se coloque en las siguientes posiciones:  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$  y  $-45^\circ$ .

De esta manera es posible obtener valores de potencia, en cada uno de los puntos resultantes de combinar estas opciones de giro, tanto en azimut como en elevación.

### 4.2.1 Medición de Posicionamiento de la Antena en la Minitorre en Azimut

La minitorre de azimut es la que permite el giro de la antena de prueba, dentro del rango de  $0^\circ$  -  $360^\circ$ , en los intervalos anteriormente mencionados.

Esta minitorre es la encargada del barrido y movimiento en el eje horizontal de la antena de prueba. Permitiendo así obtener todos los puntos y valores necesarios para la obtención del patrón de radiación.

Después de la realización de pruebas de posicionamiento de la antena en la minitorre de azimut, las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran los resultados de posicionamiento en azimut, cuando se estuvo trabajando sin la antena de prueba:

▪ Prueba No. 1 - Resoluciones\* de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>9</b>	10	<b>99</b>	100	<b>189</b>	188	<b>279</b>	278
<b>18</b>	20	<b>108</b>	109	<b>198</b>	198	<b>288</b>	287
<b>27</b>	28	<b>117</b>	117	<b>207</b>	206	<b>297</b>	295
<b>36</b>	37	<b>126</b>	127	<b>216</b>	215	<b>306</b>	303
<b>45</b>	46	<b>135</b>	136	<b>225</b>	225	<b>315</b>	313
<b>54</b>	54	<b>144</b>	146	<b>234</b>	234	<b>324</b>	326
<b>63</b>	63	<b>153</b>	154	<b>243</b>	242	<b>333</b>	332
<b>72</b>	71	<b>162</b>	163	<b>252</b>	251	<b>342</b>	341
<b>81</b>	80	<b>171</b>	171	<b>261</b>	260	<b>351</b>	350
<b>90</b>	89	<b>180</b>	179	<b>270</b>	268	<b>360</b>	358

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>18</b>	18	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	287
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	305
<b>54</b>	54	<b>144</b>	145	<b>234</b>	234	<b>324</b>	323
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	341
<b>90</b>	90	<b>180</b>	179	<b>270</b>	269	<b>360</b>	358

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>45</b>	46	<b>135</b>	136	<b>225</b>	224	<b>315</b>	315
<b>90</b>	92	<b>180</b>	181	<b>270</b>	269	<b>360</b>	361

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>90</b>	90	<b>180</b>	182	<b>270</b>	270	<b>360</b>	362

Tabla IV.1: Prueba No.1 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.

\* Resolución: Valor cada cuanto se va a Adquirir un Dato.

▪ Prueba No. 2 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>9</b>	8	<b>99</b>	99	<b>189</b>	189	<b>279</b>	279
<b>18</b>	18	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>27</b>	27	<b>117</b>	117	<b>207</b>	207	<b>297</b>	296
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	305
<b>45</b>	45	<b>135</b>	135	<b>225</b>	226	<b>315</b>	314
<b>54</b>	54	<b>144</b>	145	<b>234</b>	235	<b>324</b>	324
<b>63</b>	63	<b>153</b>	153	<b>243</b>	244	<b>333</b>	333
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	342
<b>81</b>	81	<b>171</b>	171	<b>261</b>	261	<b>351</b>	351
<b>90</b>	90	<b>180</b>	180	<b>270</b>	269	<b>360</b>	359

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>18</b>	17	<b>108</b>	107	<b>198</b>	197	<b>288</b>	287
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	305
<b>54</b>	54	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	323
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	341
<b>90</b>	89	<b>180</b>	179	<b>270</b>	269	<b>360</b>	358

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>45</b>	45	<b>135</b>	136	<b>225</b>	224	<b>315</b>	315
<b>90</b>	92	<b>180</b>	181	<b>270</b>	268	<b>360</b>	360

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>90</b>	90	<b>180</b>	182	<b>270</b>	270	<b>360</b>	362

Tabla IV.2: Prueba No.2 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.

▪ **Prueba No. 3 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:**

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>9</b>	8	<b>99</b>	99	<b>189</b>	188	<b>279</b>	279
<b>18</b>	18	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>27</b>	27	<b>117</b>	117	<b>207</b>	208	<b>297</b>	296
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	305
<b>45</b>	45	<b>135</b>	135	<b>225</b>	226	<b>315</b>	314
<b>54</b>	54	<b>144</b>	145	<b>234</b>	235	<b>324</b>	324
<b>63</b>	63	<b>153</b>	153	<b>243</b>	244	<b>333</b>	333
<b>72</b>	71	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	342
<b>81</b>	81	<b>171</b>	171	<b>261</b>	261	<b>351</b>	351
<b>90</b>	90	<b>180</b>	179	<b>270</b>	269	<b>360</b>	359

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>18</b>	17	<b>108</b>	107	<b>198</b>	197	<b>288</b>	287
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	305
<b>54</b>	53	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	323
<b>72</b>	71	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	341
<b>90</b>	89	<b>180</b>	179	<b>270</b>	269	<b>360</b>	358

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>45</b>	46	<b>135</b>	136	<b>225</b>	225	<b>315</b>	315
<b>90</b>	92	<b>180</b>	182	<b>270</b>	269	<b>360</b>	361

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>90</b>	90	<b>180</b>	182	<b>270</b>	270	<b>360</b>	362

**Tabla IV.3: Prueba No.3 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.**

De igual, se muestran los resultados de posicionamiento en azimut, cuando se estuvo trabajando con la antena de prueba:



▪ **Prueba No. 1 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:**

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>9</b>	9	<b>99</b>	99	<b>189</b>	189	<b>279</b>	279
<b>18</b>	18	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>27</b>	27	<b>117</b>	117	<b>207</b>	207	<b>297</b>	297
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	306
<b>45</b>	45	<b>135</b>	135	<b>225</b>	225	<b>315</b>	315
<b>54</b>	54	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	324
<b>63</b>	63	<b>153</b>	153	<b>243</b>	243	<b>333</b>	333
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	342
<b>81</b>	81	<b>171</b>	171	<b>261</b>	261	<b>351</b>	351
<b>90</b>	90	<b>180</b>	180	<b>270</b>	270	<b>360</b>	361

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>18</b>	18	<b>108</b>	107	<b>198</b>	199	<b>288</b>	288
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	217	<b>306</b>	306
<b>54</b>	54	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	323
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	341
<b>90</b>	89	<b>180</b>	180	<b>270</b>	270	<b>360</b>	360

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>45</b>	45	<b>135</b>	138	<b>225</b>	225	<b>315</b>	315
<b>90</b>	89	<b>180</b>	180	<b>270</b>	273	<b>360</b>	363

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>90</b>	89	<b>180</b>	180	<b>270</b>	268	<b>360</b>	363

Tabla IV.4: Prueba No.1 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.

▪ **Prueba No. 2 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:**

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>9</b>	9	<b>99</b>	99	<b>189</b>	189	<b>279</b>	279
<b>18</b>	18	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>27</b>	27	<b>117</b>	117	<b>207</b>	207	<b>297</b>	297
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	305

<b>45</b>	45	<b>135</b>	135	<b>225</b>	225	<b>315</b>	315
<b>54</b>	54	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	324
<b>63</b>	63	<b>153</b>	153	<b>243</b>	243	<b>333</b>	333
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	342
<b>81</b>	81	<b>171</b>	171	<b>261</b>	261	<b>351</b>	351
<b>90</b>	90	<b>180</b>	180	<b>270</b>	270	<b>360</b>	360

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>18</b>	17	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>36</b>	34	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	307
<b>54</b>	53	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	325
<b>72</b>	70	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	343
<b>90</b>	88	<b>180</b>	180	<b>270</b>	270	<b>360</b>	360

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>45</b>	45	<b>135</b>	138	<b>225</b>	228	<b>315</b>	318
<b>90</b>	89	<b>180</b>	180	<b>270</b>	273	<b>360</b>	363

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>90</b>	90	<b>180</b>	180	<b>270</b>	272	<b>360</b>	363

Tabla IV.5: Prueba No.2 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.

▪ Prueba No. 3 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>9</b>	10	<b>99</b>	99	<b>189</b>	189	<b>279</b>	279
<b>18</b>	19	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>27</b>	28	<b>117</b>	117	<b>207</b>	207	<b>297</b>	297
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	306
<b>45</b>	46	<b>135</b>	135	<b>225</b>	225	<b>315</b>	316
<b>54</b>	55	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	324
<b>63</b>	63	<b>153</b>	153	<b>243</b>	243	<b>333</b>	333
<b>72</b>	73	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	342
<b>81</b>	82	<b>171</b>	171	<b>261</b>	261	<b>351</b>	351
<b>90</b>	90	<b>180</b>	180	<b>270</b>	270	<b>360</b>	360

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>18</b>	19	<b>108</b>	108	<b>198</b>	198	<b>288</b>	288
<b>36</b>	36	<b>126</b>	126	<b>216</b>	216	<b>306</b>	306
<b>54</b>	54	<b>144</b>	144	<b>234</b>	234	<b>324</b>	324
<b>72</b>	72	<b>162</b>	162	<b>252</b>	252	<b>342</b>	342
<b>90</b>	90	<b>180</b>	180	<b>270</b>	270	<b>360</b>	360

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>45</b>	47	<b>135</b>	138	<b>225</b>	227	<b>315</b>	317
<b>90</b>	92	<b>180</b>	183	<b>270</b>	273	<b>360</b>	363

Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>90</b>	92	<b>180</b>	180	<b>270</b>	272	<b>360</b>	363

**Tabla IV.6: Prueba No.3 - Medición de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.**

#### **4.2.2 Medición de Posicionamiento de la Antena en la Minitorre en Elevación**

La minitorre de elevación es la que permite el barrido y movimiento en el eje vertical, de la antena de prueba, en las posiciones anteriormente mencionadas. Permitiendo así, que junto con la minitorre de azimut, sea posible la adquisición de todos los valores de potencia necesarios para la obtención del patrón de radiación, en los diferentes ángulos de elevación.

La herramienta utilizadas, para conseguir el movimiento en la minitorre de elevación, fueron las siguientes:

- La interfaz HMI realizada en LabView, la cual permite al usuario controlar, desde la PC, el giro de la antena transmisora en dos grados de libertad. Siendo estos grados de libertad azimut y elevación.

- El prototipo SCAE (Sistema de Control en Azimut y Elevación), el cual permite el giro en dos grados de libertad.

Después de la realización de pruebas de posicionamiento de la antena en la minitorre de elevación, las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran los resultados de posicionamiento en elevación, cuando se estuvo trabajando sin la antena de prueba:

▪ **Mediciones en Elevaciones Positivas:**

No. Prueba	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
1	20	19	30	30	45	44
2	20	20	30	30	45	44
3	20	21	30	30	45	44
4	20	20	30	31	45	44
5	20	20	30	31	45	44
6	20	21	30	31	45	44
7	20	21	30	31	45	45
8	20	20	30	31	45	45
9	20	20	30	31	45	44
10	20	19	30	31	45	44

Tabla IV.7: Mediciones en Elevaciones Positivas – Sin Antena.

▪ **Mediciones en Elevaciones Negativas:**

No. Prueba	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
1	-20	-21	-30	-30	-45	-44
2	-20	-21	-30	-30	-45	-43
3	-20	-20	-30	-29	-45	-44
4	-20	-21	-30	-30	-45	-45
5	-20	-19	-30	-29	-45	-44
6	-20	-19	-30	-30	-45	-43
7	-20	-19	-30	-30	-45	-45
8	-20	-21	-30	-30	-45	-45

<b>9</b>	<b>-20</b>	-21	<b>-30</b>	-29	<b>-45</b>	-44
<b>10</b>	<b>-20</b>	-21	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-44

**Tabla IV.8: Mediciones en Elevaciones Negativas – Sin Antena.**

De igual, se muestran los resultados de posicionamiento en elevación, cuando se estuvo trabajando con la antena de prueba:

▪ **Mediciones en Elevaciones Positivas:**

No. Prueba	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>1</b>	<b>20</b>	20	<b>30</b>	31	<b>45</b>	45
<b>2</b>	<b>20</b>	19	<b>30</b>	30	<b>45</b>	46
<b>3</b>	<b>20</b>	20	<b>30</b>	31	<b>45</b>	46
<b>4</b>	<b>20</b>	19	<b>30</b>	30	<b>45</b>	46
<b>5</b>	<b>20</b>	20	<b>30</b>	30	<b>45</b>	45
<b>6</b>	<b>20</b>	20	<b>30</b>	30	<b>45</b>	45
<b>7</b>	<b>20</b>	19	<b>30</b>	29	<b>45</b>	45
<b>8</b>	<b>20</b>	19	<b>30</b>	30	<b>45</b>	45
<b>9</b>	<b>20</b>	19	<b>30</b>	30	<b>45</b>	45
<b>10</b>	<b>20</b>	20	<b>30</b>	30	<b>45</b>	45

**Tabla IV.9: Mediciones en Elevaciones Positivas – Con Antena.**

▪ **Mediciones en Elevaciones Negativas:**

No. Prueba	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido	Grado Teórico	Grado Medido
<b>1</b>	<b>-20</b>	-19	<b>-30</b>	-29	<b>-45</b>	-44
<b>2</b>	<b>-20</b>	-20	<b>-30</b>	-28	<b>-45</b>	-44
<b>3</b>	<b>-20</b>	-21	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-45
<b>4</b>	<b>-20</b>	-20	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-45
<b>5</b>	<b>-20</b>	-20	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-44
<b>6</b>	<b>-20</b>	-20	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-45
<b>7</b>	<b>-20</b>	-20	<b>-30</b>	-31	<b>-45</b>	-45
<b>8</b>	<b>-20</b>	-21	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-44

<b>9</b>	<b>-20</b>	-19	<b>-30</b>	-29	<b>-45</b>	-45
<b>10</b>	<b>-20</b>	-20	<b>-30</b>	-30	<b>-45</b>	-45

**Tabla IV.10: Mediciones en Elevaciones Negativas – Con Antena.**

### **4.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE RADIACIÓN DE ANTENAS UHF Y MICROONDA EN CADA POSICIÓN**

Para la medición de los parámetros de radiación de las antenas UHF y Microonda es necesario realizar un pequeño sistema de medida. El esquema general de dicho sistema de medida se lo describe a continuación:

- El generador de señales Agilent N9310A RF, el cual permite generar la frecuencia y amplitud deseada dentro del sistema de transmisión. En este caso en particular, se utiliza la frecuencia para la cual fue diseñada la antena, 911 [MHz] y 2.4 [GHz], y una amplitud de 0 [dBm] y 20 [dBm], respectivamente.
- La antena de transmisión o de recepción de la cual se desee obtener las diferentes características de radiación; ya sean estas: pérdida de retorno, carta de Smith, VSWR, etc.
- El analizador de cables y antenas Anritsu S362E, el cual permite la adquisición de las diferentes características de radiación de las antenas de prueba.

Las antenas de prueba utilizadas para la obtención de los parámetros de radiación, son antenas tipo Yagi, de construcción artesanal, la primera antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), cuatro elementos Directores, una Ganancia de 8.5 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,08 [dB] y trabajan a una frecuencia de 911 [MHz].

La segunda antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), siete elementos

Directores, una Ganancia de 12.56 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,03 [dB] y trabajan a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Finalmente, también se planea utilizar antenas omnidireccionales de fabrica, que poseen entre sus características principales una Ganancia de 12 [dBi], y trabajan a una frecuencia de 2.4 - 2.5 [GHz].

Para más detalle sobre el esquema, referirse a la Figura II.17.

### 4.3.1 Pérdida de Retorno

La pérdida de retorno es la diferencia entre la potencia de la señal transmitida y la potencia de las reflexiones de la señal, causadas por las variaciones en la impedancia del cable. Un valor alto de pérdida de retorno, da como resultado una gran diferencia entre las potencias de las señales transmitidas y reflejadas.

En las siguientes figuras se muestra la pérdida de retorno, tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:

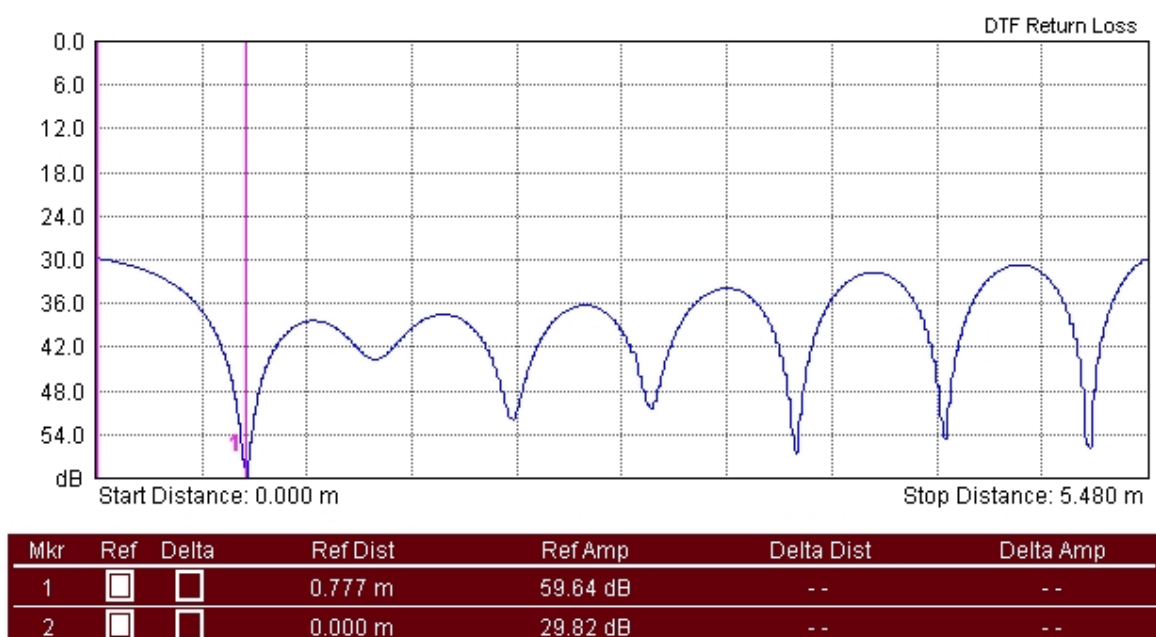


Figura IV.8: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.

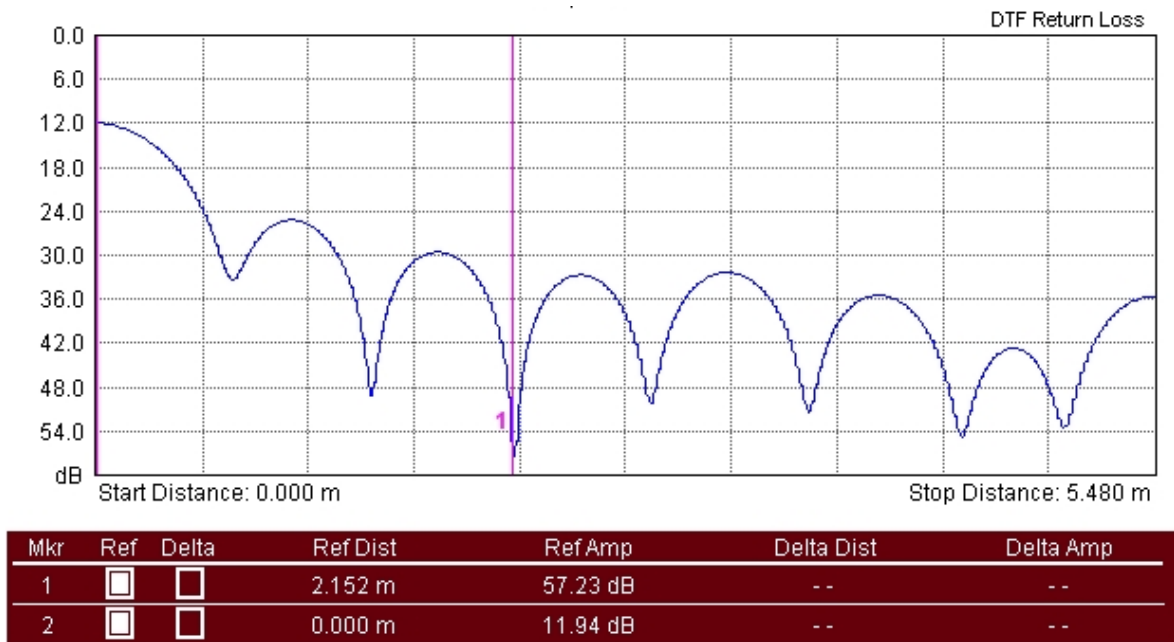


Figura IV.9: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

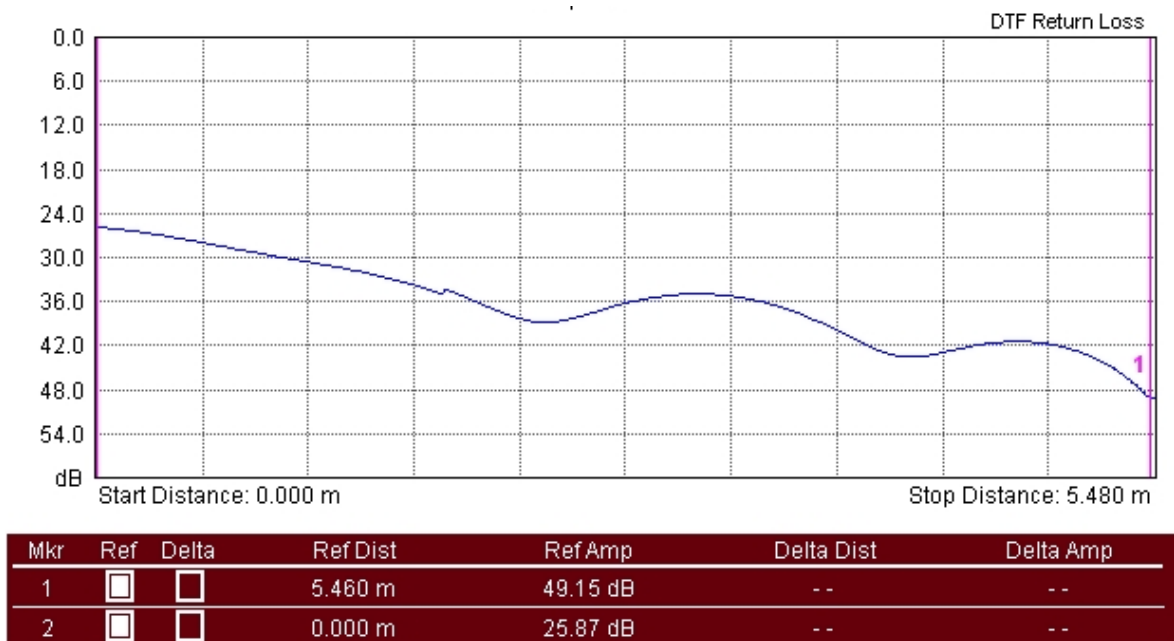


Figura IV.10: Pérdida de Retorno – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.



### 4.3.2 Relación de Ondas Estacionarias

La razón de onda estacionaria (ROE) o Standing Wave Ratio (SWR) permite determinar si dos o más módulos eléctricos o electrónicos de impedancias diferentes, que se están interconectando dentro de un sistema, están adaptados adecuadamente o por si el contrario, se encuentran desacoplados.

Puesto que no siempre se puede acoplar una línea de transmisión de manera exacta, es necesario tener una medida que nos indique el grado de desacoplamiento. A esta medida se la conoce como Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).

En las siguientes figuras se muestra el Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:

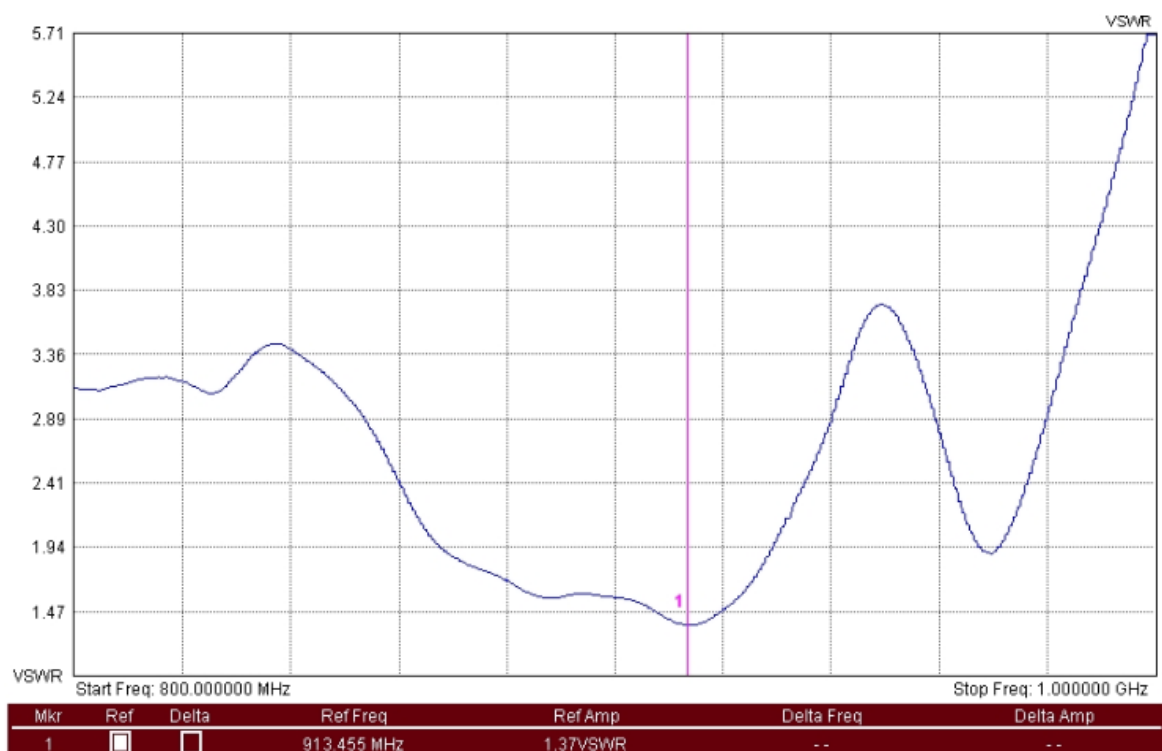
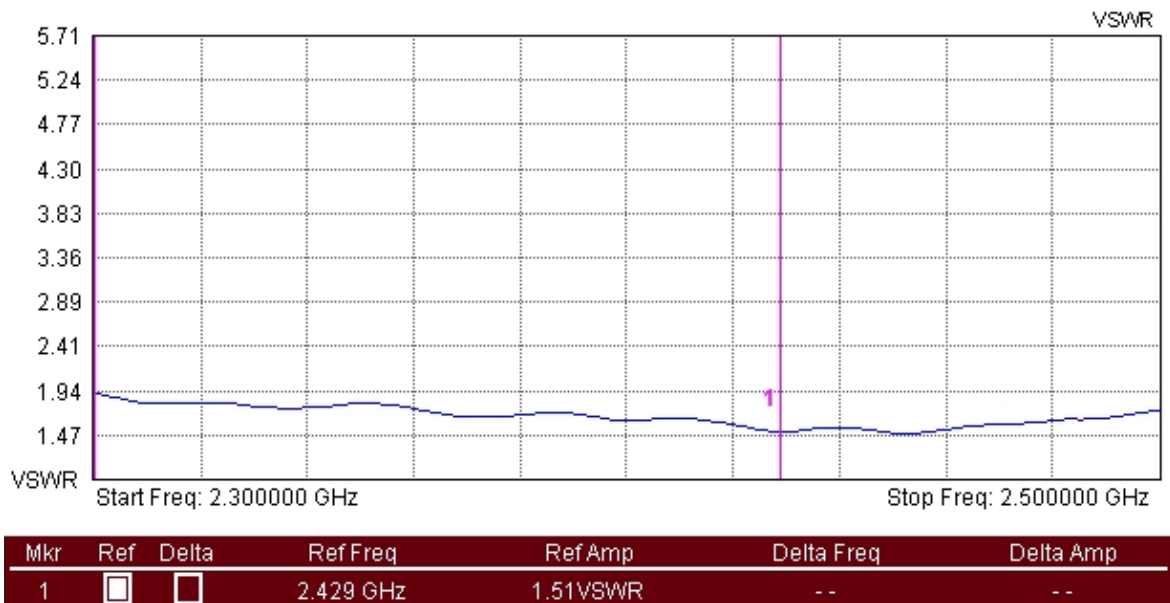
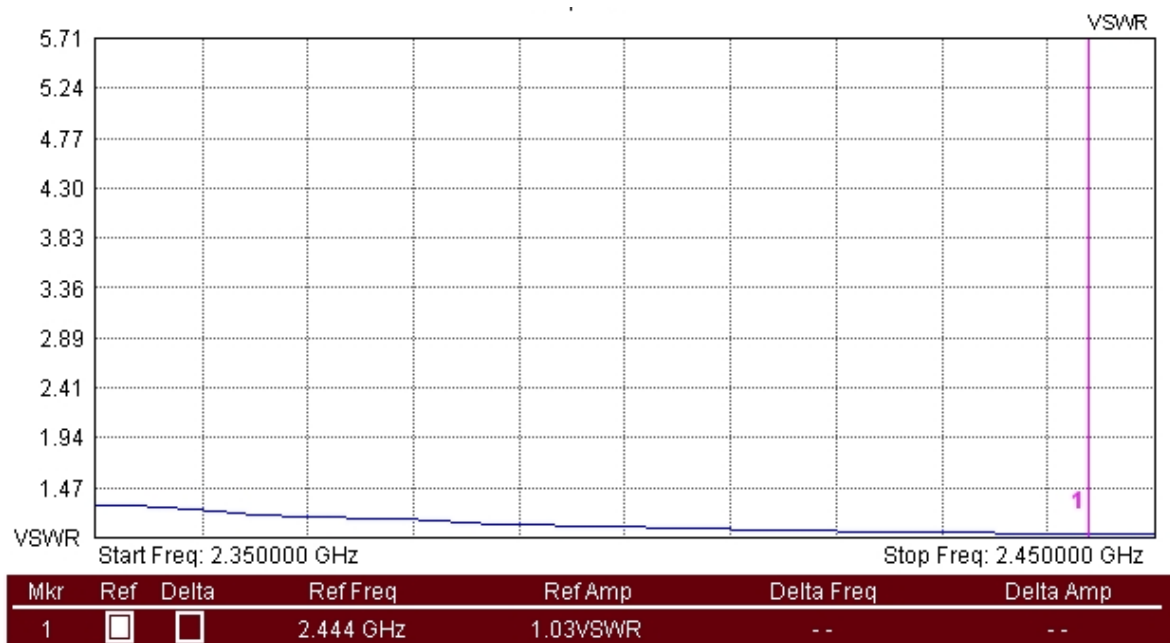


Figura IV.11: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.



**Figura IV.12: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.**

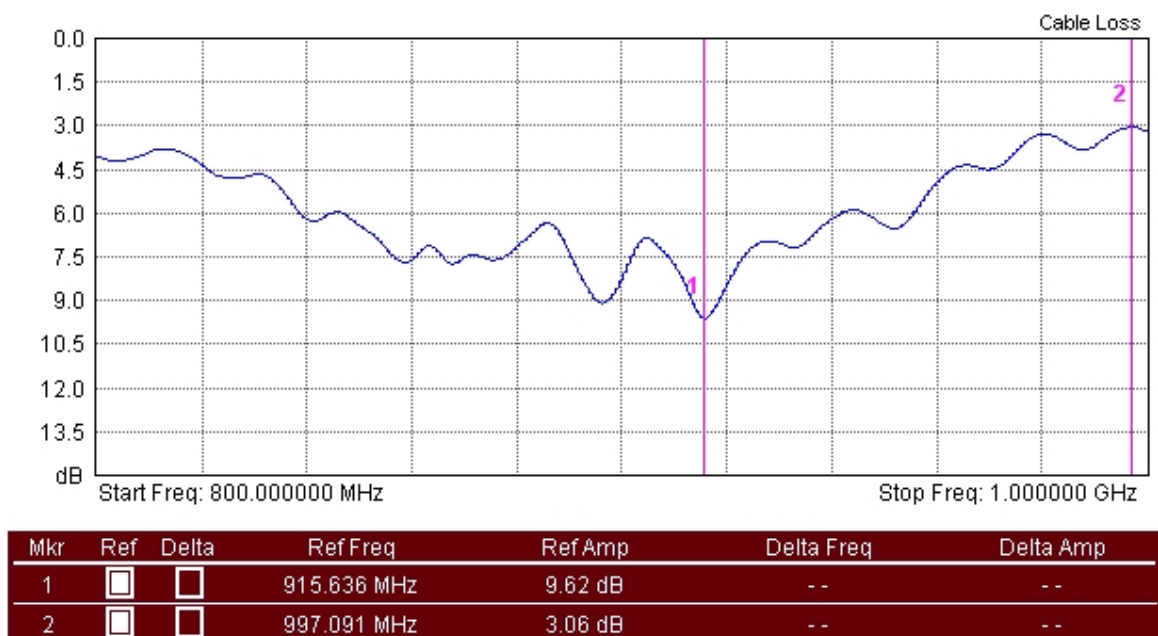


**Figura IV.13: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.**

### 4.3.3 Pérdida del Cable

Las pérdidas de la señal ocurrirán en los cables que conectan el transmisor y el receptor a las antenas. Las pérdidas dependen del tipo de cable y la frecuencia de operación a la que se esté trabajando. En general, más allá de cuanto cable se tenga a disposición, este siempre causará una pérdida.

En las siguientes figuras se muestra la pérdida del cable, tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:



**Figura IV.14: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.**

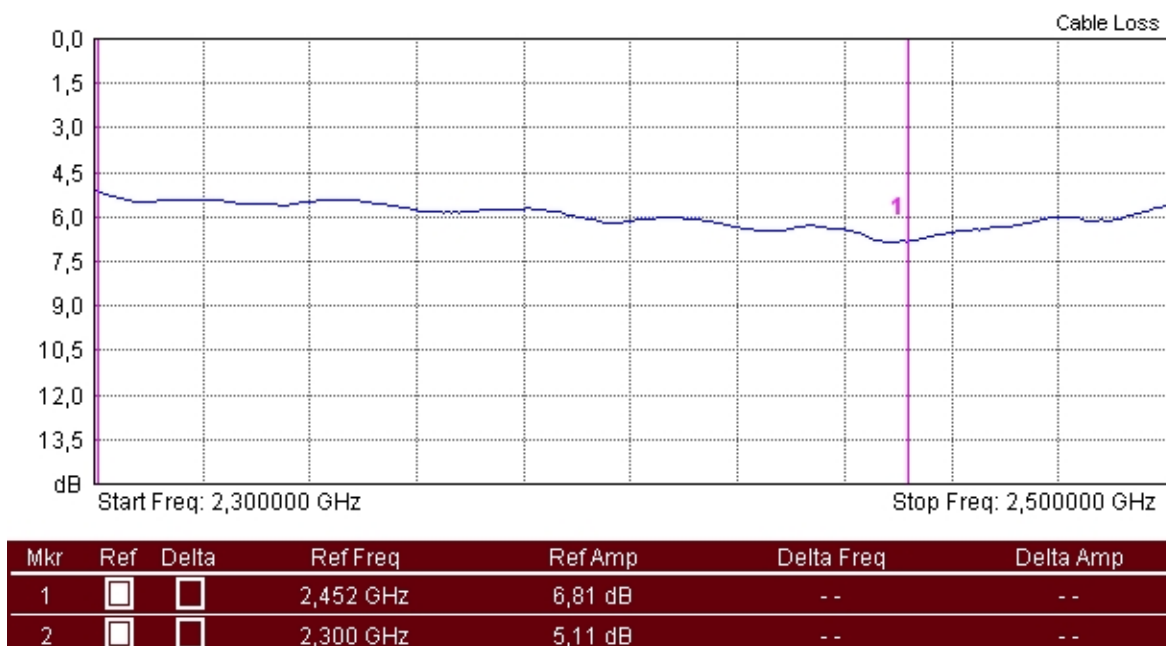


Figura IV.15: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

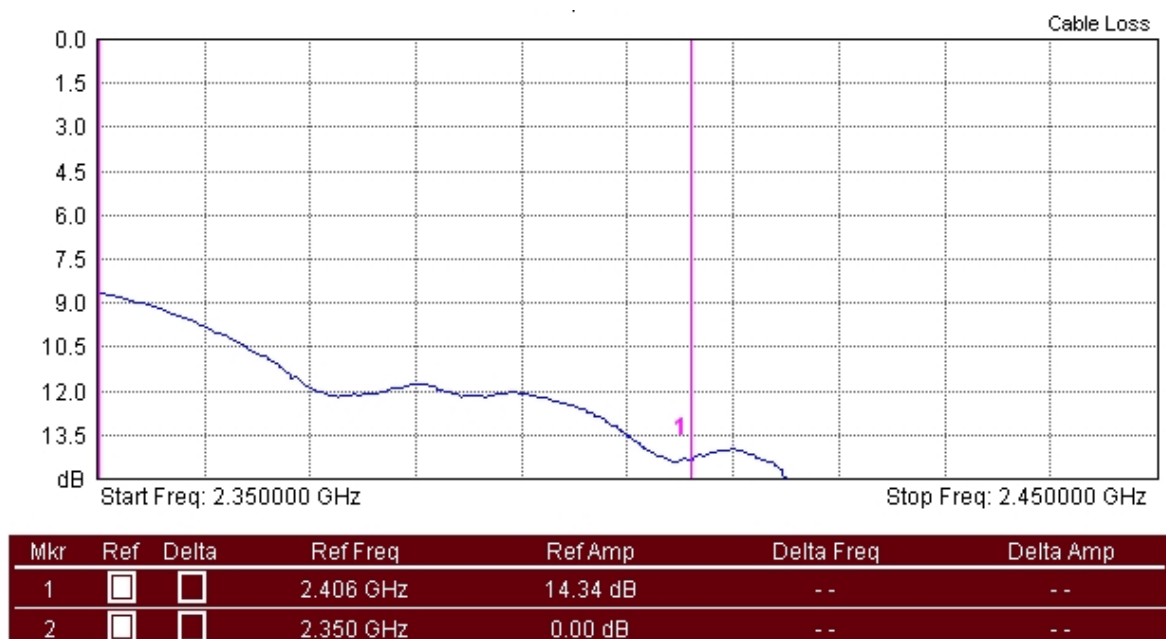


Figura IV.16: Pérdida del Cable – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

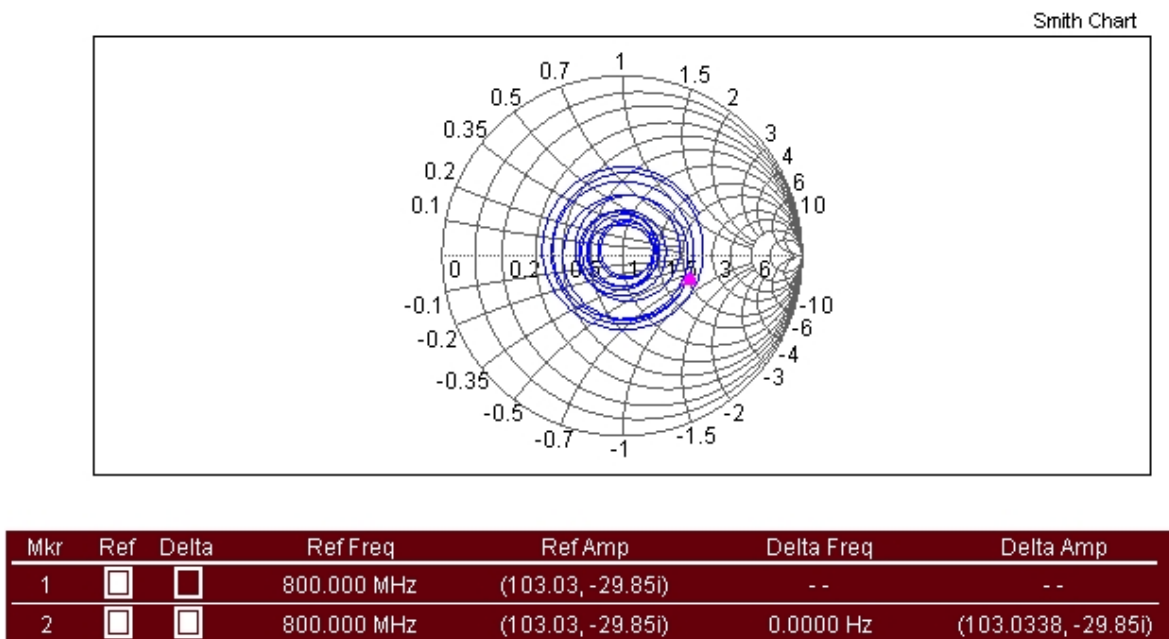
### 4.3.4 Carta de Smith

La carta de Smith es una herramienta gráfica que permite la obtención de diversos parámetros de las líneas de transmisión y la resolución de problemas de adaptación de impedancias, evitando las operaciones con números complejos, que suelen implicar estos cálculos.

Se trata de un diagrama polar especial que contiene círculos de resistencia constante, círculos de reactancia constante, círculos de relación de onda estacionaria constante y curvas radiales que representan los lugares geométricos de desfase en una línea de valor constante.

La carta de Smith se puede utilizar para una variedad de propósitos incluyendo la determinación de la impedancia, adaptación de la impedancia, optimización del ruido, la estabilidad, etc. [43].

En las siguientes figuras se muestra la carta de Smith, tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:



**Figura IV.17: Carta de Smith – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.**

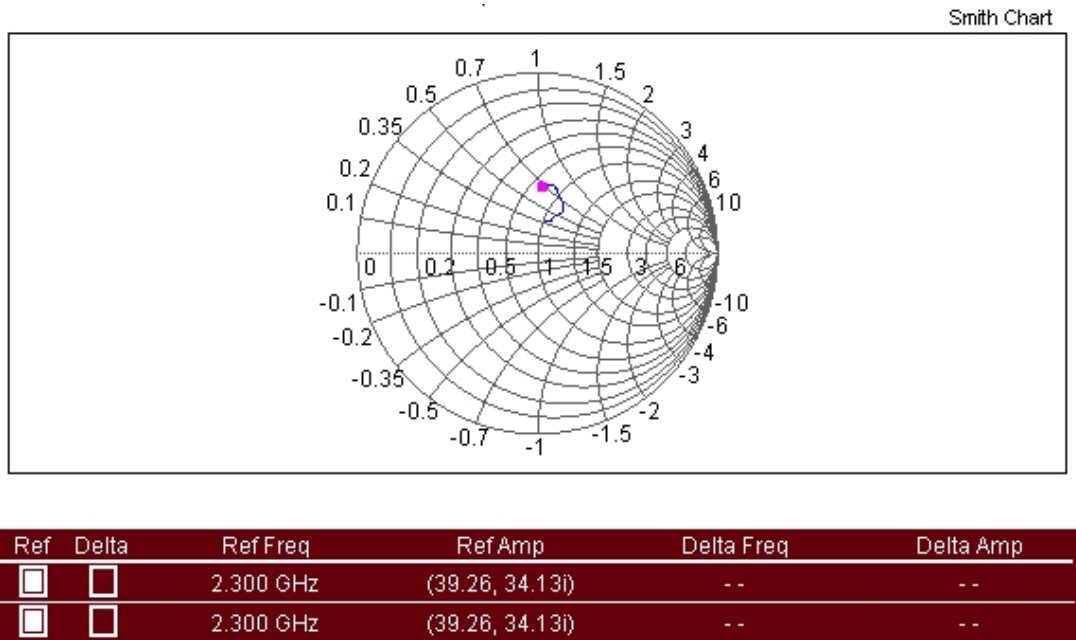


Figura IV.18: Carta de Smith – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

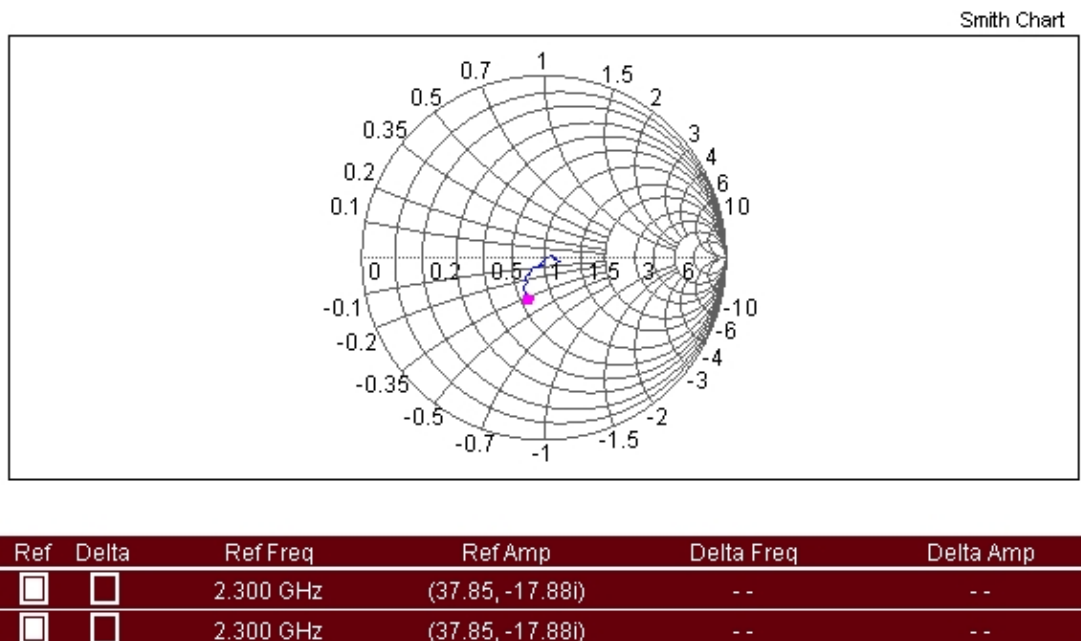


Figura IV.19: Carta de Smith – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

### 4.3.5 Potencia de Transmisión y Recepción

La potencia de transmisión de una antena es la potencia con la cual dicha antena transmite una señal; mientras que la potencia de recepción es la potencia de la señal que recibe una antena, después de que dicha señal haya atravesado obstáculos, desvanecimientos, reflexiones y demás atenuaciones a lo largo del sistema de transmisión – recepción.

Las herramientas utilizadas, para adquirir los diferentes valores de potencia, fueron las siguientes:

- La interfaz HMI realizada en LabView, la cual permite al usuario controlar, desde la PC, el giro de la antena transmisora en dos grados de libertad. Siendo estos grados de libertad azimut y elevación.
- El generador de señales Agilent N9310A RF, el cual permite generar la frecuencia y amplitud deseada dentro del sistema de transmisión. En este caso en particular, se utiliza la frecuencia para la cual fue diseñada la antena, 911 [MHz] y 2.4 [GHz], y una amplitud de 0 [dBm] y 20 [dBm], respectivamente.
- El analizador de espectros Anritsu S362E, con el cual se van a obtener los parámetros de la antena, además de los datos de potencia necesarios para la obtención del patrón de radiación.
- La interfaz HMI realizada en MatLab, la cual permite al usuario, desde la PC, la adquisición de los datos de potencia; obtenidos a través del analizador de espectros Anritsu S362E, y la posterior gráfica del patrón de radiación de la antena de prueba.

Todos los datos y valores, adquiridos a través de las diferentes pruebas tanto al aire libre como dentro de la cámara anecoica, fueron obtenidos en tiempo real.

Las antenas de prueba utilizadas para la obtención del patrón de radiación, son antenas tipo Yagi, de construcción artesanal, la primera antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), cuatro elementos Directores, una Ganancia de 8.5 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,08 [dB] y trabajan a una frecuencia de 911 [MHz].

La segunda antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), siete elementos Directores, una Ganancia de 12.56 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,03 [dB] y trabajan a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Finalmente, también se planea utilizar antenas omnidireccionales de fabrica, que poseen entre sus características principales una Ganancia de 12 [dBi], y trabajan a una frecuencia de 2.4 - 2.5 [GHz].

Para más detalle sobre el esquema, referirse a la Figura II.16.

En las siguientes tablas se muestra la potencia de recepción del sistema, al aire libre, considerando diferentes grados de elevación, con un azimut entre 0° - 360°, trabajando con la antena de prueba Yagi a 911 [MHz].

▪ **Elevación 0° - Resolución\* de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-28.26

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-28.93	<b>99</b>	-56.84	<b>189</b>	-56.85	<b>279</b>	-37.19
<b>18</b>	-29.27	<b>108</b>	-51.89	<b>198</b>	-60.7	<b>288</b>	-34.63
<b>27</b>	-29.92	<b>117</b>	-49.95	<b>207</b>	-56.74	<b>297</b>	-32.68
<b>36</b>	-30.94	<b>126</b>	-48.38	<b>216</b>	-54.75	<b>306</b>	-31.14
<b>45</b>	-32.6	<b>135</b>	-48.06	<b>225</b>	-50.32	<b>315</b>	-30.09

\* **Resolución:** Valor cada cuanto se va a Adquirir un Dato.



<b>54</b>	-34.77	<b>144</b>	-46.89	<b>234</b>	-51.25	<b>324</b>	-29.34
<b>63</b>	-37.8	<b>153</b>	-47.64	<b>243</b>	-49.35	<b>333</b>	-28.89
<b>72</b>	-42.12	<b>162</b>	-49.16	<b>252</b>	-48.12	<b>342</b>	-28.56
<b>81</b>	-47.69	<b>171</b>	-49.98	<b>261</b>	-44.68	<b>351</b>	-28.36
<b>90</b>	-59.12	<b>180</b>	-53.24	<b>270</b>	-40.52	<b>360</b>	-28.26

**Tabla IV.11: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 0° – Antena Yagi – 911**  
[MHz].

▪ **Elevación 20° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-30.15

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-30.27	<b>99</b>	-43.35	<b>189</b>	-50.44	<b>279</b>	-48.2
<b>18</b>	-30.68	<b>108</b>	-45.62	<b>198</b>	-49.74	<b>288</b>	-42.91
<b>27</b>	-31.36	<b>117</b>	-47.99	<b>207</b>	-47.73	<b>297</b>	-39.78
<b>36</b>	-32.02	<b>126</b>	-47.9	<b>216</b>	-47.37	<b>306</b>	-37.26
<b>45</b>	-32.98	<b>135</b>	-47.2	<b>225</b>	-45.88	<b>315</b>	-35.11
<b>54</b>	-34.15	<b>144</b>	-46.68	<b>234</b>	-46.25	<b>324</b>	-34.66
<b>63</b>	-35.4	<b>153</b>	-47.14	<b>243</b>	-46.58	<b>333</b>	-33.17
<b>72</b>	-37.15	<b>162</b>	-47.58	<b>252</b>	-48.3	<b>342</b>	-32.09
<b>81</b>	-39.07	<b>171</b>	-48.72	<b>261</b>	-54.2	<b>351</b>	-31.22
<b>90</b>	-40.91	<b>180</b>	-49.47	<b>270</b>	-62.9	<b>360</b>	-30.66

**Tabla IV.12: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 20° – Antena Yagi – 911**  
[MHz].

▪ **Elevación 30° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-33.04

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-32.82	<b>99</b>	-41.92	<b>189</b>	-48.74	<b>279</b>	-53.92
<b>18</b>	-32.94	<b>108</b>	-41.77	<b>198</b>	-49.28	<b>288</b>	-46.54
<b>27</b>	-33.2	<b>117</b>	-43.8	<b>207</b>	-49.34	<b>297</b>	-42.58

<b>36</b>	-33.75	<b>126</b>	-45.66	<b>216</b>	-48.46	<b>306</b>	-39.95
<b>45</b>	-34.44	<b>135</b>	-47.47	<b>225</b>	-47.3	<b>315</b>	-37.82
<b>54</b>	-35.32	<b>144</b>	-47.22	<b>234</b>	-46.54	<b>324</b>	-36.03
<b>63</b>	-36.04	<b>153</b>	-47.26	<b>243</b>	-45.52	<b>333</b>	-34.66
<b>72</b>	-37.14	<b>162</b>	-47.36	<b>252</b>	-46.2	<b>342</b>	-33.28
<b>81</b>	-38.51	<b>171</b>	-47	<b>261</b>	-48.14	<b>351</b>	-33.38
<b>90</b>	-40.02	<b>180</b>	-47.85	<b>270</b>	-61.78	<b>360</b>	-32.98

Tabla IV.13: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 30° – Antena Yagi – 911  
[MHz].

▪ Elevación 45° - Resolución de 9°:

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-37.65

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-37.62	<b>99</b>	-46.05	<b>189</b>	-49.15	<b>279</b>	-61.54
<b>18</b>	-37.84	<b>108</b>	-47.6	<b>198</b>	-48.48	<b>288</b>	-52.32
<b>27</b>	-38.18	<b>117</b>	-48.82	<b>207</b>	-47.89	<b>297</b>	-47.39
<b>36</b>	-38.66	<b>126</b>	-49.22	<b>216</b>	-46.28	<b>306</b>	-44.47
<b>45</b>	-39.45	<b>135</b>	-48.72	<b>225</b>	-45.59	<b>315</b>	-41.82
<b>54</b>	-39.9	<b>144</b>	-48.05	<b>234</b>	-46.17	<b>324</b>	-40.2
<b>63</b>	-40.55	<b>153</b>	-48.46	<b>243</b>	-46.29	<b>333</b>	-38.82
<b>72</b>	-41.48	<b>162</b>	-48.77	<b>252</b>	-47.3	<b>342</b>	-38
<b>81</b>	-43.04	<b>171</b>	-48.42	<b>261</b>	-50.83	<b>351</b>	-37.94
<b>90</b>	-44.21	<b>180</b>	-48.69	<b>270</b>	-56.28	<b>360</b>	-36.85

Tabla IV.14: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 45° – Antena Yagi – 911  
[MHz].

▪ Elevación -20° - Resolución de 9°:

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-28.84

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-29.02	<b>99</b>	-41.66	<b>189</b>	-58.37	<b>279</b>	-50.58

<b>18</b>	-29.58	<b>108</b>	-42.52	<b>198</b>	-64.54	<b>288</b>	-44.05
<b>27</b>	-30.38	<b>117</b>	-43.23	<b>207</b>	-63.49	<b>297</b>	-39.29
<b>36</b>	-31.45	<b>126</b>	-45.57	<b>216</b>	-62.14	<b>306</b>	-36.18
<b>45</b>	-32.48	<b>135</b>	-48.33	<b>225</b>	-61.79	<b>315</b>	-33.9
<b>54</b>	-34.1	<b>144</b>	-51.58	<b>234</b>	-60.1	<b>324</b>	-32.28
<b>63</b>	-35.96	<b>153</b>	-56.48	<b>243</b>	-55.3	<b>333</b>	-30.94
<b>72</b>	-37.88	<b>162</b>	-56.57	<b>252</b>	-49.68	<b>342</b>	-29.83
<b>81</b>	-39.36	<b>171</b>	-56.1	<b>261</b>	-49.45	<b>351</b>	-29.44
<b>90</b>	-40.82	<b>180</b>	-56.29	<b>270</b>	-50.52	<b>360</b>	-29.22

**Tabla IV.15: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación -20° – Antena Yagi – 911 [MHz].**

▪ **Elevación -30° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-31.18

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-31.15	<b>99</b>	-41.47	<b>189</b>	-61.54	<b>279</b>	-50.65
<b>18</b>	-31.27	<b>108</b>	-41.9	<b>198</b>	-69.38	<b>288</b>	-54.1
<b>27</b>	-31.84	<b>117</b>	-42.89	<b>207</b>	-63.52	<b>297</b>	-48.37
<b>36</b>	-32.55	<b>126</b>	-43.61	<b>216</b>	-63.12	<b>306</b>	-46.97
<b>45</b>	-34.02	<b>135</b>	-45.43	<b>225</b>	-60.37	<b>315</b>	-35.59
<b>54</b>	-35.71	<b>144</b>	-48.43	<b>234</b>	-62.9	<b>324</b>	-33.8
<b>63</b>	-38.11	<b>153</b>	-52.73	<b>243</b>	-64.9	<b>333</b>	-32.65
<b>72</b>	-39.92	<b>162</b>	-57.1	<b>252</b>	-53.54	<b>342</b>	-31.92
<b>81</b>	-41.22	<b>171</b>	-61.58	<b>261</b>	-49.64	<b>351</b>	-31.65
<b>90</b>	-40.94	<b>180</b>	-64.66	<b>270</b>	-48.3	<b>360</b>	-31.67

**Tabla IV.16: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación -30° – Antena Yagi – 911 [MHz].**

▪ **Elevación -45° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-33.81

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-33.44	<b>99</b>	-41.42	<b>189</b>	-64.2	<b>279</b>	-53.44
<b>18</b>	-33.79	<b>108</b>	-42.55	<b>198</b>	-66.12	<b>288</b>	-53.7
<b>27</b>	-34.25	<b>117</b>	-43.28	<b>207</b>	-60.95	<b>297</b>	-46.08
<b>36</b>	-35.41	<b>126</b>	-45.37	<b>216</b>	-58.71	<b>306</b>	-42.12
<b>45</b>	-37.26	<b>135</b>	-47.26	<b>225</b>	-60.94	<b>315</b>	-39.44
<b>54</b>	-39.52	<b>144</b>	-50.08	<b>234</b>	-58.18	<b>324</b>	-37.4
<b>63</b>	-42.09	<b>153</b>	-52.48	<b>243</b>	-53.14	<b>333</b>	-35.75
<b>72</b>	-42.79	<b>162</b>	-54.66	<b>252</b>	-49.65	<b>342</b>	-34.85
<b>81</b>	-41.92	<b>171</b>	-59.75	<b>261</b>	-47.64	<b>351</b>	-34.01
<b>90</b>	-41.34	<b>180</b>	-60.78	<b>270</b>	-48.82	<b>360</b>	-33.96

Tabla IV.17: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación -45° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación 90° - Resolución de 9°:

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-47.46

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-48.11	<b>99</b>	-47.38	<b>189</b>	-46.31	<b>279</b>	-47.62
<b>18</b>	-47.92	<b>108</b>	-48.02	<b>198</b>	-46.11	<b>288</b>	-47.6
<b>27</b>	-47.66	<b>117</b>	-48.55	<b>207</b>	-46.35	<b>297</b>	-48.05
<b>36</b>	-48	<b>126</b>	-48.63	<b>216</b>	-46	<b>306</b>	-47.71
<b>45</b>	-47.91	<b>135</b>	-47.77	<b>225</b>	-45.95	<b>315</b>	-47.46
<b>54</b>	-48.35	<b>144</b>	-49.53	<b>234</b>	-45.88	<b>324</b>	-47.27
<b>63</b>	-47.32	<b>153</b>	-47.44	<b>243</b>	-46.43	<b>333</b>	-47.48
<b>72</b>	-48.07	<b>162</b>	-47.54	<b>252</b>	-46.69	<b>342</b>	-46.28
<b>81</b>	-48.09	<b>171</b>	-47.43	<b>261</b>	-46.93	<b>351</b>	-46.76
<b>90</b>	-48.04	<b>180</b>	-47.14	<b>270</b>	-47.5	<b>360</b>	-47.36

Tabla IV.18: Mediciones Potencia de Recepción – Aire Libre – Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].

En las siguientes tablas se muestra la potencia de recepción del sistema, dentro de la cámara anecoica, considerando diferentes grados de elevación, con un azimut entre 0° - 360°, trabajando con la antena de prueba Yagi a 911 [MHz].

▪ Elevación 0° - Resolución de 9°:

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-30.75

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-30.42	<b>99</b>	-34.53	<b>189</b>	-35.05	<b>279</b>	-35.66
<b>18</b>	-30.26	<b>108</b>	-37.14	<b>198</b>	-34.37	<b>288</b>	-34.75
<b>27</b>	-30.64	<b>117</b>	-41.94	<b>207</b>	-34.68	<b>297</b>	-36.68
<b>36</b>	-31.24	<b>126</b>	-45.29	<b>216</b>	-35.36	<b>306</b>	-41.99
<b>45</b>	-31.76	<b>135</b>	-44.92	<b>225</b>	-35.29	<b>315</b>	-44.21
<b>54</b>	-33.19	<b>144</b>	-42.1	<b>234</b>	-36	<b>324</b>	-38.25
<b>63</b>	-36.87	<b>153</b>	-39.76	<b>243</b>	-37.19	<b>333</b>	-36.37
<b>72</b>	-51.61	<b>162</b>	-38.16	<b>252</b>	-38.26	<b>342</b>	-33.23
<b>81</b>	-39.63	<b>171</b>	-37.07	<b>261</b>	-39.16	<b>351</b>	-31.93
<b>90</b>	-34.98	<b>180</b>	-35.94	<b>270</b>	-37.9	<b>360</b>	-31.54

Tabla IV.19: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación 20° - Resolución de 9°:

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-32.17

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-31.72	<b>99</b>	-46.66	<b>189</b>	-40.38	<b>279</b>	-35.86
<b>18</b>	-31.53	<b>108</b>	-48.33	<b>198</b>	-37.85	<b>288</b>	-36.77
<b>27</b>	-31.7	<b>117</b>	-50.22	<b>207</b>	-35.7	<b>297</b>	-41.38
<b>36</b>	-32.29	<b>126</b>	-50.46	<b>216</b>	-34.64	<b>306</b>	-48.38
<b>45</b>	-33.56	<b>135</b>	-45.79	<b>225</b>	-34.71	<b>315</b>	-57.09
<b>54</b>	-35.78	<b>144</b>	-42.07	<b>234</b>	-35.39	<b>324</b>	-43.49
<b>63</b>	-39.84	<b>153</b>	-39.93	<b>243</b>	-36.75	<b>333</b>	-37.81
<b>72</b>	-48.78	<b>162</b>	-39.4	<b>252</b>	-38.01	<b>342</b>	-35.08
<b>81</b>	-54.57	<b>171</b>	-40.12	<b>261</b>	-37.8	<b>351</b>	-33.68
<b>90</b>	-47.16	<b>180</b>	-41.1	<b>270</b>	-36.56	<b>360</b>	-33.62

Tabla IV.20: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 20° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ **Elevación 30° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-35.76

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-35.51	<b>99</b>	-48.94	<b>189</b>	-45.81	<b>279</b>	-38.73
<b>18</b>	-35.19	<b>108</b>	-47.77	<b>198</b>	-40.87	<b>288</b>	-38.23
<b>27</b>	-34.88	<b>117</b>	-47.72	<b>207</b>	-38.1	<b>297</b>	-38.73
<b>36</b>	-34.68	<b>126</b>	-49.96	<b>216</b>	-36.46	<b>306</b>	-41.98
<b>45</b>	-35.25	<b>135</b>	-55.88	<b>225</b>	-35.78	<b>315</b>	-50.9
<b>54</b>	-36.23	<b>144</b>	-61.94	<b>234</b>	-35.99	<b>324</b>	-51.33
<b>63</b>	-37.85	<b>153</b>	-51.15	<b>243</b>	-36.99	<b>333</b>	-43.06
<b>72</b>	-40.89	<b>162</b>	-48.8	<b>252</b>	-39.54	<b>342</b>	-39.4
<b>81</b>	-45.32	<b>171</b>	-49.46	<b>261</b>	-40.05	<b>351</b>	-38.26
<b>90</b>	-48.72	<b>180</b>	-50.01	<b>270</b>	-40.02	<b>360</b>	-37.58

Tabla IV.21: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 30° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ **Elevación 45° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-42.03

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-42.06	<b>99</b>	-45	<b>189</b>	-38.46	<b>279</b>	-42.45
<b>18</b>	-40.97	<b>108</b>	-44.22	<b>198</b>	-37.45	<b>288</b>	-42.27
<b>27</b>	-41.28	<b>117</b>	-44.64	<b>207</b>	-37.05	<b>297</b>	-43.8
<b>36</b>	-41.47	<b>126</b>	-45.02	<b>216</b>	-37.62	<b>306</b>	-48.04
<b>45</b>	-41.94	<b>135</b>	-45.36	<b>225</b>	-38.71	<b>315</b>	-53.4
<b>54</b>	-43.03	<b>144</b>	-44.91	<b>234</b>	-40.45	<b>324</b>	-51.58
<b>63</b>	-44.56	<b>153</b>	-45.04	<b>243</b>	-42.97	<b>333</b>	-49.32
<b>72</b>	-45.68	<b>162</b>	-44.55	<b>252</b>	-44.52	<b>342</b>	-47
<b>81</b>	-46.03	<b>171</b>	-42.4	<b>261</b>	-45.03	<b>351</b>	-47.3
<b>90</b>	-45.42	<b>180</b>	-40.41	<b>270</b>	-43.74	<b>360</b>	-47.52

Tabla IV.22: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ **Elevación -20° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-32.34

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-31.95	<b>99</b>	-32.38	<b>189</b>	-34.45	<b>279</b>	-38.02
<b>18</b>	-31.82	<b>108</b>	-35.82	<b>198</b>	-33.17	<b>288</b>	-35.9
<b>27</b>	-32.16	<b>117</b>	-40.84	<b>207</b>	-34.02	<b>297</b>	-36.2
<b>36</b>	-32.46	<b>126</b>	-43.38	<b>216</b>	-36.16	<b>306</b>	-37.34
<b>45</b>	-32.76	<b>135</b>	-41.74	<b>225</b>	-37.98	<b>315</b>	-38.2
<b>54</b>	-33.58	<b>144</b>	-40.42	<b>234</b>	-37.99	<b>324</b>	-37.51
<b>63</b>	-36.82	<b>153</b>	-40.3	<b>243</b>	-38.18	<b>333</b>	-35.17
<b>72</b>	-45.45	<b>162</b>	-40.26	<b>252</b>	-38.48	<b>342</b>	-34.59
<b>81</b>	-35.97	<b>171</b>	-39.52	<b>261</b>	-39.85	<b>351</b>	-33.41
<b>90</b>	-32.23	<b>180</b>	-36.86	<b>270</b>	-40.8	<b>360</b>	33.1

Tabla IV.23: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación -20° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ **Elevación -30° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-34.08

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-33.64	<b>99</b>	-33.34	<b>189</b>	-35.08	<b>279</b>	-42.22
<b>18</b>	-33.04	<b>108</b>	-36.59	<b>198</b>	-34.13	<b>288</b>	-40.39
<b>27</b>	-33.21	<b>117</b>	-41.61	<b>207</b>	-34.8	<b>297</b>	-37.45
<b>36</b>	-32.96	<b>126</b>	-43	<b>216</b>	-37.1	<b>306</b>	-36.93
<b>45</b>	-32.62	<b>135</b>	-42.04	<b>225</b>	-38.8	<b>315</b>	-37.03
<b>54</b>	-33.6	<b>144</b>	-40.64	<b>234</b>	-38.09	<b>324</b>	-37.18
<b>63</b>	-36.82	<b>153</b>	-40.32	<b>243</b>	-37.57	<b>333</b>	-37.18
<b>72</b>	-47.46	<b>162</b>	-40.49	<b>252</b>	-37.63	<b>342</b>	-36.02
<b>81</b>	-37.57	<b>171</b>	-39.82	<b>261</b>	-37.51	<b>351</b>	-35.54
<b>90</b>	-33.2	<b>180</b>	-37.4	<b>270</b>	-39.07	<b>360</b>	-37.53

Tabla IV.24: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación -30° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación  $-45^\circ$  - Resolución de  $9^\circ$ :

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-37.6

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-37.57	<b>99</b>	-38.82	<b>189</b>	-38.58	<b>279</b>	-49.42
<b>18</b>	-36.55	<b>108</b>	-42.3	<b>198</b>	-37.2	<b>288</b>	-43.56
<b>27</b>	-35.61	<b>117</b>	-48.96	<b>207</b>	-36.6	<b>297</b>	-39.57
<b>36</b>	-34.47	<b>126</b>	-50	<b>216</b>	-37.36	<b>306</b>	-37.83
<b>45</b>	-33.82	<b>135</b>	-46.85	<b>225</b>	-38.98	<b>315</b>	-37.1
<b>54</b>	-34.58	<b>144</b>	-43.64	<b>234</b>	-39.89	<b>324</b>	-36.96
<b>63</b>	-37.96	<b>153</b>	-41.81	<b>243</b>	-39.79	<b>333</b>	-37.28
<b>72</b>	-48.38	<b>162</b>	-41.12	<b>252</b>	-39.62	<b>342</b>	-37.08
<b>81</b>	-45.48	<b>171</b>	-40.98	<b>261</b>	-40.86	<b>351</b>	-37.2
<b>90</b>	-38.95	<b>180</b>	-40.21	<b>270</b>	-45.45	<b>360</b>	-37.13

Tabla IV.25: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación  $-45^\circ$  – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación  $90^\circ$  - Resolución de  $9^\circ$ :

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-44.68

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-44.75	<b>99</b>	-46.69	<b>189</b>	-43.29	<b>279</b>	-45.12
<b>18</b>	-44.06	<b>108</b>	-46.84	<b>198</b>	-42.95	<b>288</b>	-45.54
<b>27</b>	-43.72	<b>117</b>	-46.42	<b>207</b>	-42.72	<b>297</b>	-45.25
<b>36</b>	-43.41	<b>126</b>	-46.38	<b>216</b>	-42.85	<b>306</b>	-45.62
<b>45</b>	-43.57	<b>135</b>	-45.75	<b>225</b>	-43.16	<b>315</b>	-46.29
<b>54</b>	-43.54	<b>144</b>	-44.77	<b>234</b>	-43.56	<b>324</b>	-46.05
<b>63</b>	-44.24	<b>153</b>	-44.22	<b>243</b>	-43.72	<b>333</b>	-47.27
<b>72</b>	-44.69	<b>162</b>	-44.14	<b>252</b>	-44.72	<b>342</b>	-47.69
<b>81</b>	-45.68	<b>171</b>	-43.51	<b>261</b>	-45.49	<b>351</b>	-47.39
<b>90</b>	-46.37	<b>180</b>	-43.5	<b>270</b>	-45.35	<b>360</b>	-45.19

Tabla IV.26: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación  $90^\circ$  – Antena Yagi – 911 [MHz].



En las siguientes tablas se muestra la potencia de recepción del sistema, dentro de la cámara anecoica, considerando diferentes grados de elevación, con un azimut entre 0° - 360°, trabajando con la antena de prueba Yagi a 2.4 [GHz].

▪ **Elevación 0° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-22.41

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-23.68	<b>99</b>	-39.28	<b>189</b>	-31.7	<b>279</b>	-32.56
<b>18</b>	-22.3	<b>108</b>	-43.21	<b>198</b>	-30.66	<b>288</b>	-31.86
<b>27</b>	-24.05	<b>117</b>	-41.22	<b>207</b>	-33.42	<b>297</b>	-32.2
<b>36</b>	-27.7	<b>126</b>	-39.76	<b>216</b>	-34.55	<b>306</b>	-35.06
<b>45</b>	-35.9	<b>135</b>	-36.87	<b>225</b>	-45.98	<b>315</b>	-42.05
<b>54</b>	-39.3	<b>144</b>	-35.61	<b>234</b>	-32.08	<b>324</b>	-29
<b>63</b>	-34.96	<b>153</b>	-37.54	<b>243</b>	-37.47	<b>333</b>	-26
<b>72</b>	-44.5	<b>162</b>	-36.09	<b>252</b>	-31.95	<b>342</b>	-24.73
<b>81</b>	-45.07	<b>171</b>	-40.68	<b>261</b>	-34.13	<b>351</b>	-23.33
<b>90</b>	-44.74	<b>180</b>	-40.58	<b>270</b>	-34.6	<b>360</b>	-23.36

Tabla IV.27: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].

▪ **Elevación 20° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-24.85

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-26.4	<b>99</b>	-45.46	<b>189</b>	-31.5	<b>279</b>	-32.86
<b>18</b>	-30.01	<b>108</b>	-40.22	<b>198</b>	-32.83	<b>288</b>	-32.22
<b>27</b>	-29.8	<b>117</b>	-48.56	<b>207</b>	-31.7	<b>297</b>	-32.63
<b>36</b>	-34.67	<b>126</b>	-42.57	<b>216</b>	-31.64	<b>306</b>	-33.21
<b>45</b>	-44.4	<b>135</b>	-41.37	<b>225</b>	-38.77	<b>315</b>	-33.43
<b>54</b>	-36.83	<b>144</b>	-35.18	<b>234</b>	-37.88	<b>324</b>	-37.86
<b>63</b>	-36.84	<b>153</b>	-32.88	<b>243</b>	-33.21	<b>333</b>	-32.86
<b>72</b>	-49.88	<b>162</b>	-30.58	<b>252</b>	-39.52	<b>342</b>	-28.08

<b>81</b>	-42.36	<b>171</b>	-29.21	<b>261</b>	-35.39	<b>351</b>	-26.01
<b>90</b>	-50.3	<b>180</b>	-29.02	<b>270</b>	-31.91	<b>360</b>	-25.49

**Tabla IV.28: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 20° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación 30° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-29.59

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-32.54	<b>99</b>	-45.81	<b>189</b>	-32.4	<b>279</b>	-35.5
<b>18</b>	-32.53	<b>108</b>	-43.86	<b>198</b>	-33.1	<b>288</b>	-36.12
<b>27</b>	-35.04	<b>117</b>	-43	<b>207</b>	-32.5	<b>297</b>	-34.29
<b>36</b>	-41.97	<b>126</b>	-42.51	<b>216</b>	-30.86	<b>306</b>	-32.9
<b>45</b>	-41.51	<b>135</b>	-40.6	<b>225</b>	-34.12	<b>315</b>	-32.16
<b>54</b>	-39.61	<b>144</b>	-38.11	<b>234</b>	-49.37	<b>324</b>	-34.02
<b>63</b>	-49.92	<b>153</b>	-36.68	<b>243</b>	-34.43	<b>333</b>	-34.76
<b>72</b>	-42.19	<b>162</b>	-32.46	<b>252</b>	-31.3	<b>342</b>	-31.72
<b>81</b>	-45.21	<b>171</b>	-31.28	<b>261</b>	-38.4	<b>351</b>	-30.46
<b>90</b>	-49.98	<b>180</b>	-31.29	<b>270</b>	-33.86	<b>360</b>	-30.26

**Tabla IV.29: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 30° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación 45° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-45.62

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-49.92	<b>99</b>	-44.34	<b>189</b>	-35.18	<b>279</b>	-44.96
<b>18</b>	-48.48	<b>108</b>	-41.38	<b>198</b>	-34.26	<b>288</b>	-38.14
<b>27</b>	-44.95	<b>117</b>	-40.83	<b>207</b>	-33.14	<b>297</b>	-35.18
<b>36</b>	-47.05	<b>126</b>	-40.65	<b>216</b>	-35.95	<b>306</b>	-31.92
<b>45</b>	-45.89	<b>135</b>	-43.82	<b>225</b>	-52.32	<b>315</b>	-31.36
<b>54</b>	-42.32	<b>144</b>	-50.87	<b>234</b>	-37.25	<b>324</b>	-31.32

<b>63</b>	-42.75	<b>153</b>	-49.02	<b>243</b>	-32.38	<b>333</b>	-32.58
<b>72</b>	-45	<b>162</b>	-41.54	<b>252</b>	-31.7	<b>342</b>	-36.24
<b>81</b>	-51.09	<b>171</b>	-38.16	<b>261</b>	-35.4	<b>351</b>	-40.36
<b>90</b>	-49.5	<b>180</b>	-35.12	<b>270</b>	-47.06	<b>360</b>	-42.25

**Tabla IV.30: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación -20° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-24.18

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-25.22	<b>99</b>	-48.84	<b>189</b>	-36.06	<b>279</b>	-32.45
<b>18</b>	-27.53	<b>108</b>	-42.23	<b>198</b>	-42.72	<b>288</b>	-31.2
<b>27</b>	-31.11	<b>117</b>	-43.87	<b>207</b>	-36.52	<b>297</b>	-33.31
<b>36</b>	-32.25	<b>126</b>	-45.35	<b>216</b>	-32.99	<b>306</b>	-32.09
<b>45</b>	-34.88	<b>135</b>	-47.12	<b>225</b>	-40.28	<b>315</b>	-32.2
<b>54</b>	-40.26	<b>144</b>	-38.14	<b>234</b>	-33.44	<b>324</b>	-35.2
<b>63</b>	-37.81	<b>153</b>	-45.13	<b>243</b>	-38.28	<b>333</b>	-33.38
<b>72</b>	-38.45	<b>162</b>	-38.97	<b>252</b>	-38.58	<b>342</b>	-26.67
<b>81</b>	-46.74	<b>171</b>	-33	<b>261</b>	-32.44	<b>351</b>	-24.92
<b>90</b>	-42.84	<b>180</b>	-32.71	<b>270</b>	-33.88	<b>360</b>	-23.87

**Tabla IV.31: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación -20° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación -30° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-33.29

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-34.47	<b>99</b>	-52.43	<b>189</b>	-37.48	<b>279</b>	-43.16
<b>18</b>	-45.27	<b>108</b>	-37.94	<b>198</b>	-39.59	<b>288</b>	-33.57
<b>27</b>	-45.8	<b>117</b>	-35.83	<b>207</b>	-37.16	<b>297</b>	-39.44
<b>36</b>	-38.99	<b>126</b>	-45.54	<b>216</b>	-39.09	<b>306</b>	-40.1

<b>45</b>	-36.82	<b>135</b>	-52.25	<b>225</b>	-34.24	<b>315</b>	-41.42
<b>54</b>	-34.96	<b>144</b>	-39.72	<b>234</b>	-41.12	<b>324</b>	-43.62
<b>63</b>	-35.24	<b>153</b>	-38.96	<b>243</b>	-38.32	<b>333</b>	-43.32
<b>72</b>	-42.86	<b>162</b>	-48.07	<b>252</b>	-34.14	<b>342</b>	-42.61
<b>81</b>	-43.49	<b>171</b>	-39.53	<b>261</b>	-30.05	<b>351</b>	-35.03
<b>90</b>	-41.52	<b>180</b>	-36.59	<b>270</b>	-31.16	<b>360</b>	-32.26

**Tabla IV.32: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación -30° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación -45° - Resolución de 9°:**

<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>0</b>	-39.15

<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>9</b>	-38.26	<b>99</b>	-39.12	<b>189</b>	-35.92	<b>279</b>	-36.26
<b>18</b>	-35.97	<b>108</b>	-34.15	<b>198</b>	-35.59	<b>288</b>	-33.24
<b>27</b>	-38.82	<b>117</b>	-31.66	<b>207</b>	-33.84	<b>297</b>	-35
<b>36</b>	-43.17	<b>126</b>	-34.61	<b>216</b>	-33.46	<b>306</b>	-44.2
<b>45</b>	-36.73	<b>135</b>	-37.7	<b>225</b>	-41.26	<b>315</b>	-49.18
<b>54</b>	-32.93	<b>144</b>	-44.62	<b>234</b>	-43.46	<b>324</b>	-46.26
<b>63</b>	-40.77	<b>153</b>	-44.18	<b>243</b>	-40.03	<b>333</b>	-45.15
<b>72</b>	-43.71	<b>162</b>	-40.46	<b>252</b>	-33.28	<b>342</b>	-34.29
<b>81</b>	-43.26	<b>171</b>	-39.48	<b>261</b>	-31.68	<b>351</b>	-36.8
<b>90</b>	-38.06	<b>180</b>	-37.88	<b>270</b>	-36.92	<b>360</b>	-40.15

**Tabla IV.33: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación -45° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación 90° - Resolución de 9°:**

<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>0</b>	-41.44

<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>9</b>	-42.74	<b>99</b>	-44.39	<b>189</b>	-34.8	<b>279</b>	-38.95
<b>18</b>	-43.71	<b>108</b>	-47.62	<b>198</b>	-35.86	<b>288</b>	-38.12
<b>27</b>	-43.82	<b>117</b>	-39.92	<b>207</b>	-37.16	<b>297</b>	-34.78

<b>36</b>	-44.27	<b>126</b>	-38.43	<b>216</b>	-37.75	<b>306</b>	-35.49
<b>45</b>	-41.95	<b>135</b>	-37.5	<b>225</b>	-38.25	<b>315</b>	-37.93
<b>54</b>	-42.55	<b>144</b>	-37.96	<b>234</b>	-40.78	<b>324</b>	-35.92
<b>63</b>	-41.12	<b>153</b>	-37.86	<b>243</b>	-50.72	<b>333</b>	-36.66
<b>72</b>	-38.97	<b>162</b>	-36.72	<b>252</b>	-44.7	<b>342</b>	-38.04
<b>81</b>	-38.74	<b>171</b>	-36.42	<b>261</b>	-40	<b>351</b>	-37.64
<b>90</b>	-38.93	<b>180</b>	-35.54	<b>270</b>	-39.38	<b>360</b>	-42.01

**Tabla IV.34: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

En las siguientes tablas se muestra la potencia de recepción del sistema, dentro de la cámara anecoica, considerando diferentes grados de elevación, con un azimut entre 0° - 360°, trabajando con la antena de prueba Omnidireccional a 2.4 [GHz].

**▪ Elevación 0° - Resolución de 9°:**

<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>0</b>	-48.28

<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>	<b>Azimut [°]</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>9</b>	-44.43	<b>99</b>	-54.58	<b>189</b>	-42.14	<b>279</b>	-53.37
<b>18</b>	-43.01	<b>108</b>	-50.64	<b>198</b>	-41.27	<b>288</b>	-50.46
<b>27</b>	-44.57	<b>117</b>	-48.45	<b>207</b>	-38.81	<b>297</b>	-53.64
<b>36</b>	-44.04	<b>126</b>	-48.9	<b>216</b>	-37.89	<b>306</b>	-47.58
<b>45</b>	-44.88	<b>135</b>	-48.65	<b>225</b>	-38.69	<b>315</b>	-52.68
<b>54</b>	-43.5	<b>144</b>	-50.24	<b>234</b>	-39.43	<b>324</b>	-52.77
<b>63</b>	-45.62	<b>153</b>	-45.71	<b>243</b>	-41.1	<b>333</b>	-50.35
<b>72</b>	-45.89	<b>162</b>	-47.32	<b>252</b>	-43.77	<b>342</b>	-49.38
<b>81</b>	-46.45	<b>171</b>	-46.07	<b>261</b>	-42.95	<b>351</b>	-49.99
<b>90</b>	-53.18	<b>180</b>	-45.54	<b>270</b>	-50.23	<b>360</b>	-44.69

**Tabla IV.35: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación 45° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-41.07

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-45.76	<b>99</b>	-43.97	<b>189</b>	-45.5	<b>279</b>	-40.68
<b>18</b>	-43.43	<b>108</b>	-49.13	<b>198</b>	-45.84	<b>288</b>	-38.17
<b>27</b>	-40.84	<b>117</b>	-45.6	<b>207</b>	-44.46	<b>297</b>	-38.33
<b>36</b>	-41.9	<b>126</b>	-55.28	<b>216</b>	-48.08	<b>306</b>	-38.34
<b>45</b>	-41.3	<b>135</b>	-51.02	<b>225</b>	-55.38	<b>315</b>	-39.61
<b>54</b>	-40.57	<b>144</b>	-48.11	<b>234</b>	-46.98	<b>324</b>	-43.16
<b>63</b>	-42.26	<b>153</b>	-50.4	<b>243</b>	-42.66	<b>333</b>	-43.16
<b>72</b>	-44.24	<b>162</b>	-47.93	<b>252</b>	-42.06	<b>342</b>	-41.5
<b>81</b>	-42.38	<b>171</b>	-49.33	<b>261</b>	-42.88	<b>351</b>	-42.73
<b>90</b>	-40.44	<b>180</b>	-47.48	<b>270</b>	-41.39	<b>360</b>	-42.96

**Tabla IV.36: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación -45° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-42.93

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-47.24	<b>99</b>	-49.19	<b>189</b>	-47.84	<b>279</b>	-45.69
<b>18</b>	-43.81	<b>108</b>	-44.84	<b>198</b>	-47.12	<b>288</b>	-43.41
<b>27</b>	-45.42	<b>117</b>	-47.21	<b>207</b>	-49.25	<b>297</b>	-48.93
<b>36</b>	-44.71	<b>126</b>	-46.44	<b>216</b>	-49.53	<b>306</b>	-54.3
<b>45</b>	-52.43	<b>135</b>	-47.74	<b>225</b>	-46.13	<b>315</b>	-50.79
<b>54</b>	-43.76	<b>144</b>	-47.1	<b>234</b>	-49.46	<b>324</b>	-43.95
<b>63</b>	-45.22	<b>153</b>	-54.82	<b>243</b>	-49.4	<b>333</b>	-49.12
<b>72</b>	-50.12	<b>162</b>	-55.22	<b>252</b>	-56.48	<b>342</b>	-44.42
<b>81</b>	-44.64	<b>171</b>	-54.18	<b>261</b>	-55.3	<b>351</b>	-46.7
<b>90</b>	-46.42	<b>180</b>	-48.26	<b>270</b>	-48.39	<b>360</b>	-44.9

**Tabla IV.37: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación -45° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**

▪ **Elevación 90° - Resolución de 9°:**

Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>0</b>	-54.33

Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]	Azimut [°]	Potencia [dBm]
<b>9</b>	-54.39	<b>99</b>	-56.14	<b>189</b>	-55.33	<b>279</b>	-56.51
<b>18</b>	-55.1	<b>108</b>	-55.87	<b>198</b>	-55.46	<b>288</b>	-56.39
<b>27</b>	-55.17	<b>117</b>	-55.62	<b>207</b>	-55.68	<b>297</b>	-56.24
<b>36</b>	-55.08	<b>126</b>	-55.91	<b>216</b>	-55.73	<b>306</b>	-56.11
<b>45</b>	-55.32	<b>135</b>	-56.01	<b>225</b>	-55.88	<b>315</b>	-55.93
<b>54</b>	-55.49	<b>144</b>	-55.47	<b>234</b>	-56.3	<b>324</b>	-55.77
<b>63</b>	-55.36	<b>153</b>	-55.34	<b>243</b>	-56.48	<b>333</b>	-55.41
<b>72</b>	-55.61	<b>162</b>	-55.86	<b>252</b>	-56.97	<b>342</b>	-55.29
<b>81</b>	-55.83	<b>171</b>	-55.79	<b>261</b>	-56.99	<b>351</b>	-54.96
<b>90</b>	-55.95	<b>180</b>	-55.11	<b>270</b>	-56.54	<b>360</b>	-54.44

**Tabla IV.38: Mediciones Potencia de Recepción – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**

Para los valores de potencia de transmisión, fueron necesarios una serie de cálculos, basados en las formulas que se presentan a continuación:

La potencia de recepción, está dada por la siguiente fórmula:

$$P_{Rx} = P_{Tx} - La_{Tx} + Ga_{Tx} - L_{bf} + Ga_{Rx} - La_{Rx} \quad (4.1)$$

Donde:

$P_{Rx}$  : Potencia de recepción.

$P_{Tx}$  : Potencia de transmisión.

$La_{Tx}$  : Pérdida del cable en la antena de transmisión.

$Ga_{Tx}$  : Ganancia de la antena de transmisión.

$L_{bf}$  : Pérdida básica del medio.

$Ga_{Rx}$  : Ganancia de la antena de recepción.

$L_{a_{Rx}}$  : Pérdida del cable en la antena de recepción.

La pérdida básica del medio, está dada por la siguiente fórmula:

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \log(f [MHz]) + 20 \log(D [Km]) \quad (4.2)$$

Donde:

$L_{bf}$  : pérdida básica del medio.

$f$  : Frecuencia de trabajo de la antena.

$D$  : Distancia del sistema de transmisión - recepción.

Debido a que las pruebas fueron realizadas al aire libre, a una distancia de 3 [m] y dentro de la cámara anecoica, a una distancia de 2.2 [m]; la pérdida básica del medio resulta:

$$L_{bf}(\text{Aire Libre})[dB] = 32.45 + 20 \log(f [MHz]) + 20 \log(D [Km])$$

$$L_{bf}(\text{Aire Libre})[dB] = 32.45 + 20 \log(911) + 20 \log(0.003)$$

$$L_{bf}(\text{Aire Libre}) = 41.1828 [dB]$$

$$L_{bf}(\text{Cámara Anecoica})[dB] = 32.45 + 20 \log(f [MHz]) + 20 \log(D [Km])$$

$$L_{bf}(\text{Cámara Anecoica})[dB] = 32.45 + 20 \log(911) + 20 \log(0.0022)$$

$$L_{bf}(\text{Cámara Anecoica}) = 38.4888 [dB]$$

De igual manera, hay que tener en cuenta los siguientes valores, anteriormente mencionados y calculados:

$$\text{pérdida cable antena Tx} = 4.3150 [dB]$$

$$\text{pérdida cable antena Rx} = 3.9699 [dB]$$



$$\text{ganancia antena Tx} = 8.50[\text{dBi}]$$

$$\text{ganancia antena Rx} = 8.50[\text{dBi}]$$

Finalmente, despejando la potencia de transmisión de la Formula 4.1, se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{Tx} = P_{Rx} + La_{Tx} - Ga_{Tx} + L_{bf} - Ga_{Rx} + La_{Rx} \quad (4.3)$$

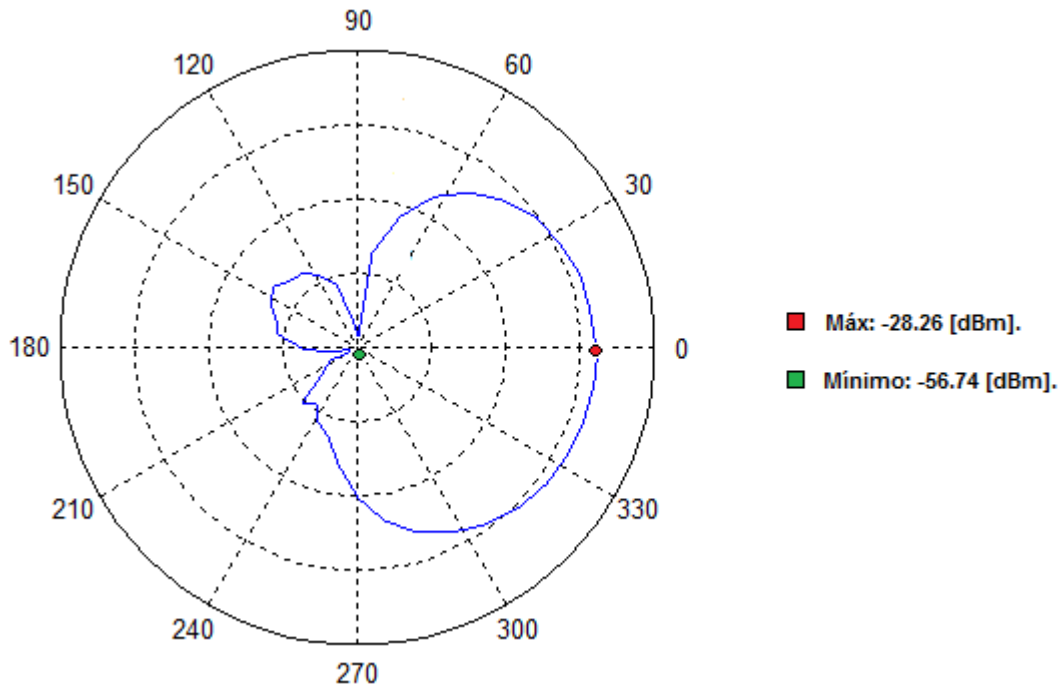
La información acerca de la potencia de transmisión del sistema, se encuentra en el Anexo I, del presente trabajo.

#### 4.3.6 Obtención del Patrón de Radiación Total

El patrón de radiación es la representación gráfica de las características de radiación de una antena en función de su dirección angular (coordenadas en azimut y elevación), que permite visualizar las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena.

En las siguientes figuras se muestra el patrón de radiación de la antena de prueba tipo Yagi a 911 [MHz], en diferentes elevaciones, cuando las mediciones fueron realizadas al aire libre.

Para más detalle sobre la antena de prueba, referirse a la sección 2.2.1 del presente trabajo.

**▪ Elevación 0° - Basado en la Tabla IV.11 – Resolución\* de 9°:****Figura IV.20: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].**

\* **Resolución:** Valor cada cuanto se va a Adquirir un Dato.

▪ Elevación 20° - Basado en la Tabla IV.12 – Resolución de 9°:

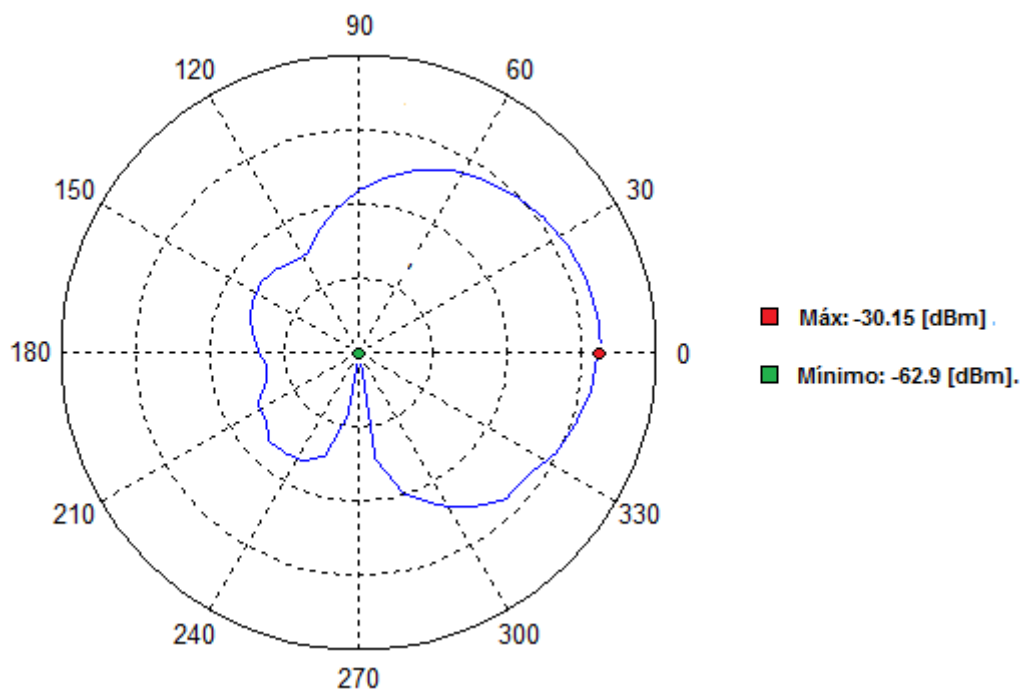


Figura IV.21: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 20°– Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación 30° - Basado en la Tabla IV.13 – Resolución de 9°:

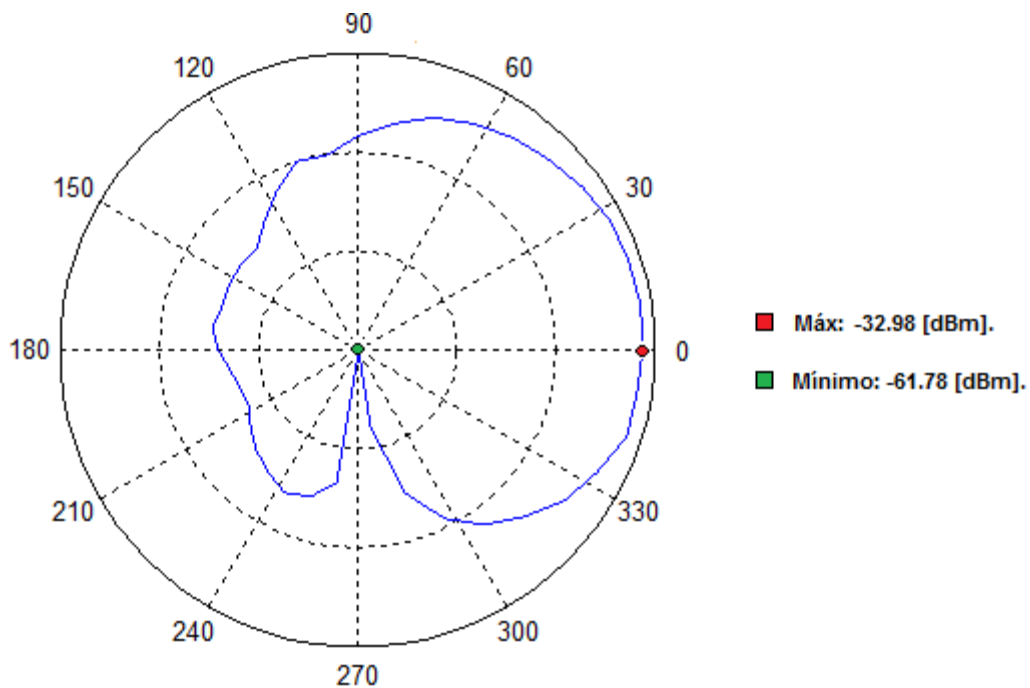


Figura IV.22: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 30° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación 45° - Basado en la Tabla IV.14 – Resolución de 9°:

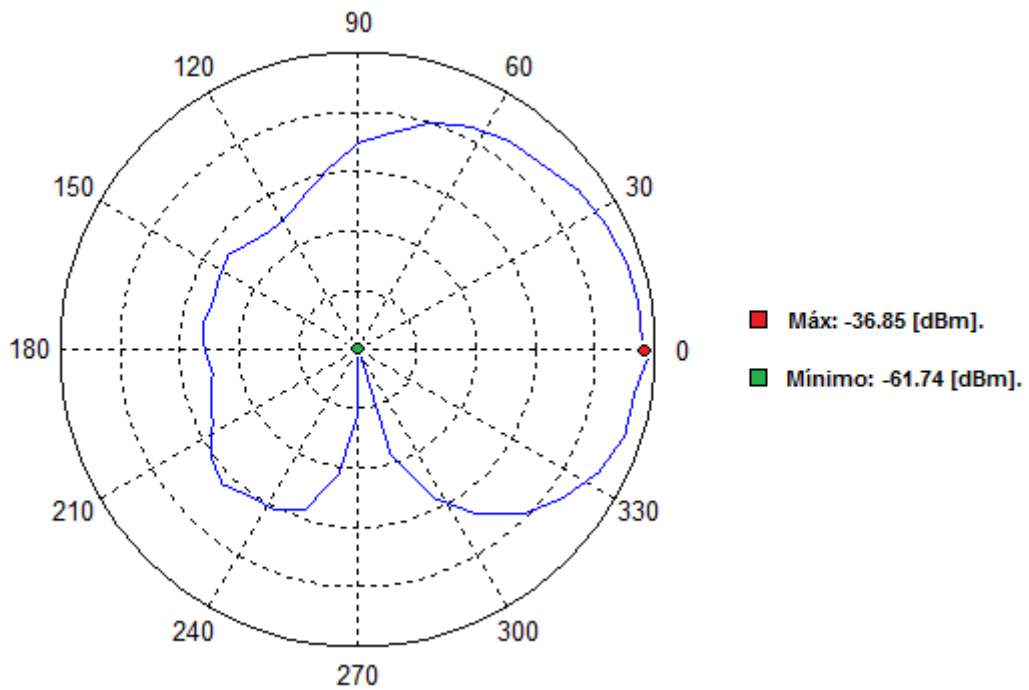


Figura IV.23: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 45° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación -20° - Basado en la Tabla IV.15 – Resolución de 9°:

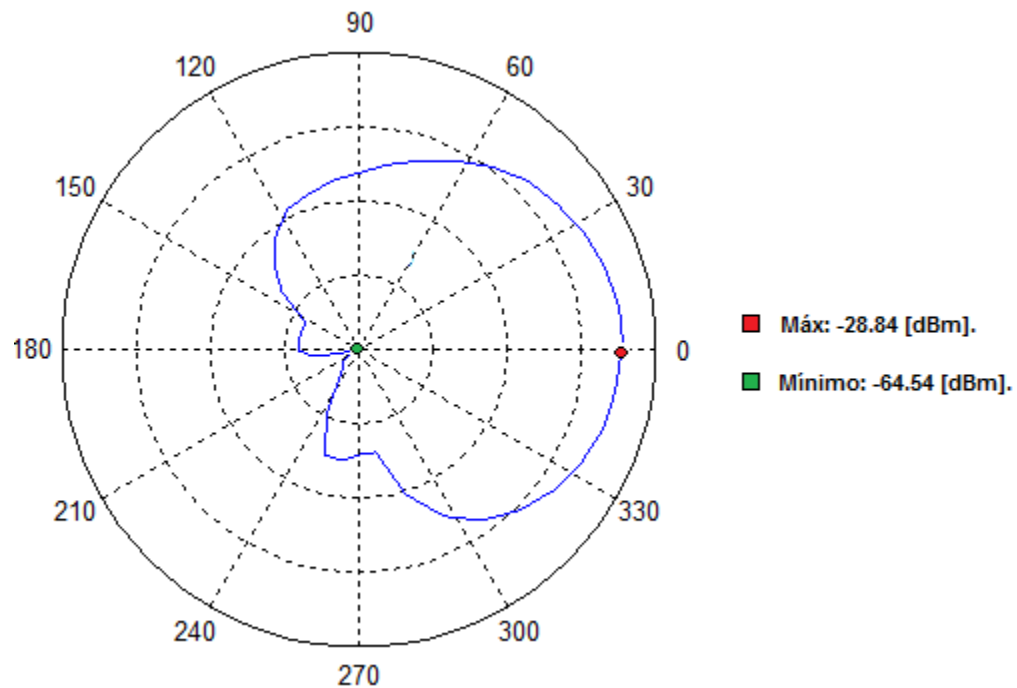


Figura IV.24: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación -20° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación -30° - Basado en la Tabla IV.16 – Resolución de 9°:

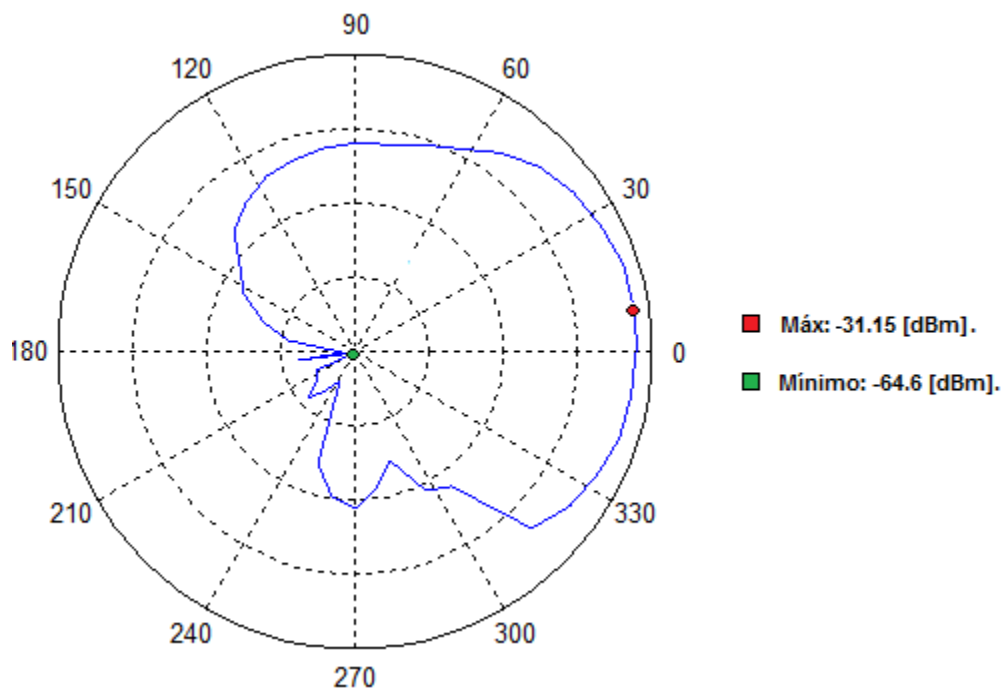


Figura IV.25: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación -30° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación -45° - Basado en la Tabla IV.17 – Resolución de 9°:

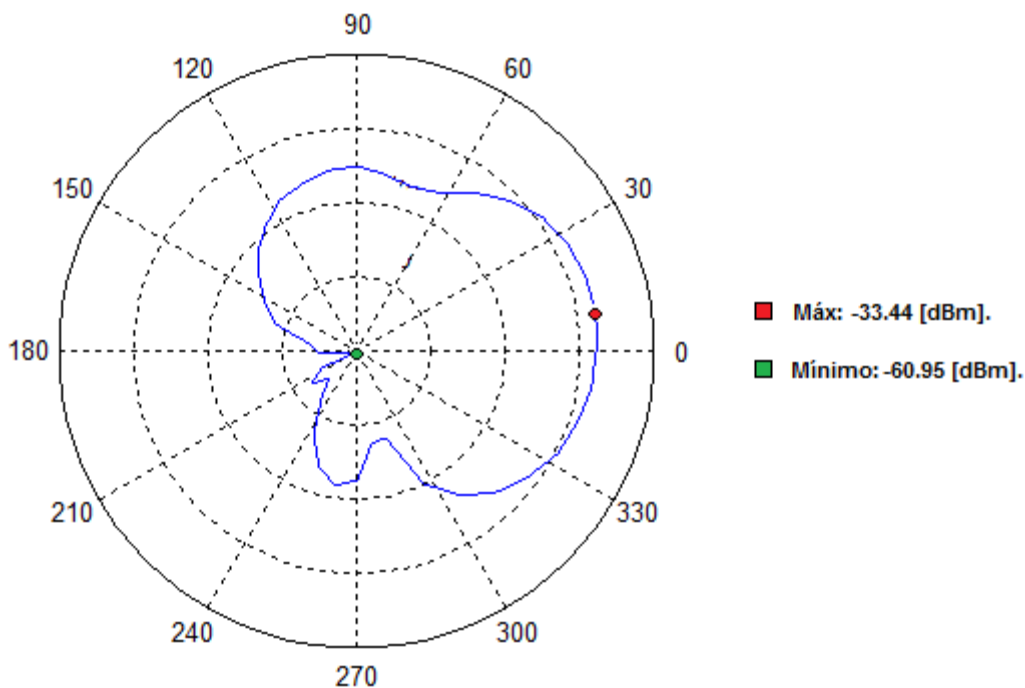
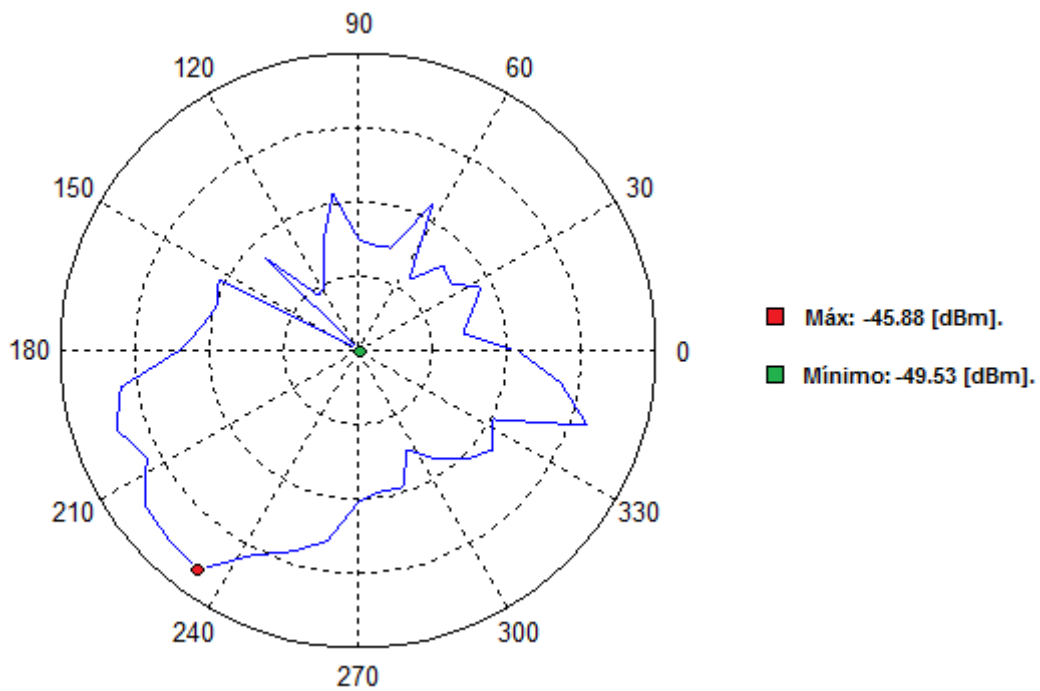


Figura IV.26: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación -45° – Antena Yagi – 911 [MHz].

**▪ Elevación 90° - Basado en la Tabla IV.18 – Resolución de 9°:****Figura IV.27: Patrón Radiación – Aire Libre – Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].**

En las siguientes figuras se muestra el patrón de radiación de la antena de prueba tipo Yagi a 911 [MHz], en diferentes elevaciones, cuando las mediciones fueron realizadas dentro de la cámara anecoica.

Para más detalle sobre la antena de prueba, referirse a la sección 2.2.1 del presente trabajo.

▪ Elevación 0° - Basado en la Tabla IV.19 – Resolución de 9°:

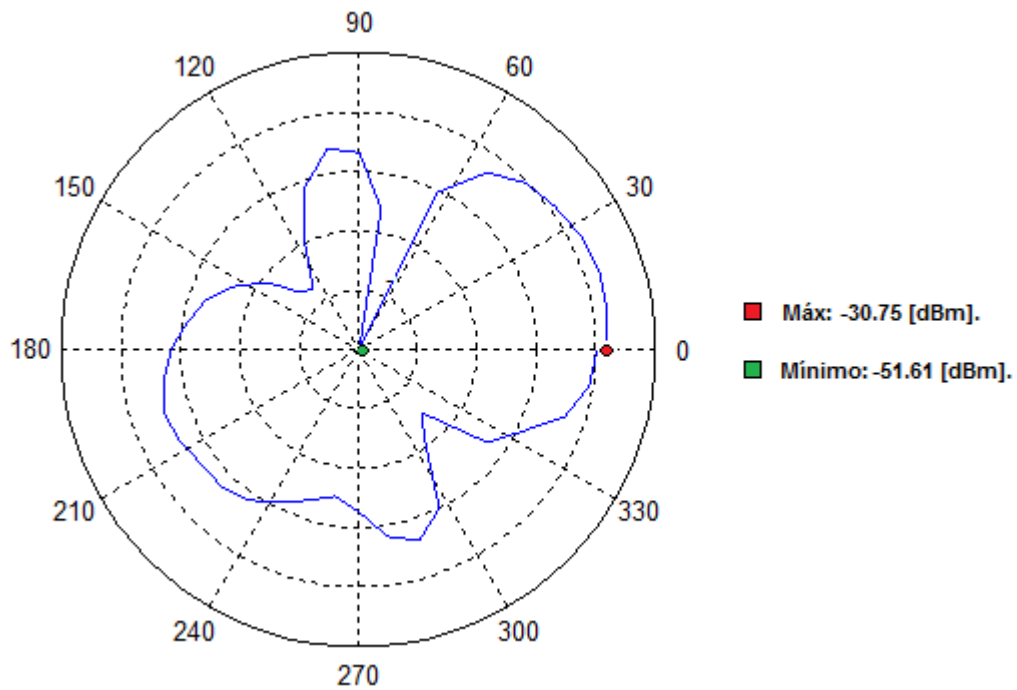


Figura IV.28: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación 20° - Basado en la Tabla IV.20 – Resolución de 9°:

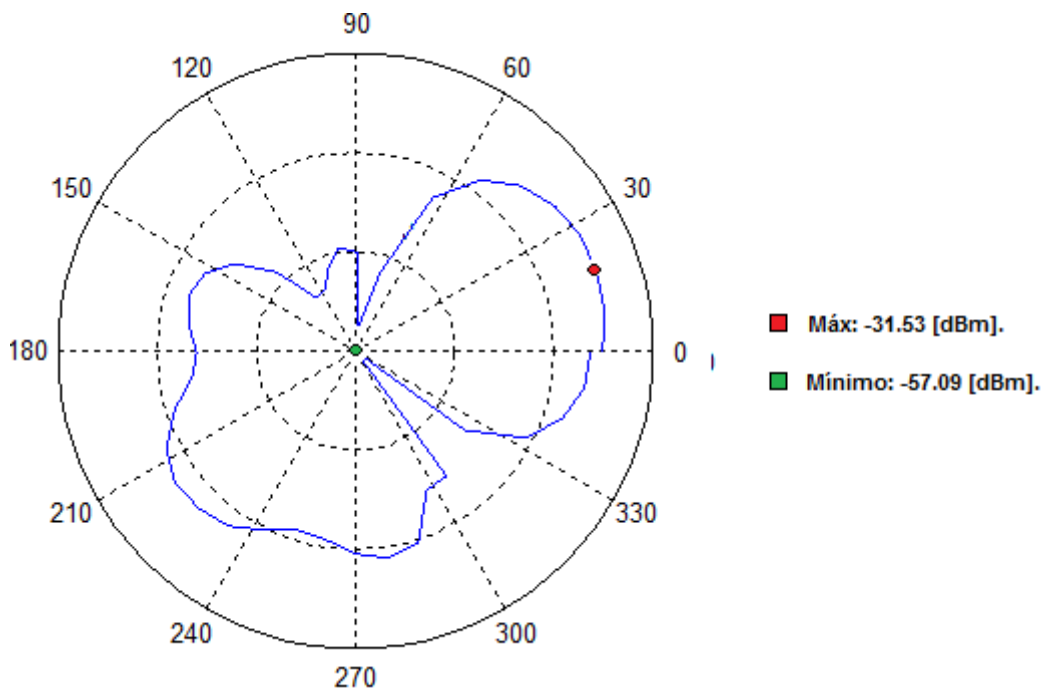


Figura IV.29: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 20° – Antena Yagi – 911 [MHz].

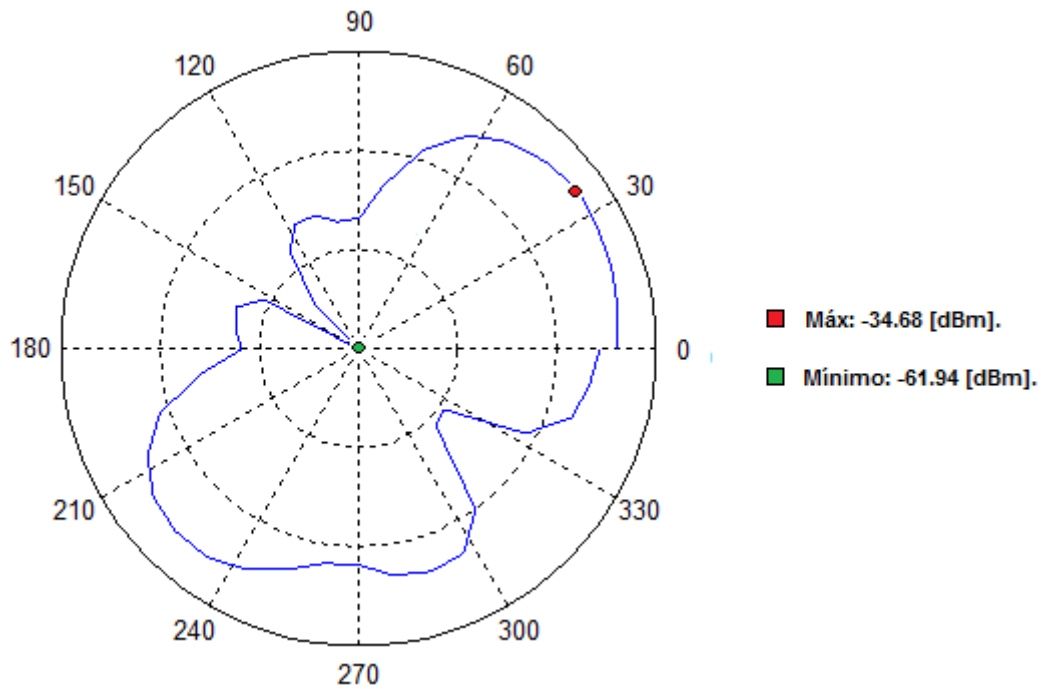
**▪ Elevación 30° - Basado en la Tabla IV.21 – Resolución de 9°:**

Figura IV.30: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 30° – Antena Yagi – 911 [MHz].

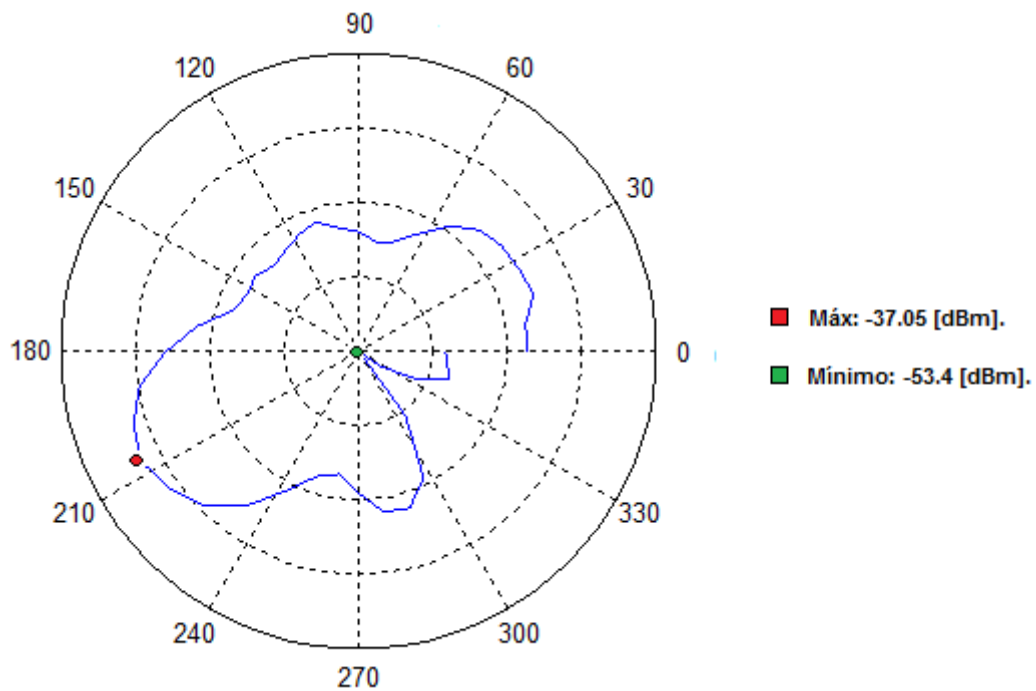
**▪ Elevación 45° - Basado en la Tabla IV.22 – Resolución de 9°:**

Figura IV.31: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Yagi – 911 [MHz].



▪ Elevación -20° - Basado en la Tabla IV.23 – Resolución de 9°:

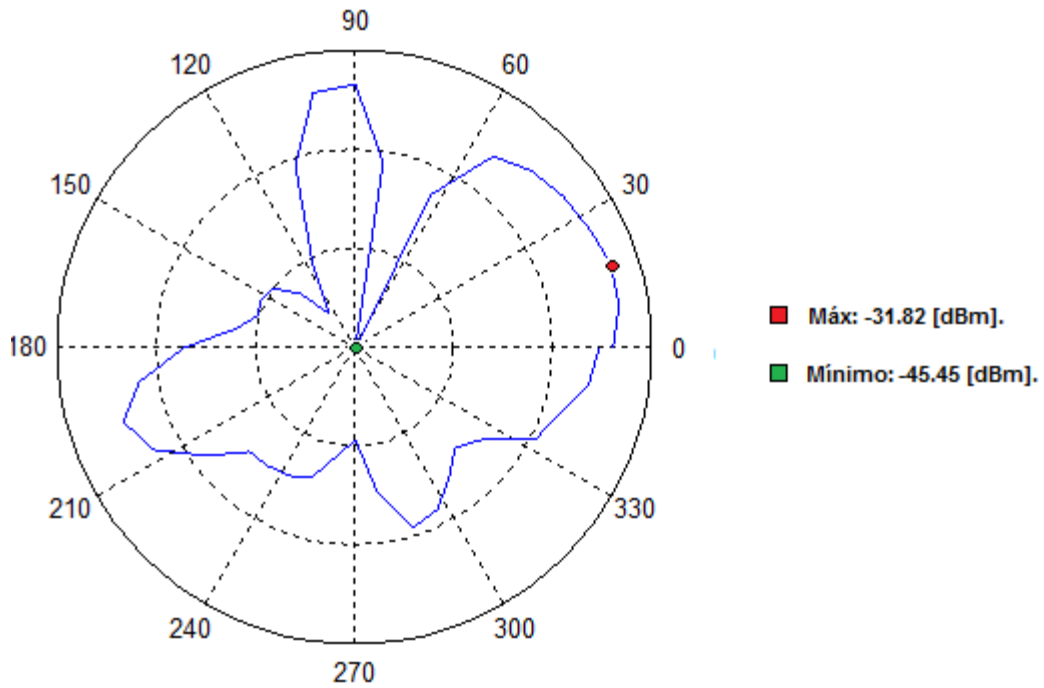


Figura IV.32: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -20° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación -30° - Basado en la Tabla IV.24 – Resolución de 9°:

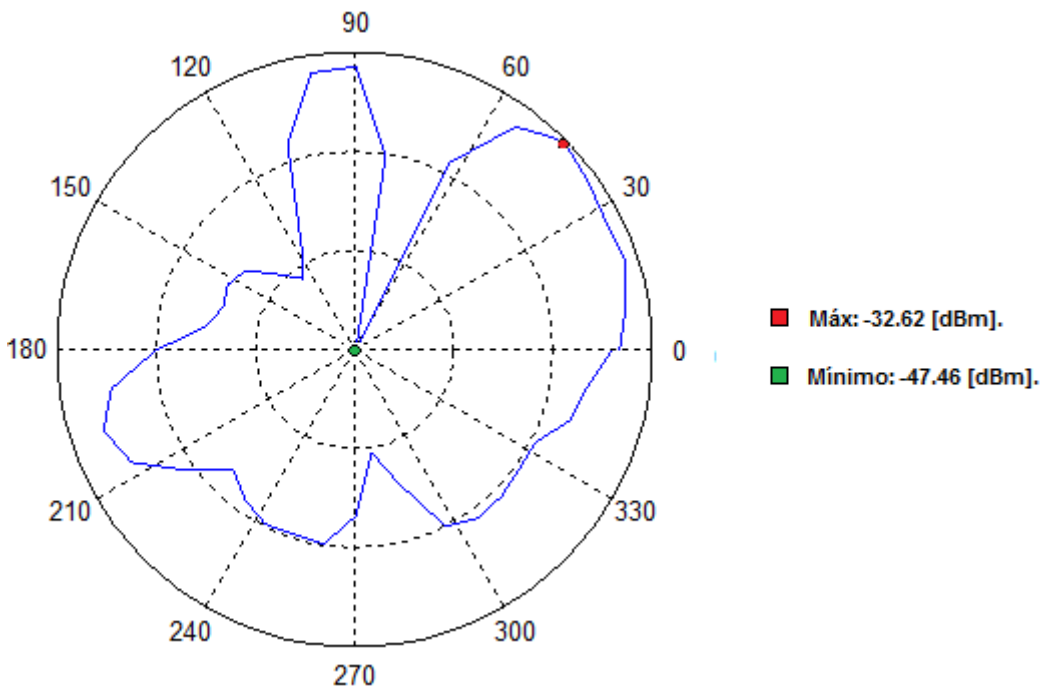


Figura IV.33: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -30° – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación  $-45^\circ$  - Basado en la Tabla IV.25 – Resolución de  $9^\circ$ :

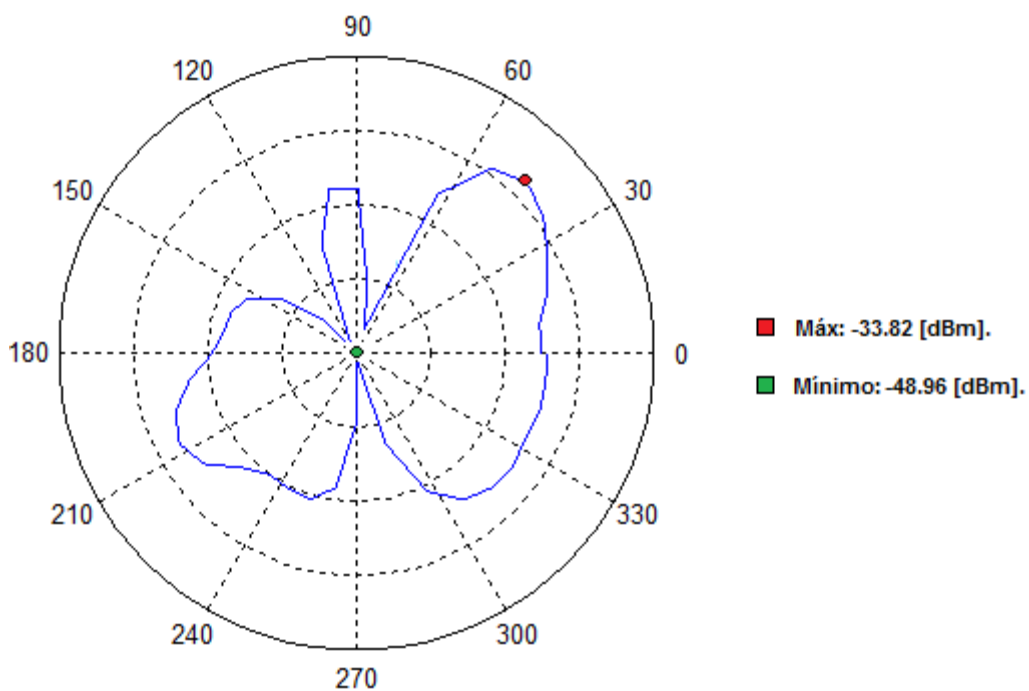


Figura IV.34: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación  $-45^\circ$  – Antena Yagi – 911 [MHz].

▪ Elevación  $90^\circ$  - Basado en la Tabla IV.26 – Resolución de  $9^\circ$ :

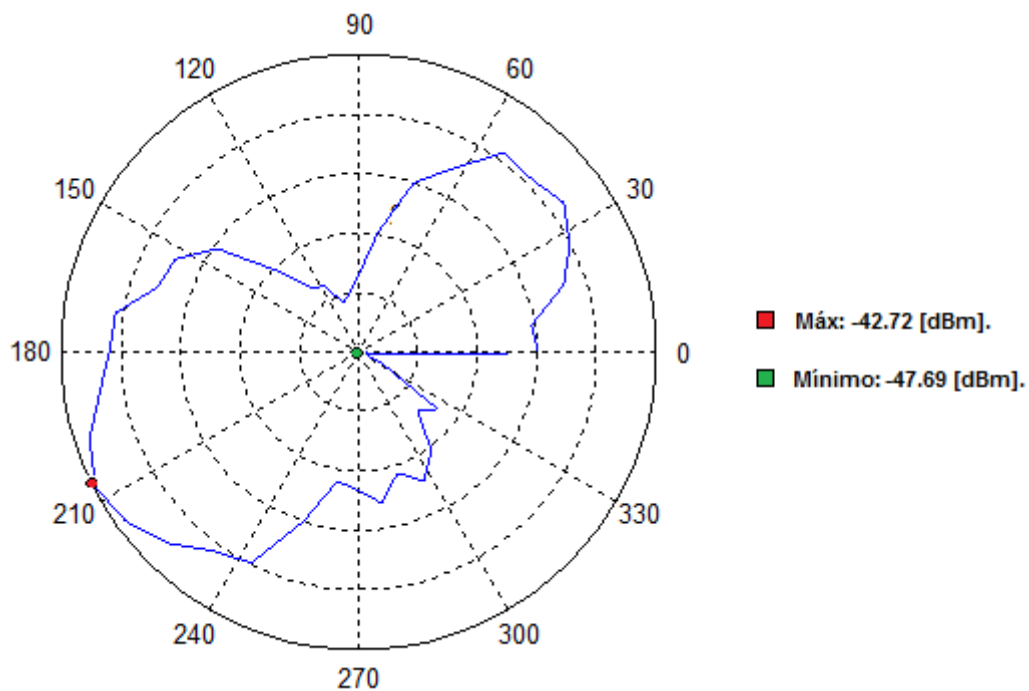
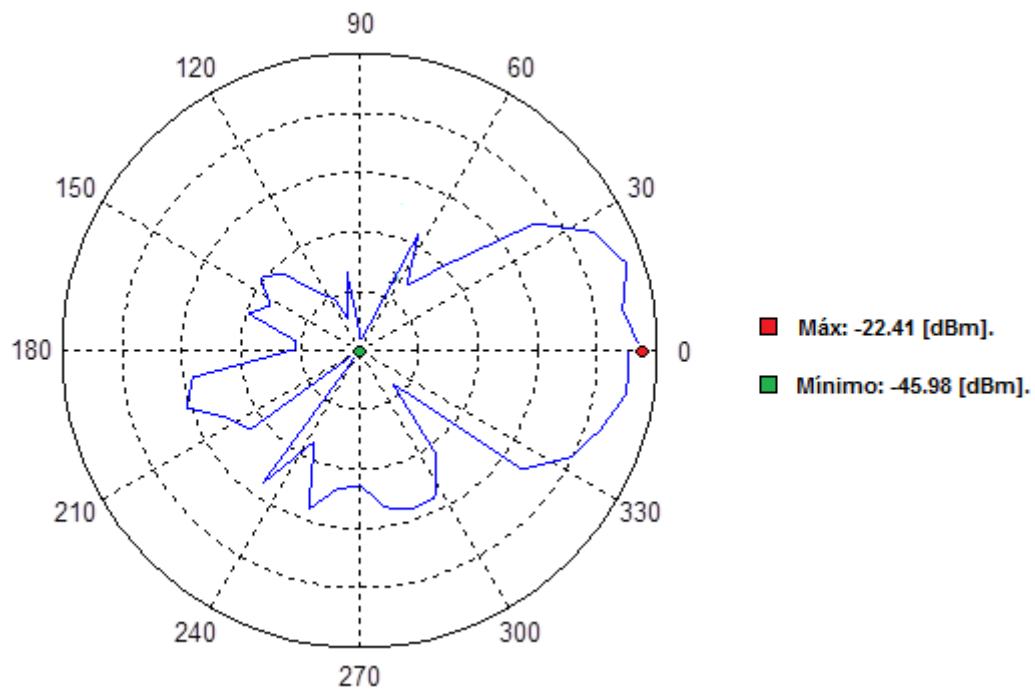


Figura IV.35: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación  $90^\circ$  – Antena Yagi – 911 [MHz].

En las siguientes figuras se muestra el patrón de radiación de la antena de prueba tipo Yagi a 2.4 [GHz], en diferentes elevaciones, cuando las mediciones fueron realizadas dentro de la cámara anecoica.

Para más detalle sobre la antena de prueba, referirse a la sección 2.2.1 del presente trabajo.

▪ **Elevación 0° - Basado en la Tabla IV.27 – Resolución de 9°:**



**Figura IV.36: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

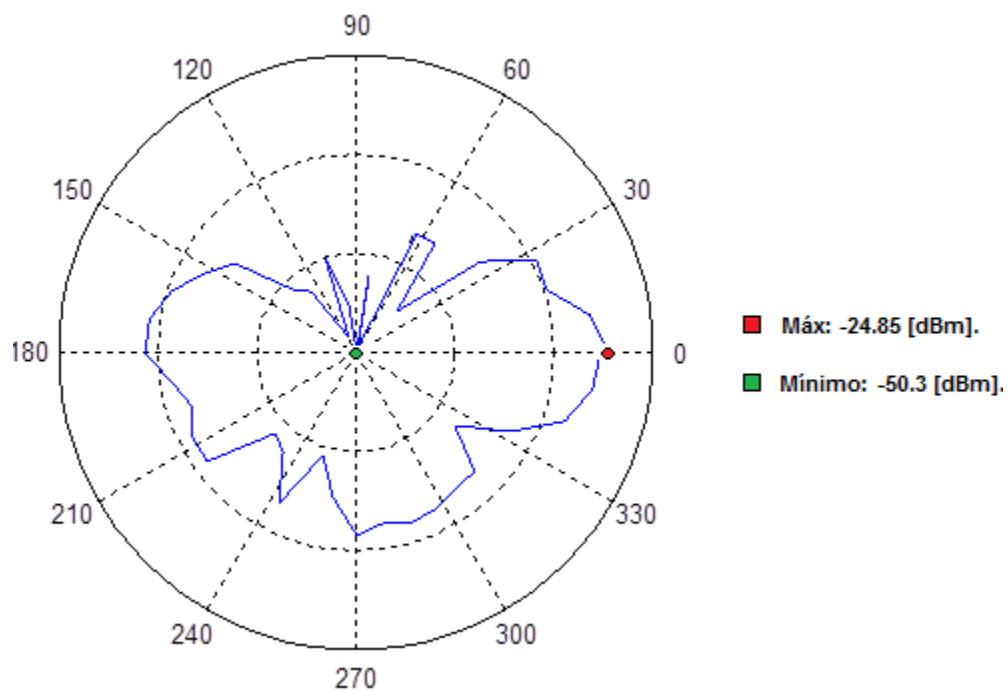
**▪ Elevación 20° - Basado en la Tabla IV.28 – Resolución de 9°:**

Figura IV.37: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 20° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].

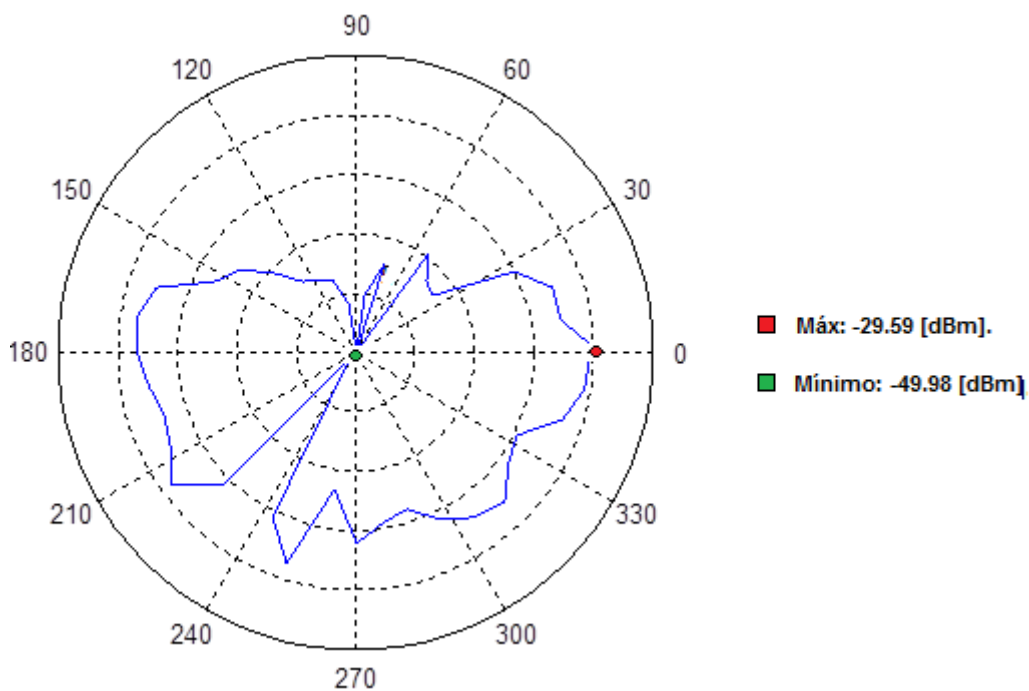
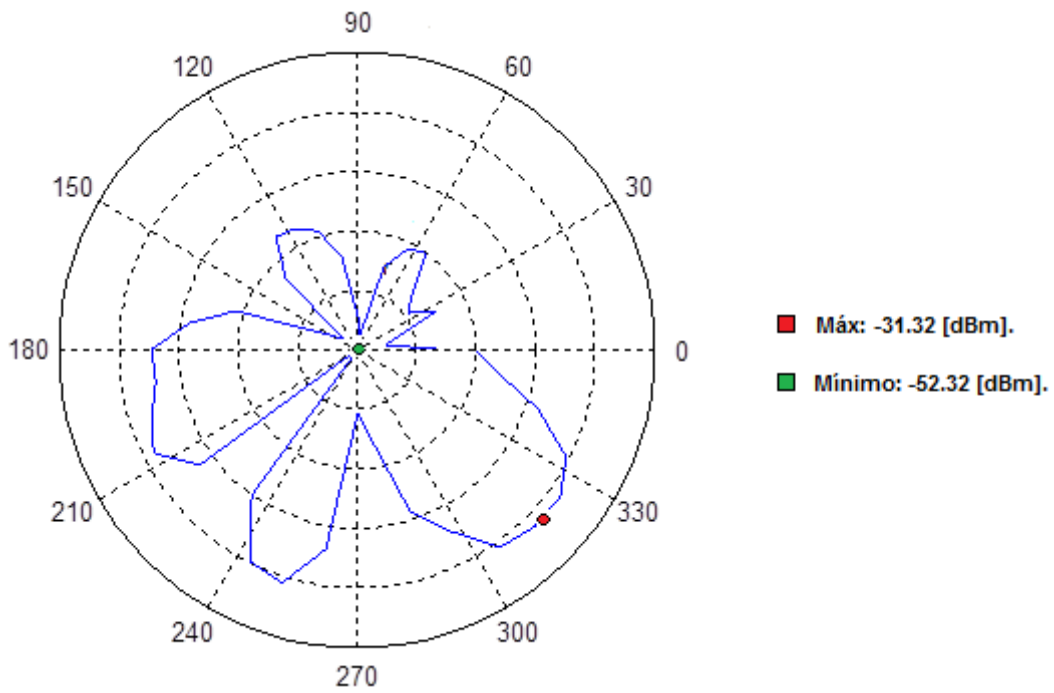
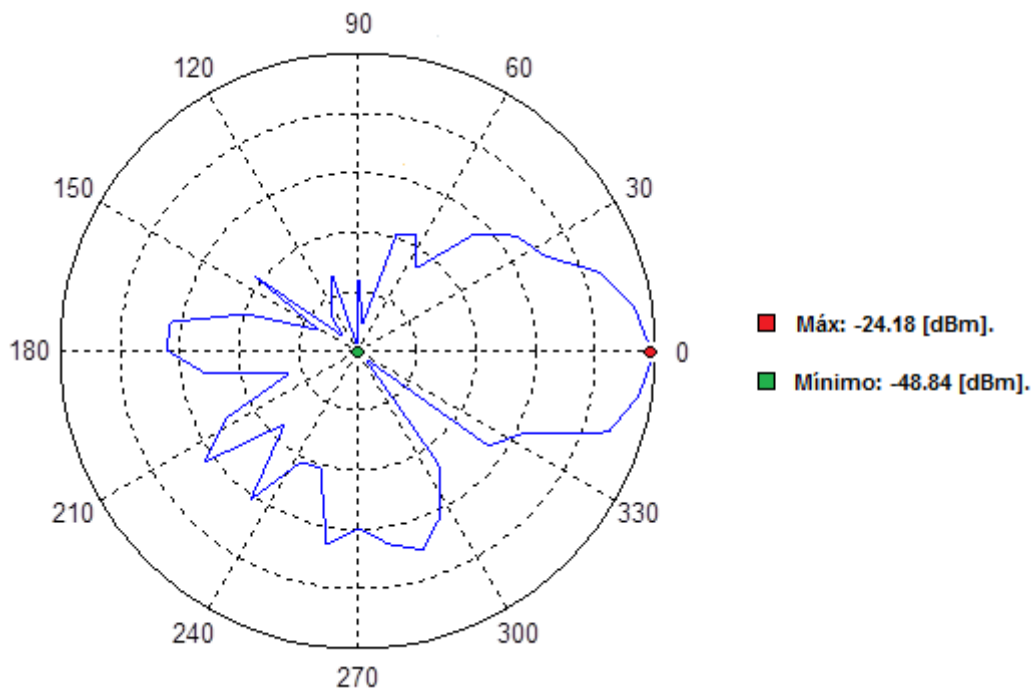
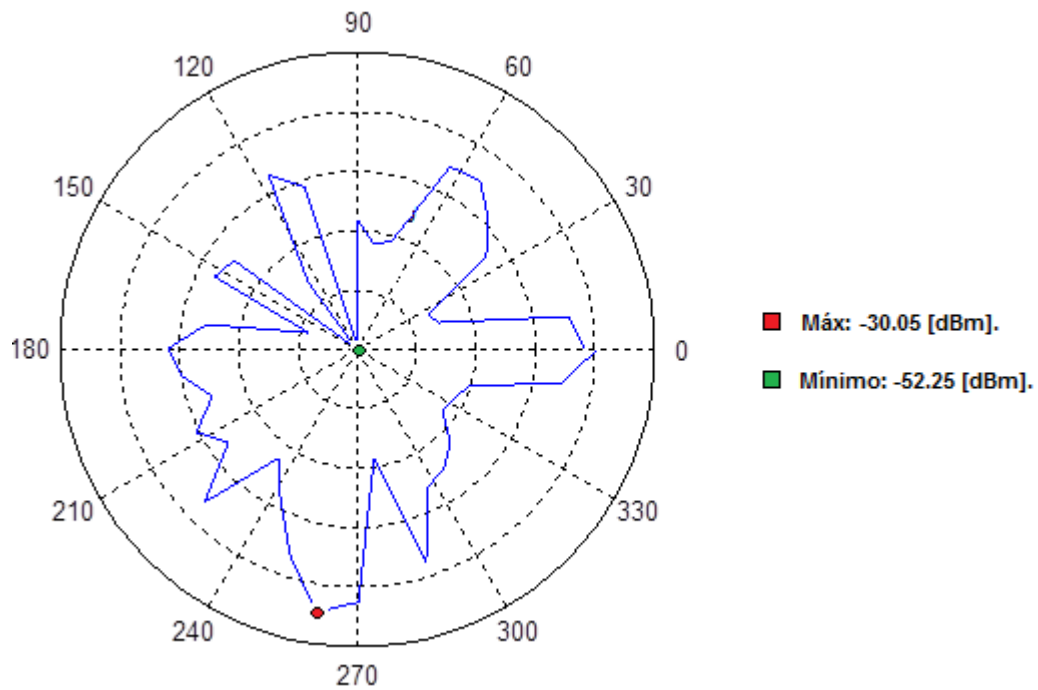
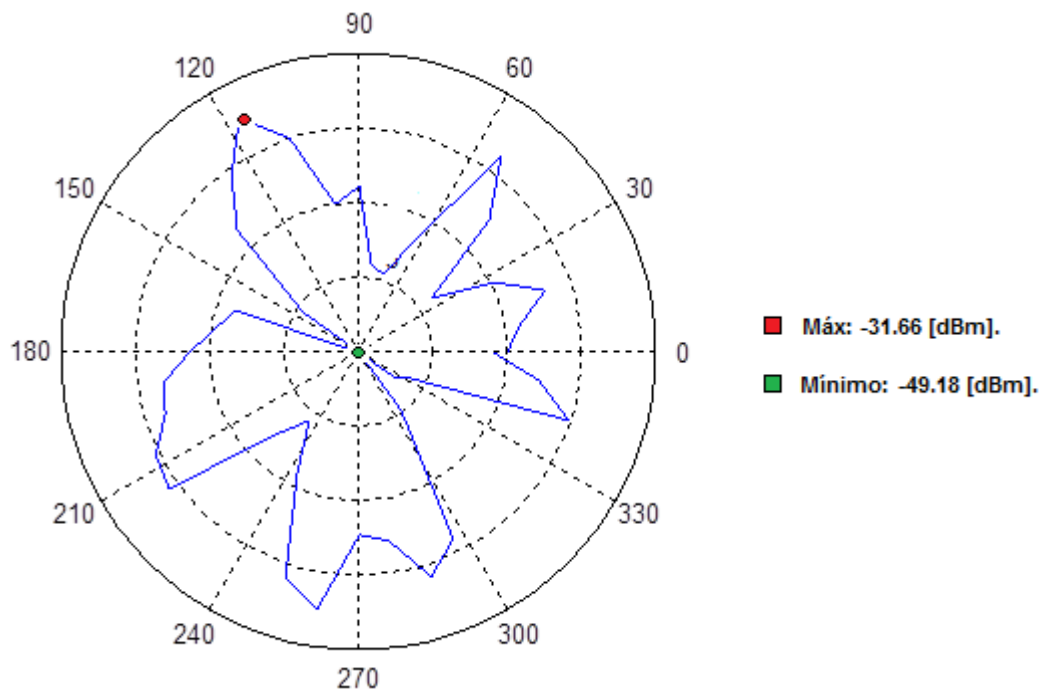
**▪ Elevación 30° - Basado en la Tabla IV.29 – Resolución de 9°:**

Figura IV.38: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 30° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].

**▪ Elevación 45° - Basado en la Tabla IV.30 – Resolución de 9°:****Figura IV.39: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].****▪ Elevación -20° - Basado en la Tabla IV.31 – Resolución de 9°:****Figura IV.40: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación -20° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**

**▪ Elevación  $-30^\circ$  - Basado en la Tabla IV.32 – Resolución de  $9^\circ$ :**Figura IV.41: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación  $-30^\circ$  – Antena Yagi – 2.4 [GHz].**▪ Elevación  $-45^\circ$  - Basado en la Tabla IV.33 – Resolución de  $9^\circ$ :**Figura IV.42: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación  $-45^\circ$  – Antena Yagi – 2.4 [GHz].



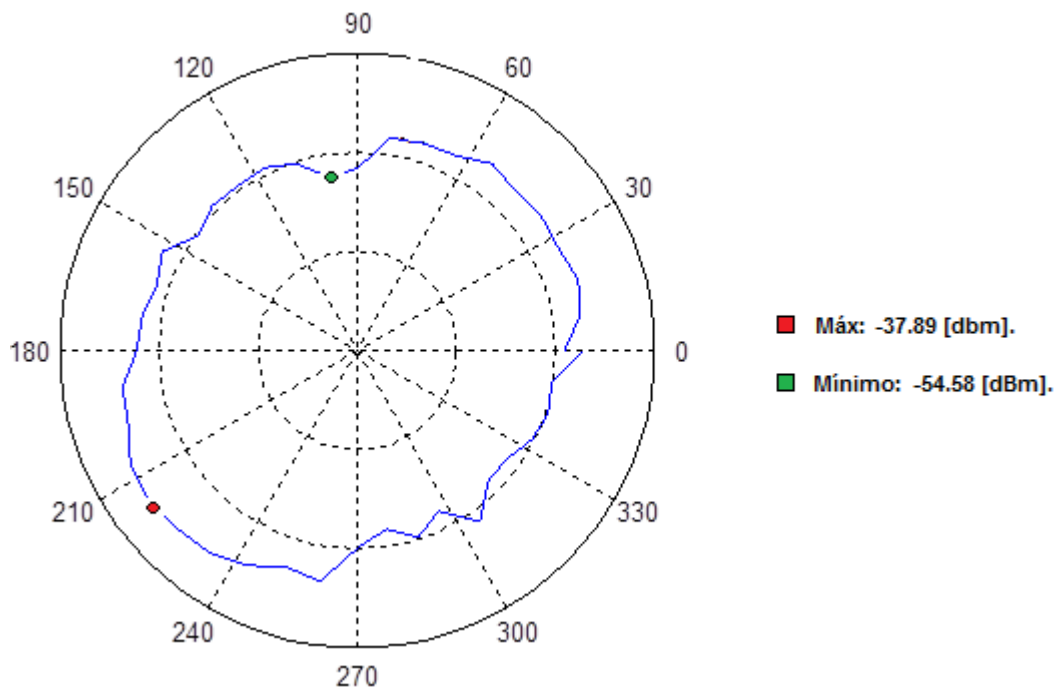
**▪ Elevación 0° - Basado en la Tabla IV.35 – Resolución de 9°:**

Figura IV.44: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 0° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].

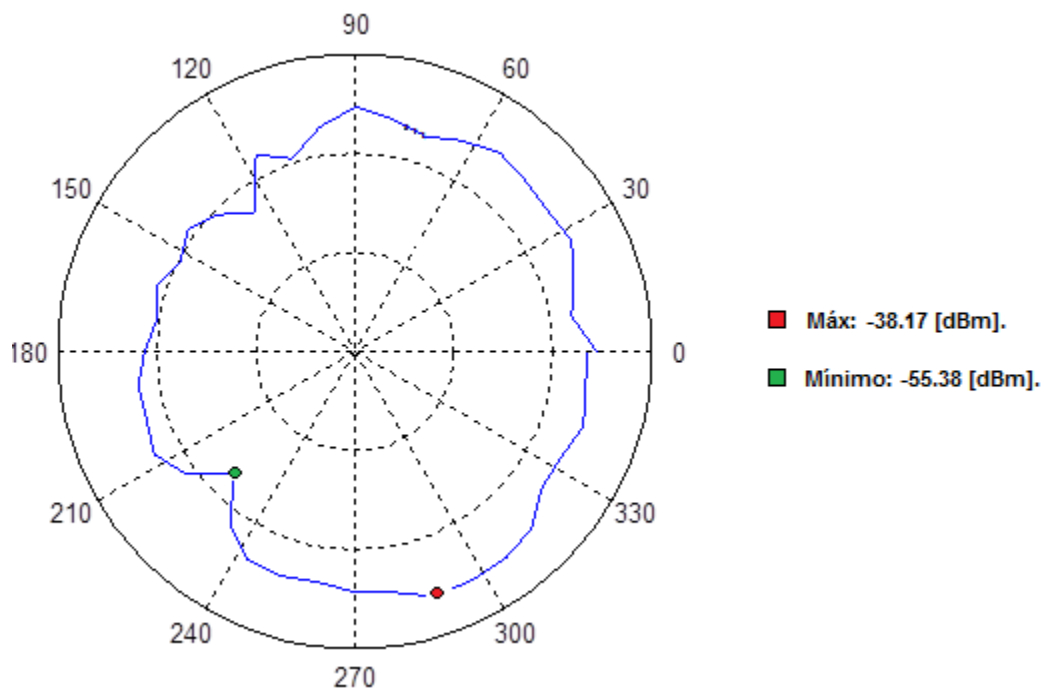
**▪ Elevación 45° - Basado en la Tabla IV.36 – Resolución de 9°:**

Figura IV.45: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación 45° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].



▪ Elevación  $-45^\circ$  - Basado en la Tabla IV.37 – Resolución de  $9^\circ$ :

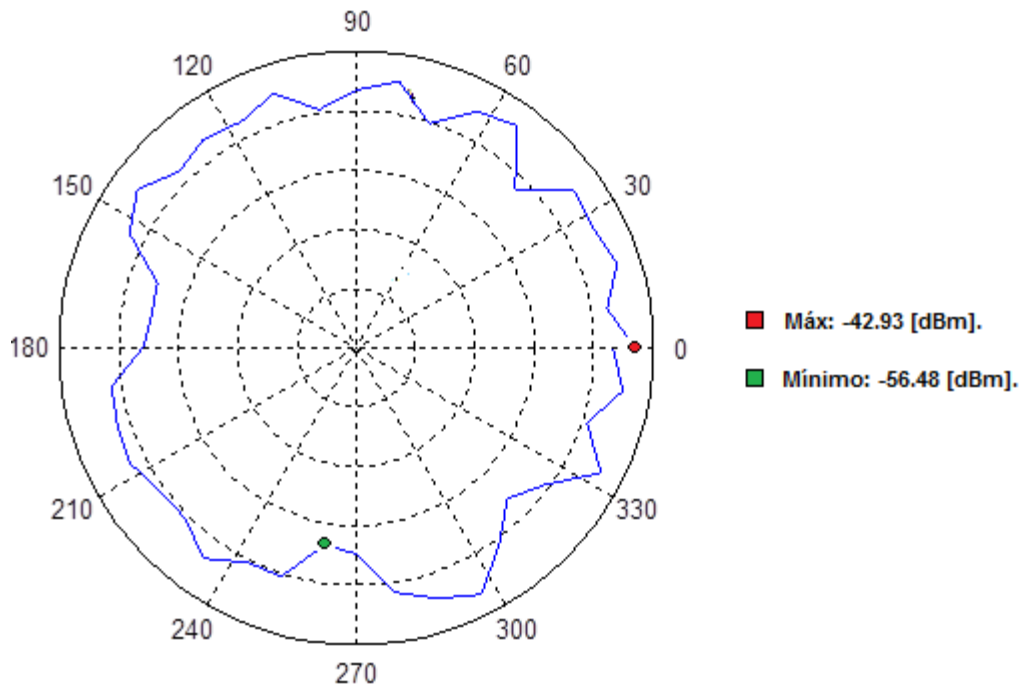


Figura IV.46: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación  $-45^\circ$  – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].

▪ Elevación  $90^\circ$  - Basado en la Tabla IV.38 – Resolución de  $9^\circ$ :

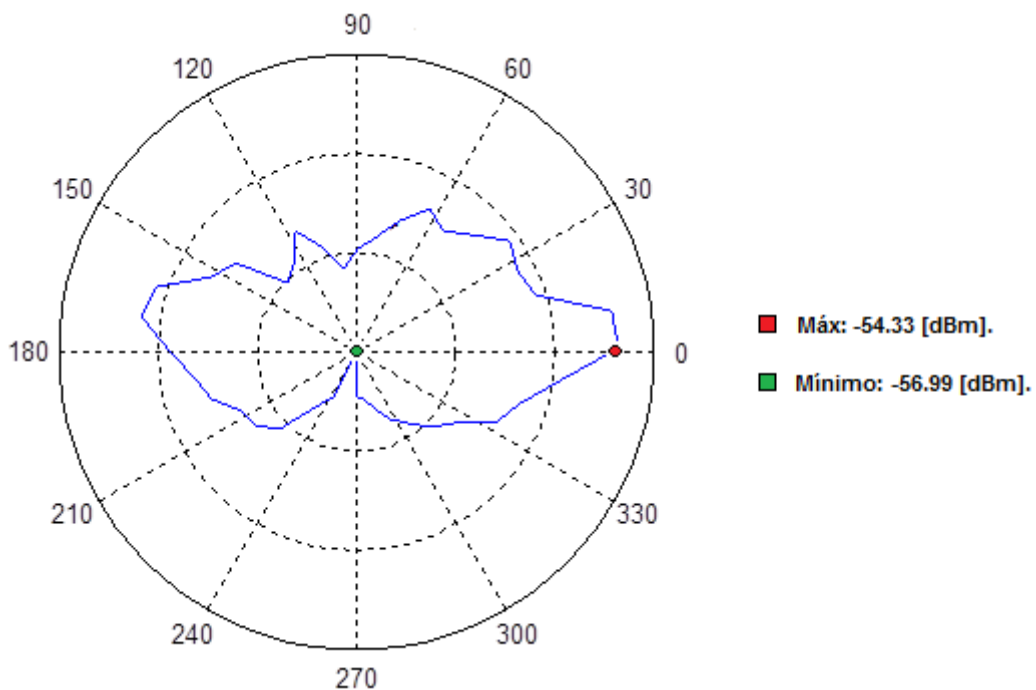


Figura IV.47: Patrón Radiación – Cámara Anecoica – Elevación  $90^\circ$  – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 EXACTITUD DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN AZIMUT Y ELEVACIÓN

La exactitud del sistema de posicionamiento, tanto el azimut como en elevación, va a permitir saber qué tan bien se están moviendo nuestras antenas, con respecto a los ejes de referencia. De esta manera es posible determinar la eficacia de los controles de giro en estos dos grados de libertad.

Para determinar la exactitud del sistema de posicionamiento, vamos a utilizar el porcentaje de error. Este valor va a ayudar a tener una referencia numérica y matemática de la exactitud del sistema, cuando éste se encuentra moviendo en cualquiera de los dos grados de libertad, ya sea este azimut o elevación.

La fórmula del porcentaje de error es la siguiente:

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ Teórico - Valor\ Medido}{Valor\ Teórico} \right| \times 100 \quad (5.1)$$

### 5.1.1 Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut

La exactitud del sistema de posicionamiento en azimut, permite verificar la eficacia del movimiento de la antena en la minitorre de sustentación correspondiente a este grado de libertad. La minitorre de azimut es la que permite el giro de la antena de prueba, dentro del rango de 0° - 360.

A continuación, se muestran los resultados de la exactitud del sistema de posicionamiento en azimut, cuando se estuvo trabajando sin la antena de prueba. Estos resultados se basan en las siguientes tablas: Tabla IV.1, Tabla IV.2 y Tabla IV.3:

▪ **Prueba No. 1 - Resoluciones\* de 9°, 18°, 45° y 90°:**

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>9</b>	11.111	<b>99</b>	1.0101	<b>189</b>	0.5291	<b>279</b>	0.3584
<b>18</b>	11.111	<b>108</b>	0.9259	<b>198</b>	0	<b>288</b>	0.3472
<b>27</b>	3.7037	<b>117</b>	0	<b>207</b>	0.4831	<b>297</b>	0.6734
<b>36</b>	2.7778	<b>126</b>	0.7937	<b>216</b>	0.463	<b>306</b>	0.9804
<b>45</b>	2.2222	<b>135</b>	0.7407	<b>225</b>	0	<b>315</b>	0.6349
<b>54</b>	0	<b>144</b>	1.3889	<b>234</b>	0	<b>324</b>	0.6173
<b>63</b>	0	<b>153</b>	0.6536	<b>243</b>	0.4115	<b>333</b>	0.3003
<b>72</b>	1.3889	<b>162</b>	0.6173	<b>252</b>	0.3968	<b>342</b>	0.2924
<b>81</b>	1.2346	<b>171</b>	0	<b>261</b>	0.3831	<b>351</b>	0.2849
<b>90</b>	1.1111	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.7407	<b>360</b>	0.5556

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>18</b>	0	<b>108</b>	0	<b>198</b>	0	<b>288</b>	0.3472
<b>36</b>	0	<b>126</b>	0	<b>216</b>	0	<b>306</b>	0.3268
<b>54</b>	0	<b>144</b>	0.6944	<b>234</b>	0	<b>324</b>	0.3086
<b>72</b>	0	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0.2924
<b>90</b>	0	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.5556

\* **Resolución:** Valor cada cuanto se va a Adquirir un Dato.

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>45</b>	2.2222	<b>135</b>	0.7407	<b>225</b>	0.4444	<b>315</b>	0
<b>90</b>	2.2222	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.2778

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>90</b>	0	<b>180</b>	1.1111	<b>270</b>	0	<b>360</b>	0.5556

Tabla V.1: Prueba No.1 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.

▪ Prueba No. 2 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>9</b>	11.111	<b>99</b>	0	<b>189</b>	0	<b>279</b>	0
<b>18</b>	0	<b>108</b>	0	<b>198</b>	0	<b>288</b>	0
<b>27</b>	0	<b>117</b>	0	<b>207</b>	0	<b>297</b>	0.3367
<b>36</b>	0	<b>126</b>	0	<b>216</b>	0	<b>306</b>	0.3268
<b>45</b>	0	<b>135</b>	0	<b>225</b>	0.4444	<b>315</b>	0.3175
<b>54</b>	0	<b>144</b>	0.6944	<b>234</b>	0.4274	<b>324</b>	0
<b>63</b>	0	<b>153</b>	0	<b>243</b>	0.4115	<b>333</b>	0
<b>72</b>	0	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0
<b>81</b>	0	<b>171</b>	0	<b>261</b>	0	<b>351</b>	0
<b>90</b>	0	<b>180</b>	0	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.2778

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>18</b>	5.5556	<b>108</b>	0.9259	<b>198</b>	0.5051	<b>288</b>	0.3472
<b>36</b>	0	<b>126</b>	0	<b>216</b>	0	<b>306</b>	0.3268
<b>54</b>	0	<b>144</b>	0	<b>234</b>	0	<b>324</b>	0.3086
<b>72</b>	0	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0.2924
<b>90</b>	1.1111	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.5556

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>45</b>	0	<b>135</b>	0.7407	<b>225</b>	0.4444	<b>315</b>	0
<b>90</b>	2.2222	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.7407	<b>360</b>	0

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>90</b>	0	<b>180</b>	1.1111	<b>270</b>	0	<b>360</b>	0.5556

Tabla V.2: Prueba No.2 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.

▪ Prueba No. 3 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>9</b>	11.111	<b>99</b>	0	<b>189</b>	0.5291	<b>279</b>	0
<b>18</b>	0	<b>108</b>	0	<b>198</b>	0	<b>288</b>	0
<b>27</b>	0	<b>117</b>	0	<b>207</b>	0.4831	<b>297</b>	0.3367
<b>36</b>	0	<b>126</b>	0	<b>216</b>	0	<b>306</b>	0.3268
<b>45</b>	0	<b>135</b>	0	<b>225</b>	0.4444	<b>315</b>	0.3175
<b>54</b>	0	<b>144</b>	0.6944	<b>234</b>	0.4274	<b>324</b>	0
<b>63</b>	0	<b>153</b>	0	<b>243</b>	0.4115	<b>333</b>	0
<b>72</b>	1.3889	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0
<b>81</b>	0	<b>171</b>	0	<b>261</b>	0	<b>351</b>	0
<b>90</b>	0	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.2778

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>18</b>	5.5556	<b>108</b>	0.9259	<b>198</b>	0.5051	<b>288</b>	0.3472
<b>36</b>	0	<b>126</b>	0	<b>216</b>	0	<b>306</b>	0.3268
<b>54</b>	1.8519	<b>144</b>	0	<b>234</b>	0	<b>324</b>	0.3086
<b>72</b>	1.3889	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0.2924
<b>90</b>	1.1111	<b>180</b>	0.5556	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.5556

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>45</b>	2.2222	<b>135</b>	0.7407	<b>225</b>	0	<b>315</b>	0
<b>90</b>	2.2222	<b>180</b>	1.1111	<b>270</b>	0.3704	<b>360</b>	0.2778

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
<b>90</b>	0	<b>180</b>	1.1111	<b>270</b>	0	<b>360</b>	0.5556

Tabla V.3: Prueba No.3 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Sin Antena.

De igual, se muestran los resultados de la exactitud del sistema posicionamiento en azimut, cuando se estuvo trabajando con la antena de prueba. Estos resultados se basan en las siguientes tablas: Tabla IV.4, Tabla IV.5 y Tabla IV.6:

▪ **Prueba No. 1 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:**

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
9	0	99	0	189	0	279	0
18	0	108	0	198	0	288	0
27	0	117	0	207	0	297	0
36	0	126	0	216	0	306	0
45	0	135	0	225	0	315	0
54	0	144	0	234	0	324	0
63	0	153	0	243	0	333	0
72	0	162	0	252	0	342	0
81	0	171	0	261	0	351	0
90	0	180	0	270	0	360	0.2778

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
18	0	108	0.9259	198	0.5051	288	0
36	0	126	0	216	0.463	306	0
54	0	144	0	234	0	324	0.3086
72	0	162	0	252	0	342	0.2924
90	1.1111	180	0	270	0	360	0

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
45	0	135	2.2222	225	0	315	0
90	1.1111	180	0	270	1.1111	360	0.8333

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
90	1.1111	180	0	270	0.7407	360	0.8333

**Tabla V.4: Prueba No.1 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.**

▪ Prueba No. 2 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
9	0	99	0	189	0	279	0
18	0	108	0	198	0	288	0
27	0	117	0	207	0	297	0
36	0	126	0	216	0	306	0.3268
45	0	135	0	225	0	315	0
54	0	144	0	234	0	324	0
63	0	153	0	243	0	333	0
72	0	162	0	252	0	342	0
81	0	171	0	261	0	351	0
90	0	180	0	270	0	360	0

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
18	5.5556	108	0	198	0	288	0
36	5.5556	126	0	216	0	306	0.3268
54	1.8519	144	0	234	0	324	0.3086
72	2.7778	162	0	252	0	342	0.2924
90	2.2222	180	0	270	0	360	0

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
45	0	135	2.2222	225	1.3333	315	0.9524
90	1.1111	180	0	270	1.1111	360	0.8333

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
90	0	180	0	270	0.7407	360	0.8333

Tabla V.5: Prueba No.2 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.

▪ Prueba No.3 - Resoluciones de 9°, 18°, 45° y 90°:

Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
9	11.111	99	0	189	0	279	0
18	5.5556	108	0	198	0	288	0
27	3.7037	117	0	207	0	297	0
36	0	126	0	216	0	306	0

<b>45</b>	2.2222	<b>135</b>	0	<b>225</b>	0	<b>315</b>	0.3175
<b>54</b>	1.8519	<b>144</b>	0	<b>234</b>	0	<b>324</b>	0
<b>63</b>	0	<b>153</b>	0	<b>243</b>	0	<b>333</b>	0
<b>72</b>	1.3889	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0
<b>81</b>	1.2346	<b>171</b>	0	<b>261</b>	0	<b>351</b>	0
<b>90</b>	0	<b>180</b>	0	<b>270</b>	0	<b>360</b>	0

<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>
<b>18</b>	5.5556	<b>108</b>	0	<b>198</b>	0	<b>288</b>	0
<b>36</b>	0	<b>126</b>	0	<b>216</b>	0	<b>306</b>	0
<b>54</b>	0	<b>144</b>	0	<b>234</b>	0	<b>324</b>	0
<b>72</b>	0	<b>162</b>	0	<b>252</b>	0	<b>342</b>	0
<b>90</b>	0	<b>180</b>	0	<b>270</b>	0	<b>360</b>	0

<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>
<b>45</b>	4.4444	<b>135</b>	2.2222	<b>225</b>	0.8889	<b>315</b>	0.6349
<b>90</b>	2.2222	<b>180</b>	1.6667	<b>270</b>	1.1111	<b>360</b>	0.8333

<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>	<b>Grado Medido</b>	<b>% Error</b>
<b>90</b>	2.2222	<b>180</b>	0	<b>270</b>	0.7407	<b>360</b>	0.8333

**Tabla V.6: Prueba No.3 – Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Azimut – Con Antena.**

### 5.1.2 Exactitud del Sistema de Posicionamiento en Elevación

La exactitud del sistema de posicionamiento en elevación, permite verificar la eficacia del movimiento de la antena en la minitorre de sustentación correspondiente a este grado de libertad. La minitorre de elevación es la que permite el barrido y movimiento, de la antena de prueba, en el eje vertical.

A continuación, se muestran los resultados de la exactitud del sistema de posicionamiento en elevación, cuando se estuvo trabajando sin la antena de prueba. Estos resultados se basan en las siguientes tablas: Tabla IV.7 y Tabla IV.8:



▪ **Mediciones en Elevaciones Positivas:**

No. Prueba	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
1	19	5	30	0	44	2.2222
2	20	0	30	0	44	2.2222
3	21	5	30	0	44	2.2222
4	20	0	31	3.3333	44	2.2222
5	20	0	31	3.3333	44	2.2222
6	21	5	31	3.3333	44	2.2222
7	21	5	31	3.3333	45	0
8	20	0	31	3.3333	45	0
9	20	0	31	3.3333	44	2.2222
10	19	5	31	3.3333	44	2.2222

Tabla V.7: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Positivas – Sin Antena.

▪ **Mediciones en Elevaciones Negativas:**

No. Prueba	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
1	-21	5	-30	0	-44	2.2222
2	-21	5	-30	0	-43	4.4444
3	-20	0	-29	3.3333	-44	2.2222
4	-21	5	-30	0	-45	0
5	-19	5	-29	3.3333	-44	2.2222
6	-19	5	-30	0	-43	4.4444
7	-19	5	-30	0	-45	0
8	-21	5	-30	0	-45	0
9	-21	5	-29	3.3333	-44	2.2222
10	-21	5	-30	0	-44	2.2222

Tabla V.8: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Negativas – Sin Antena.

De igual, se muestran los resultados de la exactitud del sistema posicionamiento en elevación, cuando se estuvo trabajando con la antena de prueba. Estos resultados se basan en las siguientes tablas: Tabla IV.9 y Tabla IV.10:

▪ **Mediciones en Elevaciones Positivas:**

No. Prueba	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
1	20	0	31	3.3333	45	0
2	19	5	30	0	46	2.2222
3	20	0	31	3.3333	46	2.2222
4	19	5	30	0	46	2.2222
5	20	0	30	0	45	0
6	20	0	30	0	45	0
7	19	5	29	3.3333	45	0
8	19	5	30	0	45	0
9	19	5	30	0	45	0
10	20	0	30	0	45	0

Tabla V.9: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Positivas – Con Antena.

▪ **Mediciones en Elevaciones Negativas:**

No. Prueba	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error	Grado Medido	% Error
1	-19	5	-29	3.3333	-44	2.2222
2	-20	0	-28	6.6667	-44	2.2222
3	-21	5	-30	0	-45	0
4	-20	0	-30	0	-45	0
5	-20	0	-30	0	-44	2.2222
6	-20	0	-30	0	-45	0
7	-20	0	-31	3.3333	-45	0
8	-21	5	-30	0	-44	2.2222
9	-19	5	-29	3.3333	-45	0
10	-20	0	-30	0	-45	0

Tabla V.10: Exactitud del Sistema de Posicionamiento - Elevaciones Negativas – Con Antena.

## 5.2 COMPARACIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN SIMULADO Y TEÓRICO

La comparación del patrón de radiación, obtenido utilizando el equipo y teórico, de las antenas de prueba, permite visualizar tanto las diferencias como las semejanzas entre los resultados que se esperan obtener y los resultados realmente obtenidos.

De esta manera es posible determinar el estado en el que se encuentra la cámara anecoica, la manera en que los materiales con los cuales fueron construidas las minitorres de sustentación, afectan a las señales del sistema de transmisión, y en general, el funcionamiento del servomecanismo presentado a lo largo de este proyecto.

Los patrones de radiación a comparar son los siguientes:

- Patrón de radiación teórico obtenido a través del software QY4 con una elevación de  $0^\circ$  – Patrón de radiación obtenido utilizando el equipo, a través de pruebas realizadas al aire libre, con una elevación de  $0^\circ$  - Patrón de radiación obtenido utilizando el equipo, a través de pruebas realizadas dentro la cámara anecoica, con una elevación de  $0^\circ$ .

- Patrón de radiación teórico obtenido a través del software QY4, con una elevación de  $90^\circ$  – Patrón de radiación obtenido utilizando el equipo, a través de pruebas realizadas al aire libre, con una elevación de  $90^\circ$  - Patrón de radiación obtenido utilizando el equipo, a través de pruebas realizadas dentro la cámara anecoica, con una elevación de  $90^\circ$ .

Las antenas de prueba utilizadas para la obtención de los parámetros de radiación, son antenas tipo Yagi, de construcción artesanal, la primera antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), cuatro elementos Directores, una Ganancia de 8.5 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,08 [dB] y trabajan a una frecuencia de 911 [MHz].

La segunda antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), siete elementos

Directores, una Ganancia de 12.56 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,03 [dB] y trabajan a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Finalmente, también se planea utilizar antenas omnidireccionales de fabrica, que poseen entre sus características principales una Ganancia de 12 [dBi], y trabajan a una frecuencia de 2.4 - 2.5 [GHz].

A continuación se presentan las figuras a ser comparadas, correspondientes al primer grupo de patrones de radiación, cuando se trabaja con una antena tipo Yagi a 911 [MHz].

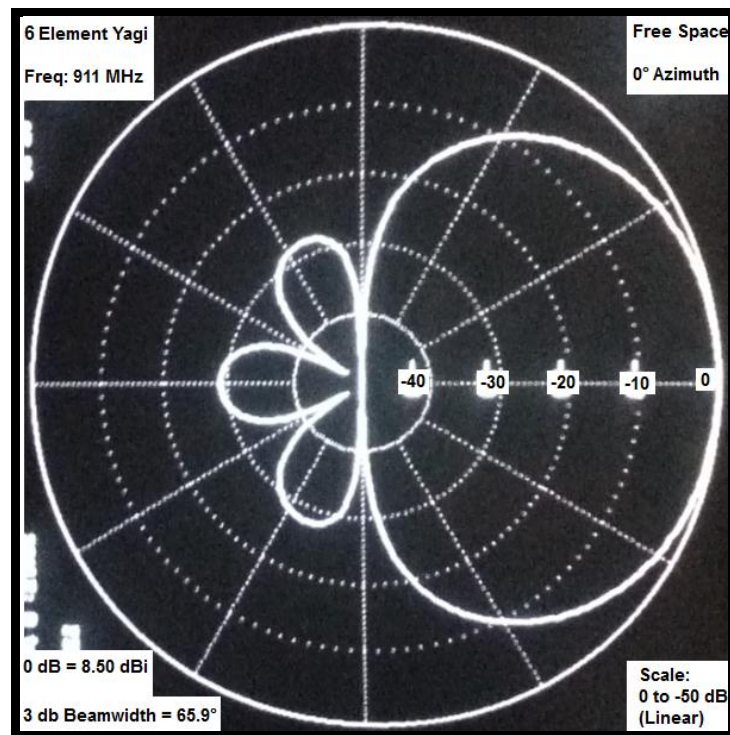
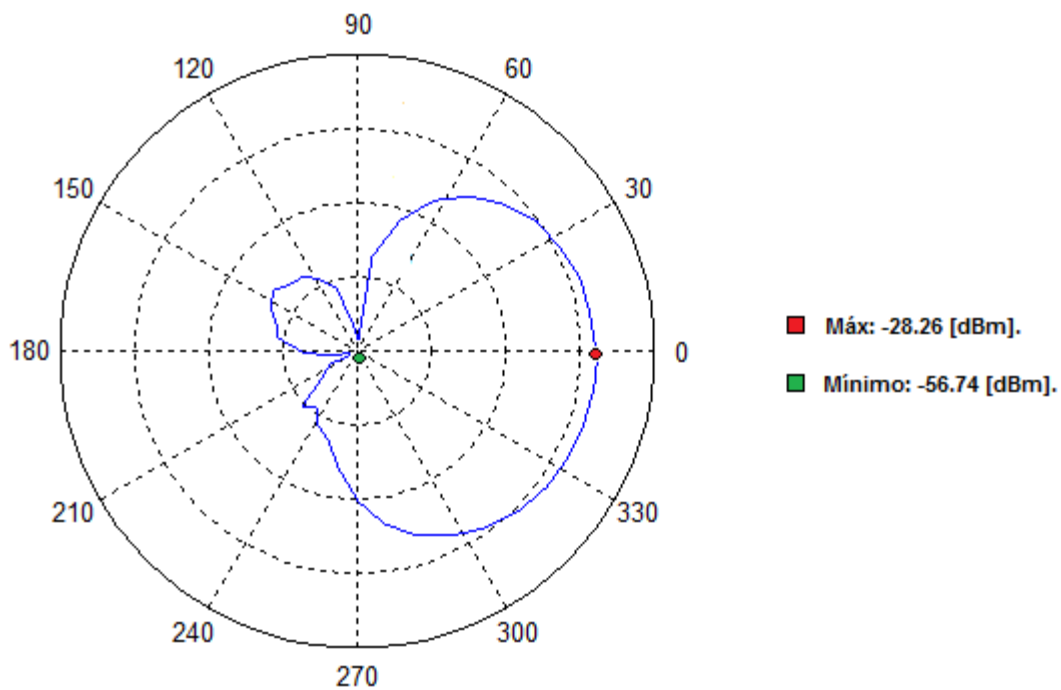
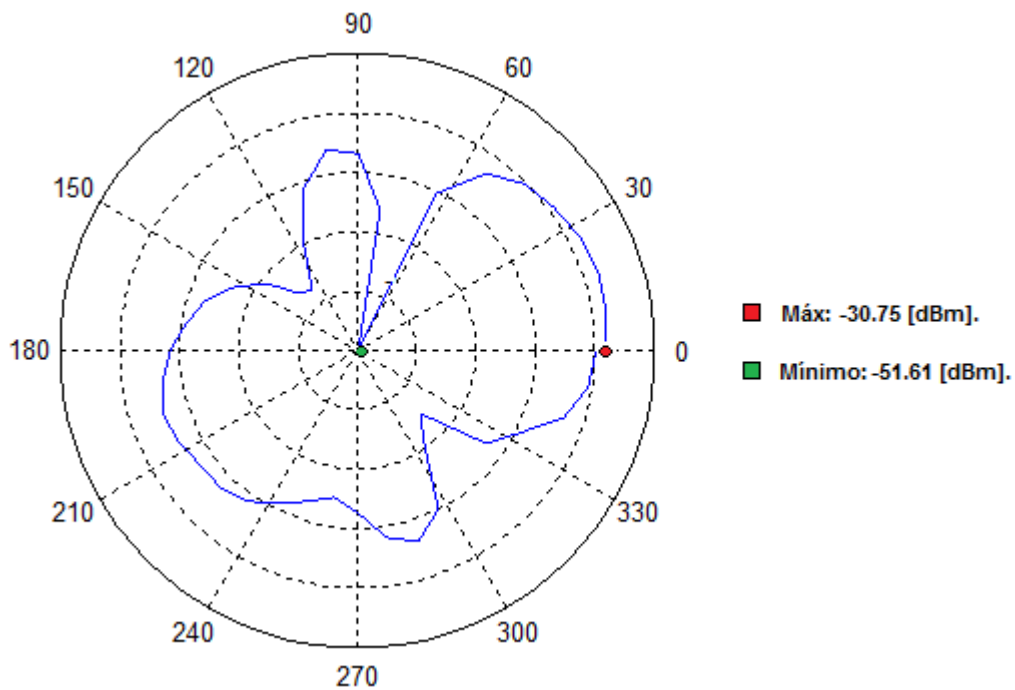


Figura V.1: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].



**Figura V.2: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Aire Libre - Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].**



**Figura V.3: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Cámara Anecoica - Elevación 0° – Antena Yagi – 911 [MHz].**

Como se puede apreciar en las tres figuras anteriormente expuestas, es evidente que la antena con la que se trabajó, es una antena directiva.

Una vez que se ha demostrado esto, salta a la vista que la antena de prueba, en base a los patrones de radiación simulados, es directiva en  $0^\circ$ ; lo cual concuerda con el patrón de radiación teórico.

Quizá, una de las diferencias más notorias, entre los tres patrones de radiación anteriormente mencionados, es la falta de semejanza que existe entre los lóbulos secundarios de dichos patrones. Como se puede observar en la Figura V.1, los lóbulos secundarios deberían ser tres y encontrarse en la parte posterior del patrón de radiación; mientras que como se observa en la Figura V.2, en este caso, solo existe un lóbulo secundario y finalmente en la Figura V.3 se observa, en cambio, que existen 3 lóbulos secundarios, de un tamaño considerable, y no todos precisamente se encuentran en la parte posterior del patrón de radiación.

A continuación se presentan las figuras a ser comparadas, correspondientes al primer grupo de patrones de radiación, cuando se trabaja con una antena tipo Yagi a 2.4 [GHz].



Figura V.4: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].

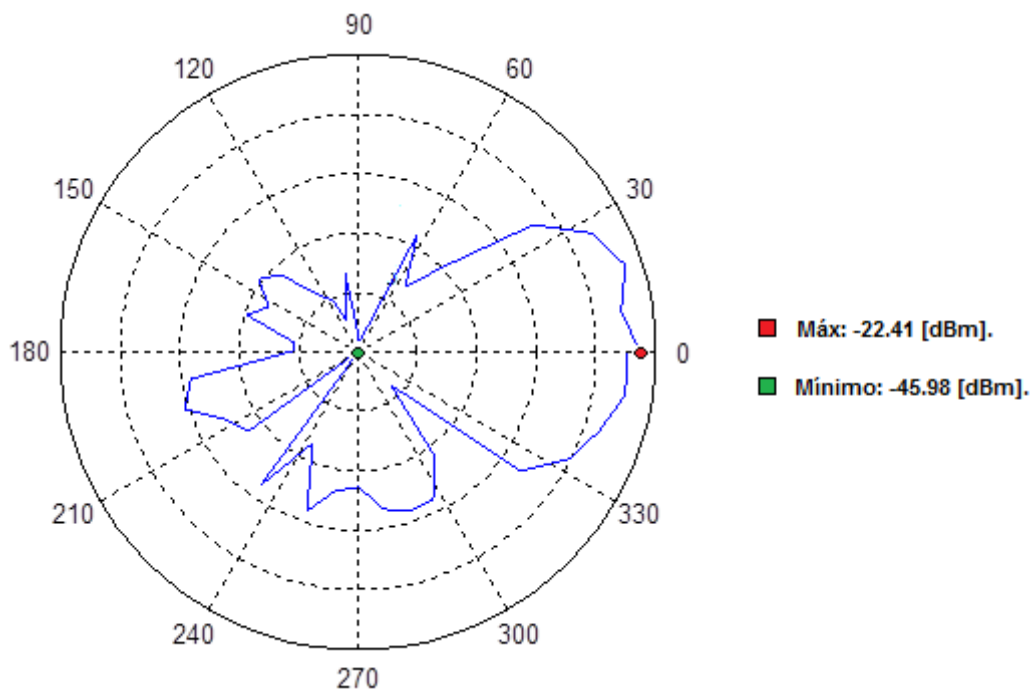


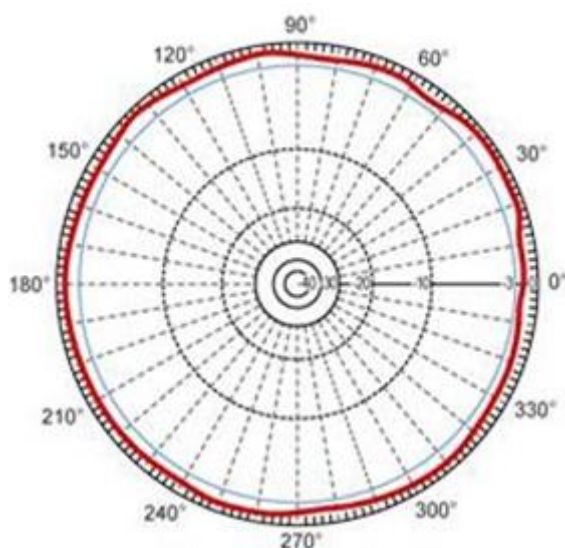
Figura V.5: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Cámara Anecoica - Elevación 0° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].

Como se puede apreciar en las dos figuras anteriormente expuestas, es evidente que la antena con la que se trabajó, es una antena directiva.

Una vez que se ha demostrado esto, salta a la vista que la antena de prueba, en base a los patrones de radiación simulados, es directiva en  $0^\circ$ ; lo cual concuerda con el patrón de radiación teórico.

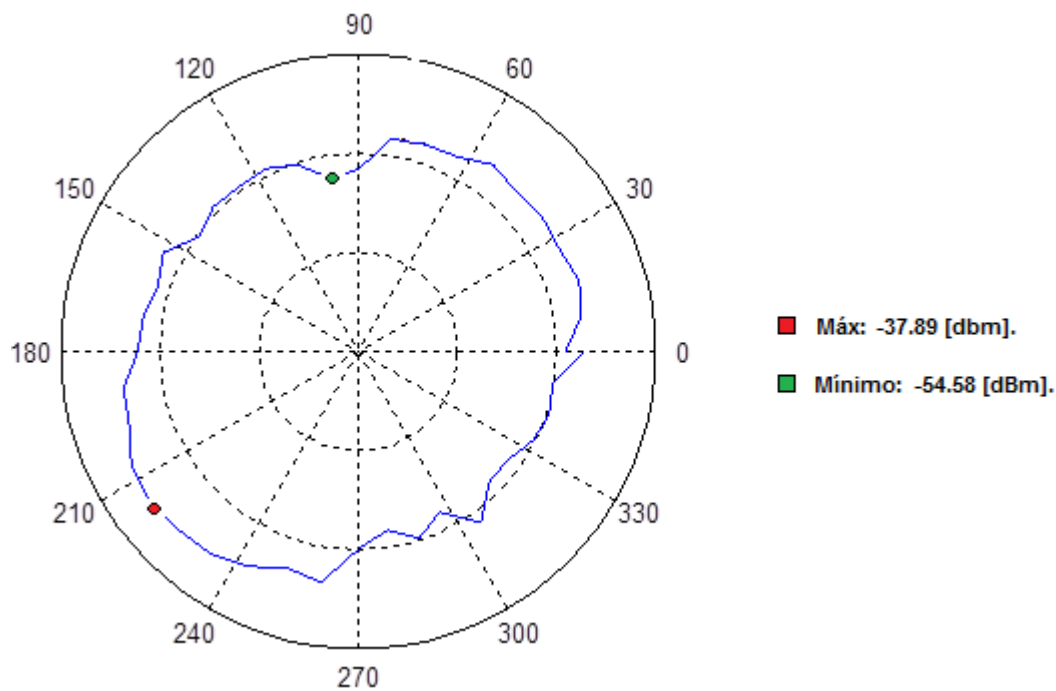
Quizá, una de las diferencias más notorias, entre los dos patrones de radiación anteriormente mencionados, radica en el lóbulo secundario de dichos patrones. Como se puede observar en la Figura V.4, el lóbulo secundario tiene un tamaño considerable y tiene la forma de la parte inicial del lóbulo de radiación principal, aunque poco más pequeño y semi-plano en la punta; mientras que en la Figura V.5 se puede observar la presencia de dos lóbulos secundarios, que a pesar de no encontrarse en la posición que deberían, intentan parecerse, tal vez no tanto en forma pero sí en tamaño, al lóbulo secundario teórico.

A continuación se presentan las figuras a ser comparadas, correspondientes al primer grupo de patrones de radiación, cuando se trabaja con una antena tipo Omnidireccional a 2.4 [GHz].



**Figura V.6: Patrón de Radiación Teórico - Elevación  $0^\circ$  – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**





**Figura V.7: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Cámara Anecoica - Elevación 0° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].**

Como se puede apreciar en las dos figuras anteriormente expuestas, es evidente que la antena con la que se trabajó, es una antena omnidireccional

La diferencia más notoria, entre los dos patrones de radiación anteriormente mencionados, radica en que mientras en la Figura V.6 se muestra una circunferencia casi perfecta, en la Figura V.7 se muestra una circunferencia un poco ovalada, pero que intenta parecerse al patrón de radiación teórico.

A continuación se presentan las figuras a ser comparadas, correspondientes al segundo grupo de patrones de radiación, cuando se trabaja con una antena tipo Yagi a 911 [MHz].

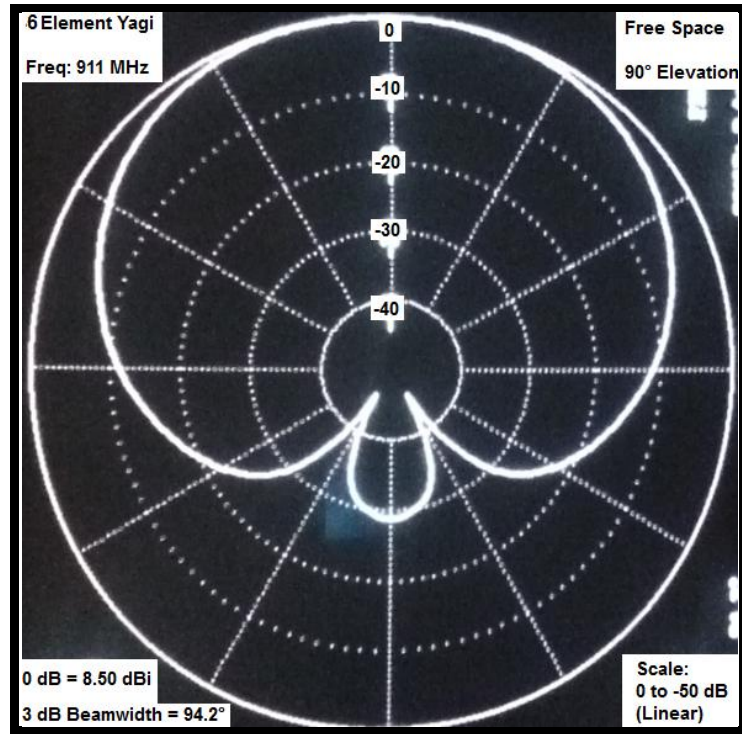


Figura V.8: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].

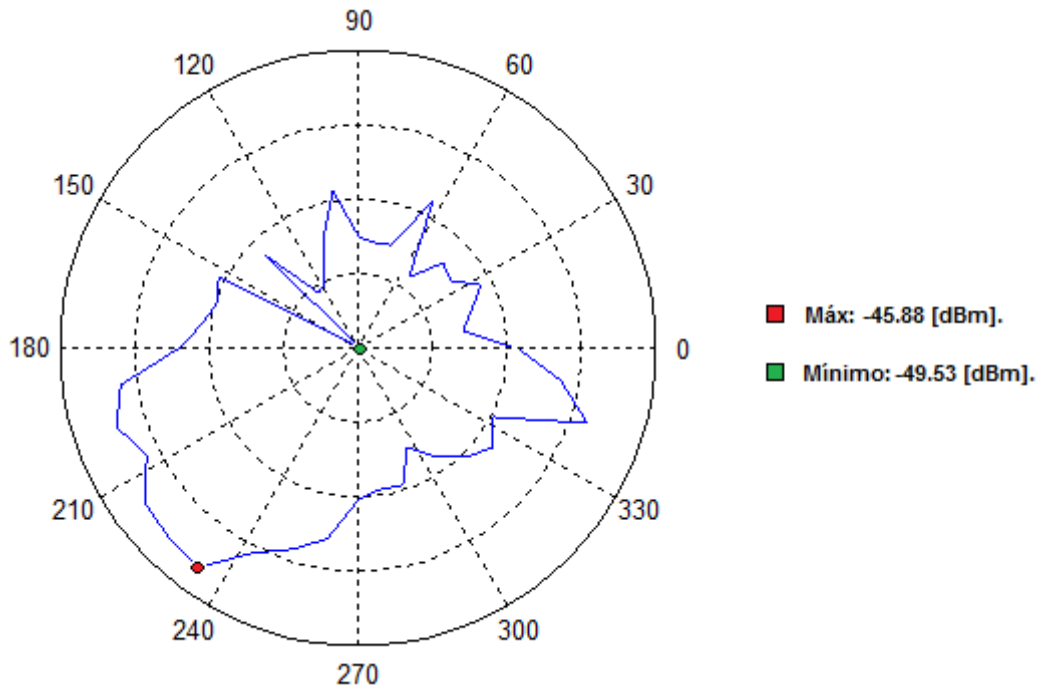
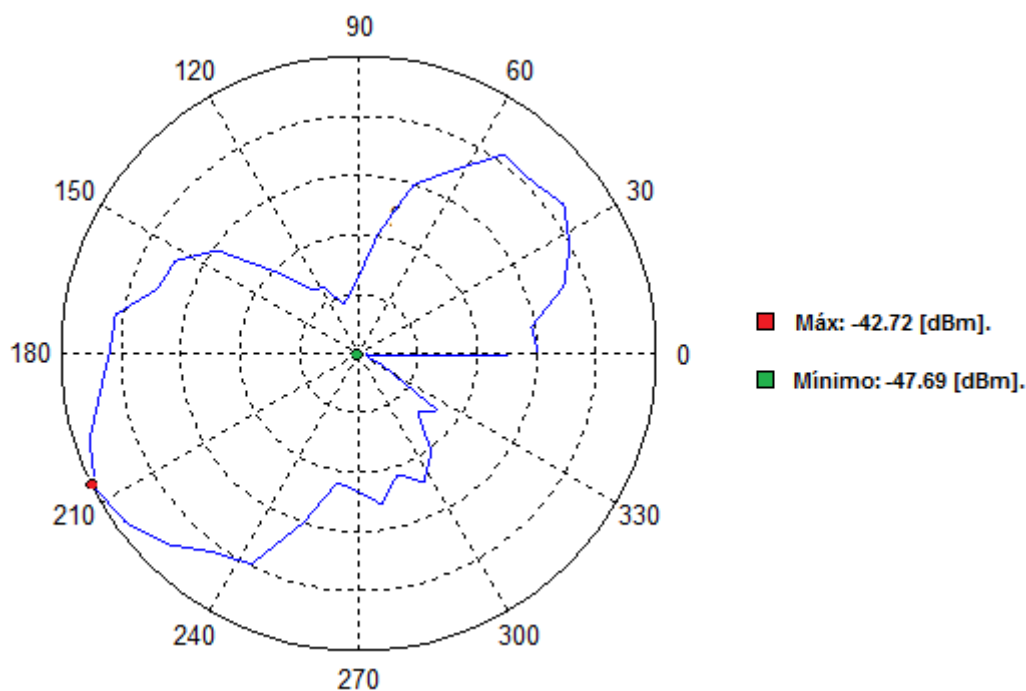


Figura V.9: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo - Aire Libre - Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].



**Figura V.10: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 911 [MHz].**

Como se puede apreciar en las tres figuras anteriormente expuestas, es evidente que la antena con la que se trabajó, es una antena directiva.

Una vez que se ha demostrado esto, salta a la vista que la antena de prueba, en base a los patrones de radiación simulados, es directiva entre los 210° y 240°; lo cual no concuerda con el patrón de radiación teórico.

Esta, sin duda, es la diferencia más grande que existe entre los tres patrones de radiación anteriormente mencionados. Pero vale la pena rescatar, la similitud que existe entre los patrones de radiación de la Figura V.9 y la Figura V.10. Además que, a pesar de que no se encuentran directivos en 90°, por lo menos, la presencia de un lóbulo secundario, en la parte posterior, en relación a donde el patrón de radiación es mas directivo; indica que, aunque desfasados casi 150°, los patrones de radiación simulados tienen características similares al patrón de radiación teórico, de la Figura V.8; ya que éste muestra un solo lóbulo secundario, localizado en la parte posterior.

A continuación se presentan las figuras a ser comparadas, correspondientes al segundo grupo de patrones de radiación, cuando se trabaja con una antena tipo Yagi a 2.4 [GHz].

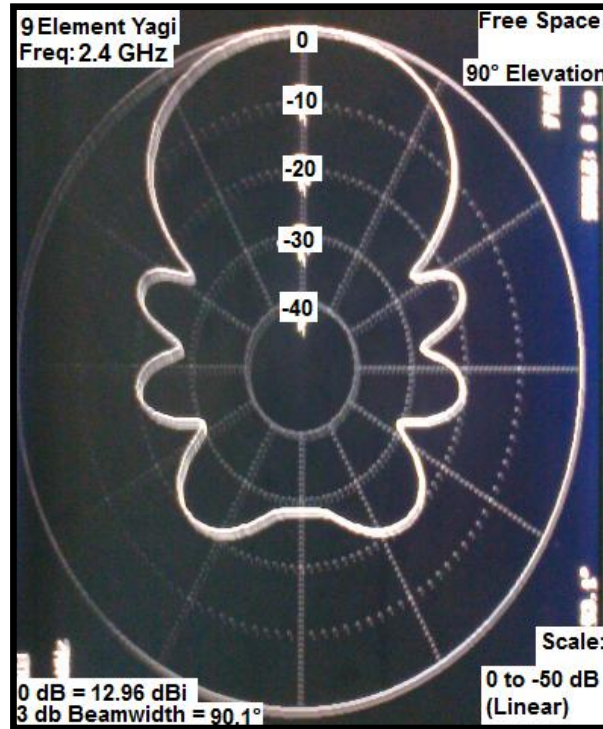
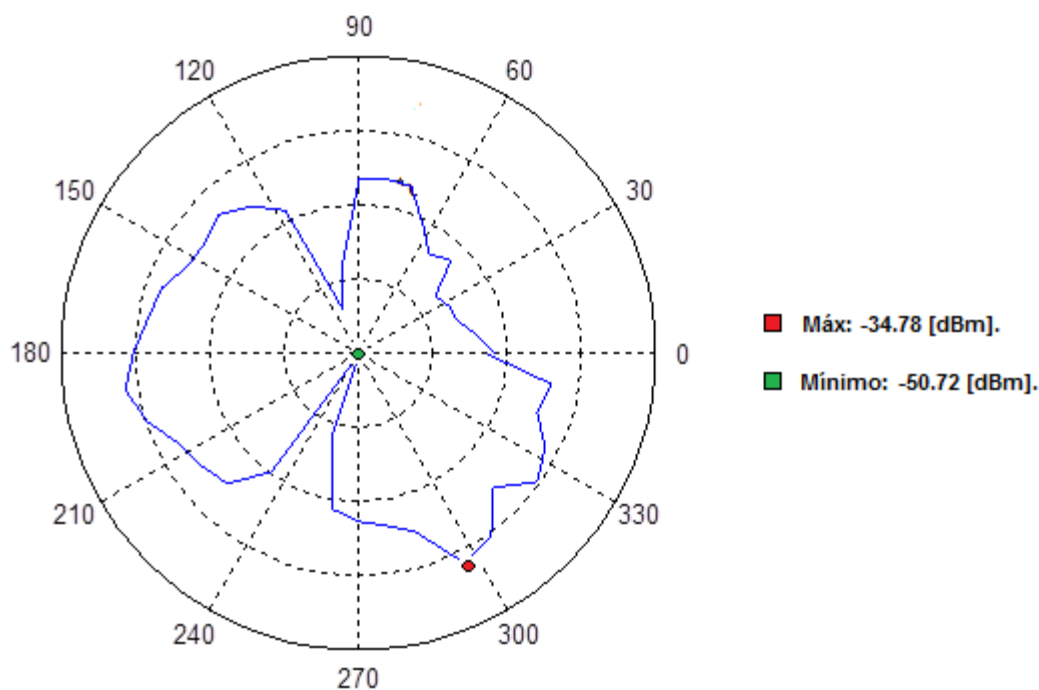


Figura V.11: Patrón de Radiación Teórico - QY4 - Elevación 90° – Antena Yagi – 2.4 [GHz].



**Figura V.12: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Yagi – 2.4 [MHz].**

Como se puede apreciar en las dos figuras anteriormente expuestas, es evidente que la antena con la que se trabajó, es una antena directiva.

Se puede apreciar una gran diferencia entre el patrón de radiación teórico y el patrón de radiación obtenido utilizando el equipo. Como se puede observar, en teoría, el patrón de radiación debería estar apuntando a 90° y tener una serie de lóbulos secundarios, tanto en los laterales como en la parte posterior de dicho patrón de radiación; como se indica en la Figura V.11. Mientras que en la Figura V.12 se puede apreciar, no tanto la existencia de un lóbulo principal, sino más bien la presencia de dos lóbulos secundarios, que se encuentran ubicados en los laterales de 90°, lo cual corresponde a la gráfica de un patrón de radiación de una antena tipo Yagi, cuando una de las antenas se encuentra en polarización horizontal y la otra se encuentra en polarización vertical; respectivamente, dentro de un sistema de transmisión.

A continuación se presentan las figuras a ser comparadas, correspondientes al segundo grupo de patrones de radiación, cuando se trabaja con una antena tipo Omnidireccional a 2.4 [GHz].

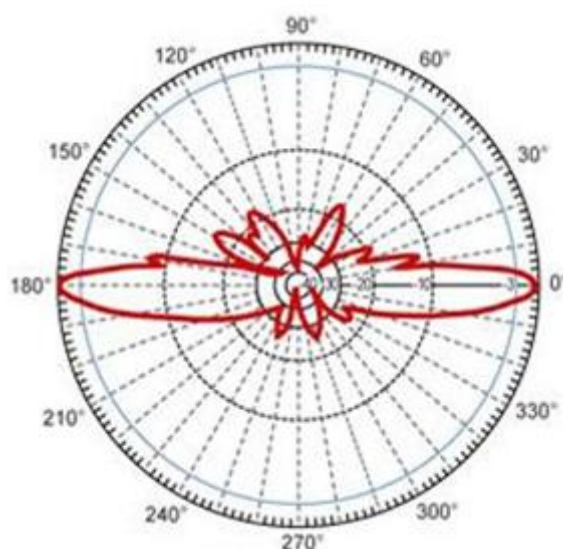


Figura V.13: Patrón de Radiación Teórico - Elevación 90° – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz].

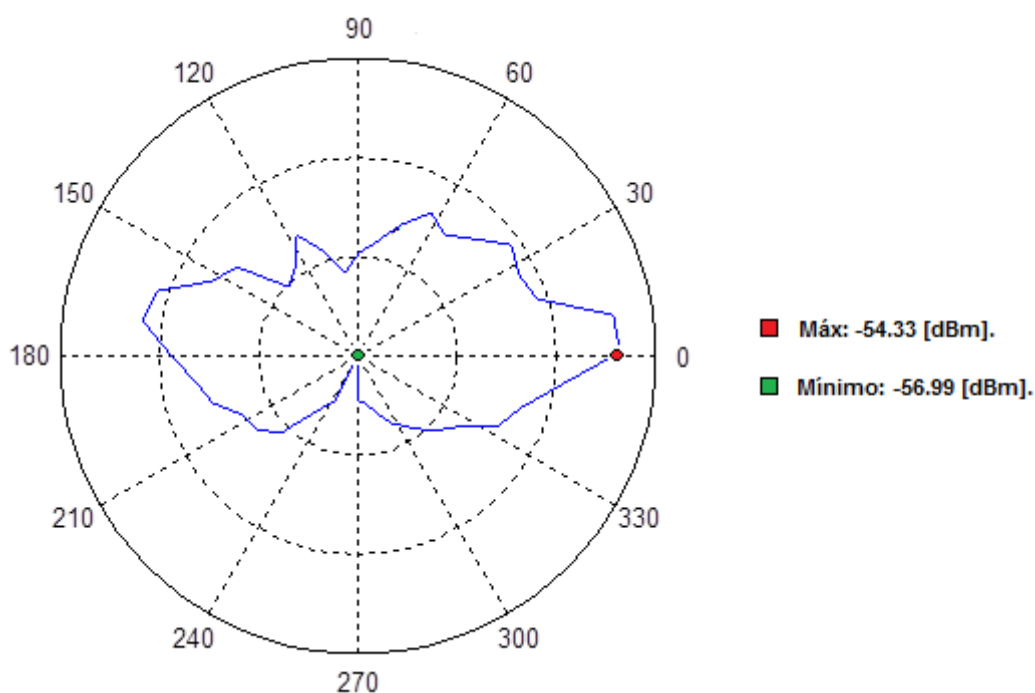


Figura V.14: Patrón de Radiación Obtenido Utilizando el Equipo – Cámara Anecoica – Elevación 90° – Antena Omnidireccional – 2.4 [MHz].

Como se puede apreciar en las dos figuras anteriormente expuestas, es evidente que la antena con la que se trabajó, es una antena omnidireccional

A pesar de que el patrón de radiación de la Figura V.14 no es idéntico al patrón de radiación teórico correspondiente a una antena omnidireccional, cuando esta se encuentra

con una elevación de  $90^\circ$ , como se muestra en la Figura V.13; es evidente que el resultado obtenido utilizando el equipo tiene un comportamiento similar al esperado; ya que ambos patrones de radiación, aunque un poco diferentes en tamaño, buscan tener la misma forma y dirección.

Se debe tener en cuenta que estas diferencias, tanto en elevación  $0^\circ$  como en elevación  $90^\circ$ , son principalmente ocasionadas por el ambiente donde se realizaron las pruebas, es decir, hay que considerar que para el patrón de radiación de la Figura V.2 y Figura V.9, fueron generados en base a pruebas que fueron efectuadas al aire libre, donde el sistema de transmisión se encontraba expuesto a un sin número de interferencias imposibles de eliminar. Siendo estas interferencias los edificios, arboles, barandales, etc. localizados alrededor de los laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE.

De igual manera, para el patrón de radiación de la Figura V.3, la Figura V.5, la Figura V.7, la Figura V.10, la Figura V.12 y la Figura V.14, hay que tener en cuenta que las pruebas fueron realizadas dentro de una cámara anecoica que se encontraba en desuso y de la cual no se conoce, de manera concreta, el estado en la que se encuentra, por lo que, la inserción de fallas dentro del sistema de transmisión también es innegable.

No se debe olvidar, que el material metálico con el que fueron construidas las minitorres de sustentación, generan una especie de tierra dentro del sistema de transmisión, lo cual afecta indudablemente la forma en la que se transmite y se reciben las señales.

Este problema se ve reflejado de manera más notoria en la figuras correspondientes a los patrones de radiación obtenidos con una elevación de  $90^\circ$ ; ya que aquí se observa, que los patrones de radiación simulados, proporcionados por las pruebas realizadas, no concuerdan con el patrón de radiación teórico.

También hay que tener presente, que debido a que los valores de potencia son tomados cada  $9^\circ$  grados, la resolución de la imagen no va a ser la óptima; ya que el número de muestras va a limitar la calidad de dicha imagen.

Finalmente hay que tener presente las pérdidas y atenuaciones inherentes al uso de cable coaxial, para la transmisión y recepción de señales. Esto sin duda alguna, altera la exactitud y precisión del patrón de radiación simulado, en comparación al teórico.

### **5.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE RADIACIÓN DE LAS ANTENAS DE PRUEBA**

Para la medición de los parámetros de radiación de las antenas UHF y Microonda es necesario un sistema de medida. El esquema general de dicho sistema de medida se lo describe en la Figura II.14.

Las antenas de prueba utilizadas para la obtención de los parámetros de radiación, son antenas tipo Yagi, de construcción artesanal, la primera antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), cuatro elementos Directores, una Ganancia de 8.5 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,08 [dB] y trabajan a una frecuencia de 911 [MHz].

La segunda antena Yagi a utilizarse, posee entre sus características principales de diseño, un elemento Reflector, un elemento Activo (dipolo doblado), siete elementos Directores, una Ganancia de 12.56 [dBi], una Relación Frente/Espalda de 30,03 [dB] y trabajan a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Finalmente, también se planea utilizar antenas omnidireccionales de fabrica, que poseen entre sus características principales una Ganancia de 12 [dBi], y trabajan a una frecuencia de 2.4 - 2.5 [GHz].

Hay que tener en cuenta, que los resultados presentados a continuación, son mediciones obtenidas a través del analizador de cables y antenas Anritsu S362E.



### 5.3.1 Pérdida de Retorno

La pérdida de retorno es la diferencia entre la potencia de la señal transmitida y la potencia de las reflexiones de la señal, causadas por las variaciones en la impedancia del cable. Un valor alto de pérdida de retorno, da como resultado una gran diferencia entre las potencias de las señales transmitidas y reflejadas.

En las siguientes figuras se muestra la pérdida de retorno, tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:

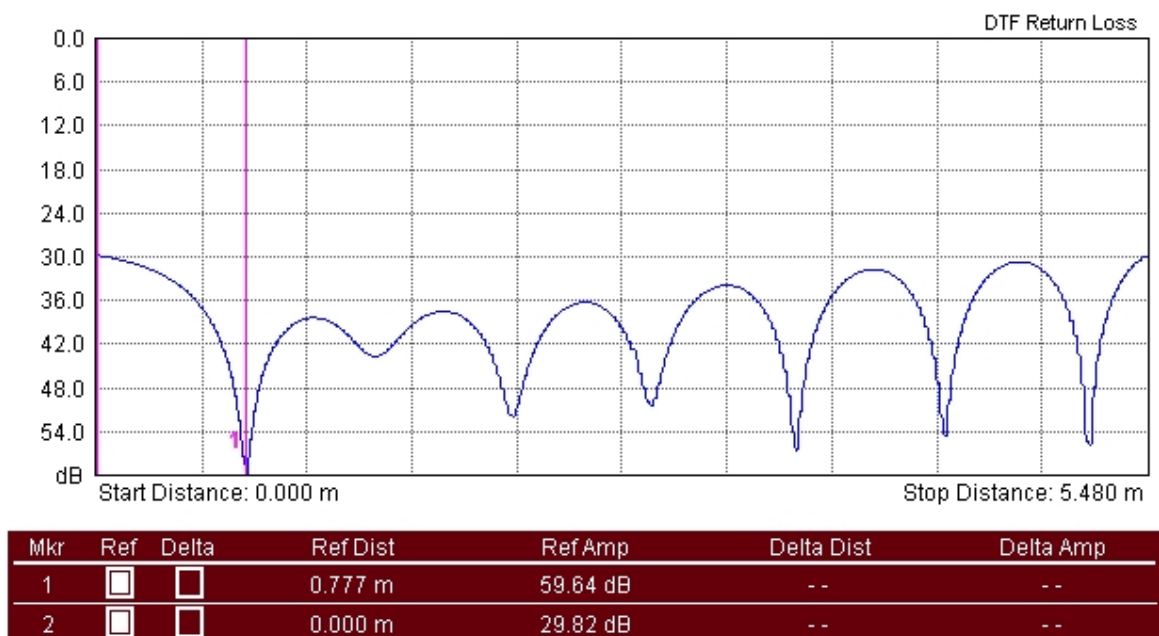
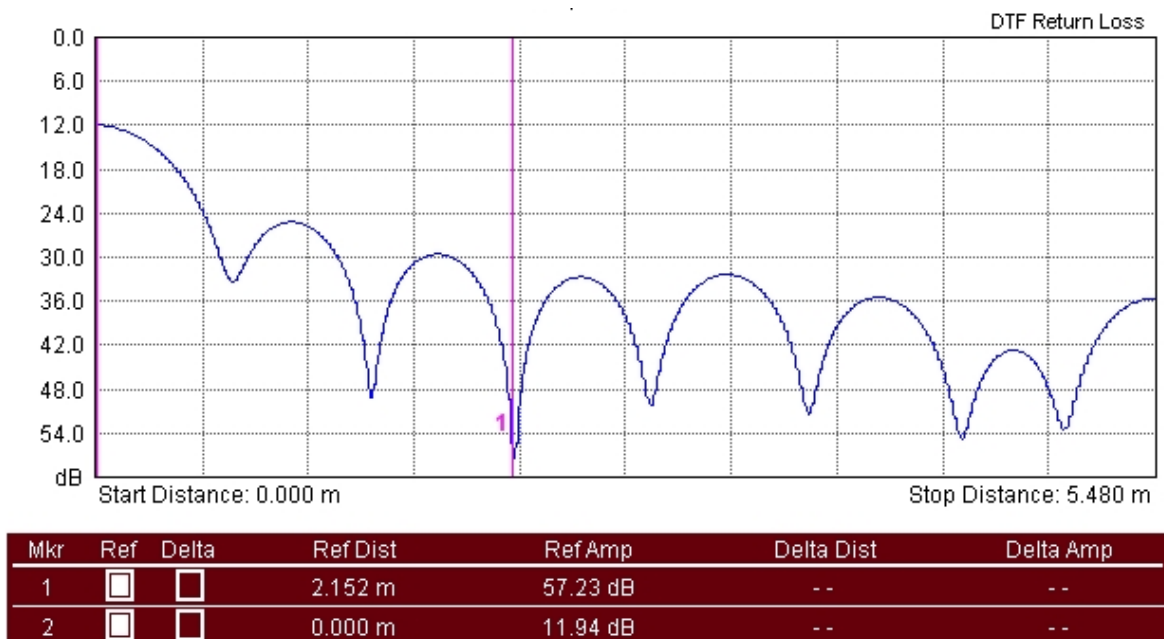
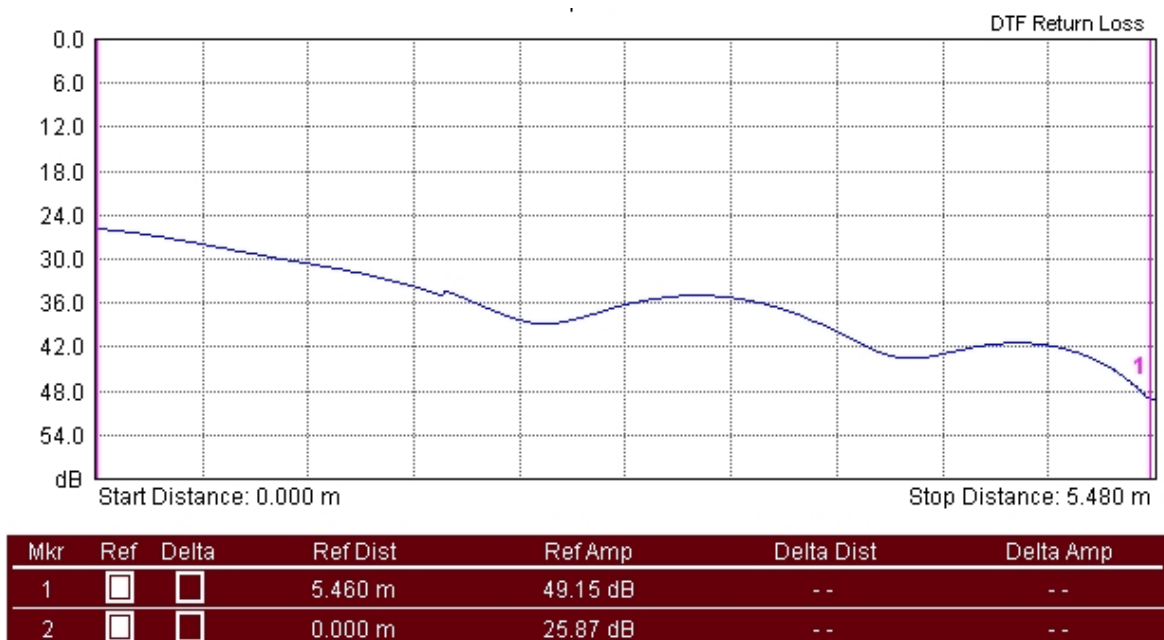


Figura V.15: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.



**Figura V.16: Pérdida de Retorno – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E**



**Figura V.17: Pérdida de Retorno – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.**

Los marcadores de la Figura V.15, Figura V.16 y la Figura V.17 muestran el valor mínimo y el valor máximo de pérdida de retorno en [dB], que tienen las antenas de prueba, respectivamente:

Estos valores son:

- Antena Yagi a 911 [MHz] → Valor Mínimo: 29.82 [dB] a 0.00 [m].  
→ Valor Máximo: 59.64 [dB] a 0.777 [m].
- Antena Yagi a 2.4 [GHz] → Valor Mínimo: 11.94 [dB] a 0.00 [m].  
→ Valor Máximo: 57.23 [dB] a 2.152 [m].
- Antena Omnidireccional a 2.4 [GHz] → Valor Mínimo: 25.87 [dB] a 0 [m].  
→ Valor Máximo: 49.15 [dB] a 5.46 [m].

Estos valores deben ser tenidos siempre en cuenta, ya que como se menciona anteriormente, un valor elevado de pérdida de retorno, tanto en la antena de transmisión como en la antena de recepción, ocasionará que de como resultado una gran diferencia entre las potencias de las señales transmitidas y reflejadas.

De igual manera, estos valores demuestran el porqué de la diferencia entre la potencia de transmisión y la potencia de recepción, señalados en las tablas del capítulo anterior.

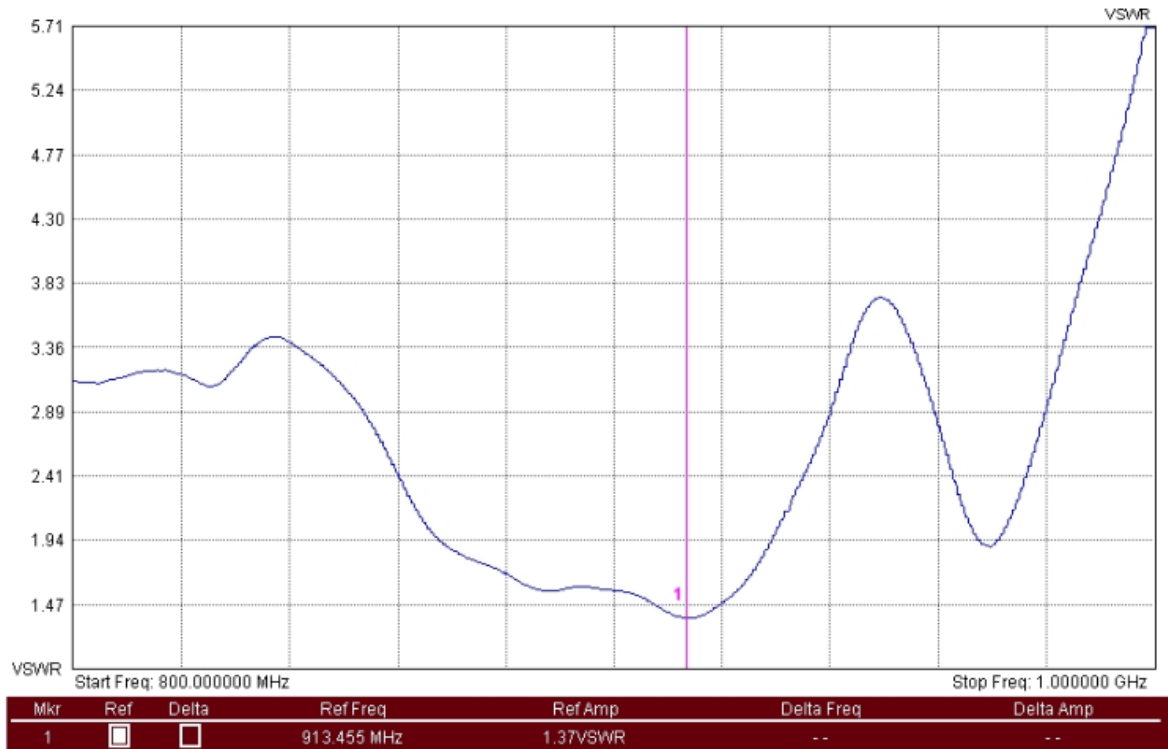
### 5.3.2 Relación de Ondas Estacionarias

La razón de onda estacionaria (ROE) o Standing Wave Ratio (SWR) permite determinar si dos o más módulos eléctricos o electrónicos de impedancias diferentes, que se están interconectando dentro de un sistema, están adaptados adecuadamente o por si el contrario, se encuentran desacoplados.

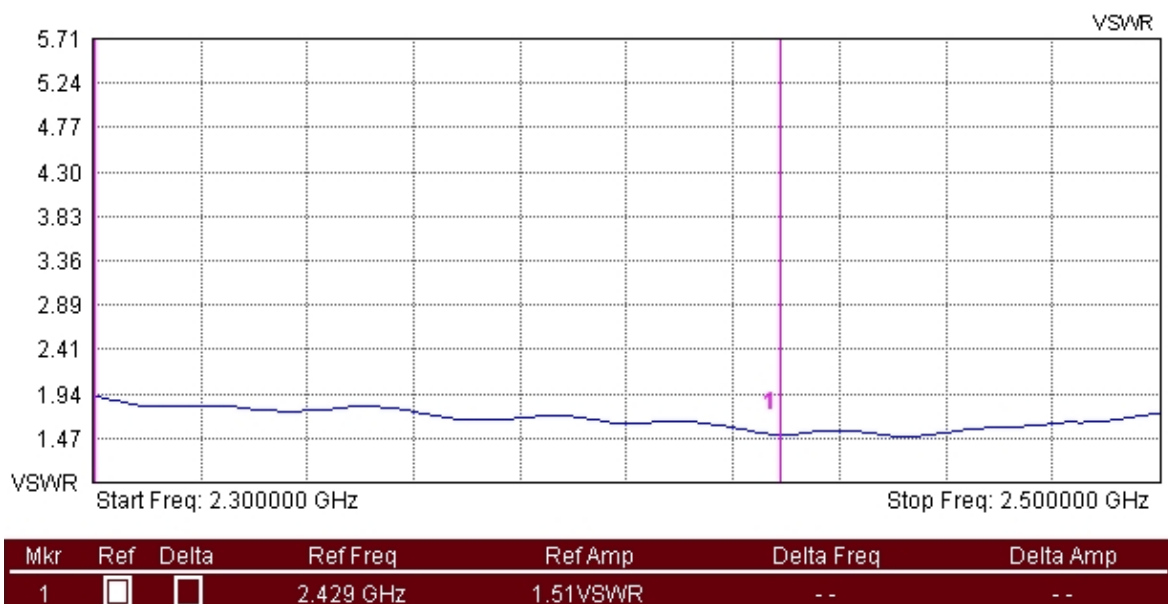
Puesto que no siempre se puede acoplar una línea de transmisión de manera exacta, es necesario tener una medida que nos indique el grado de desacoplamiento. A esta medida se la conoce como Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).

En las siguientes figuras se muestra el Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena

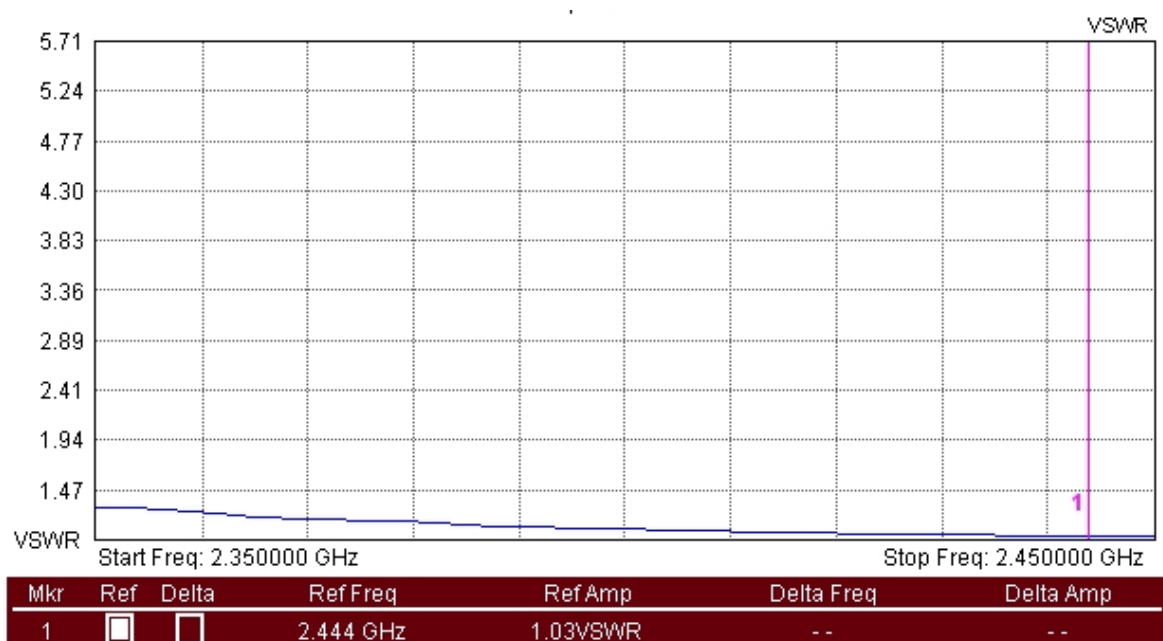
Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:



**Figura V.18: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.**



**Figura V.19: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.**



**Figura V.20: Relación de Onda Estacionaria VSWR – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.**

El marcador de la Figura V.18, Figura V.19 y la Figura V.20 muestran el mejor valor de VSWR, que tienen las antenas de prueba, respectivamente.

Estos valores son:

- Antena Yagi a 911 [MHz] → Valor VSWR: 1.37 a 913.455 [MHz].
- Antena Yagi a 2.4 [GHz] → Valor VSWR: 1.51 a 2.429 [GHz].
- Antena Omnidireccional a 2.4 [GHz] → Valor VSWR: 1.03 a 2.444 [GHz].

Considerando que el VSWR ideal debe ser igual a uno, y que el VSWR de las antenas de prueba no difiere en mucho de este valor, es apropiado decir que dichas antenas de prueba tienen un adecuado proceso de diseño y construcción.

De igual manera, estos valores indican que las antenas de prueba están resonando a una frecuencia no muy diferente a la estipulada en el diseño y simulación de las mismas;

además de no encontrarse desacoplados de manera significativa, por lo que es justificado su uso dentro del presente proyecto.

Finalmente, se debe tener en cuenta, que el diseño y construcción de las antenas Yagi de prueba, no se encontraban estipulados dentro del proyecto, por lo que haber obtenido tan buenos resultados es una gran satisfacción.

### 5.3.3 Pérdida del Cable

Las pérdidas de la señal ocurrirán en los cables que conectan el transmisor y el receptor a las antenas. Las pérdidas dependen del tipo de cable y la frecuencia de operación a la que se esté trabajando. En general, más allá de cuanto cable se tenga a disposición, este siempre causará una pérdida.

En las siguientes figuras se muestra la pérdida de cable, tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:

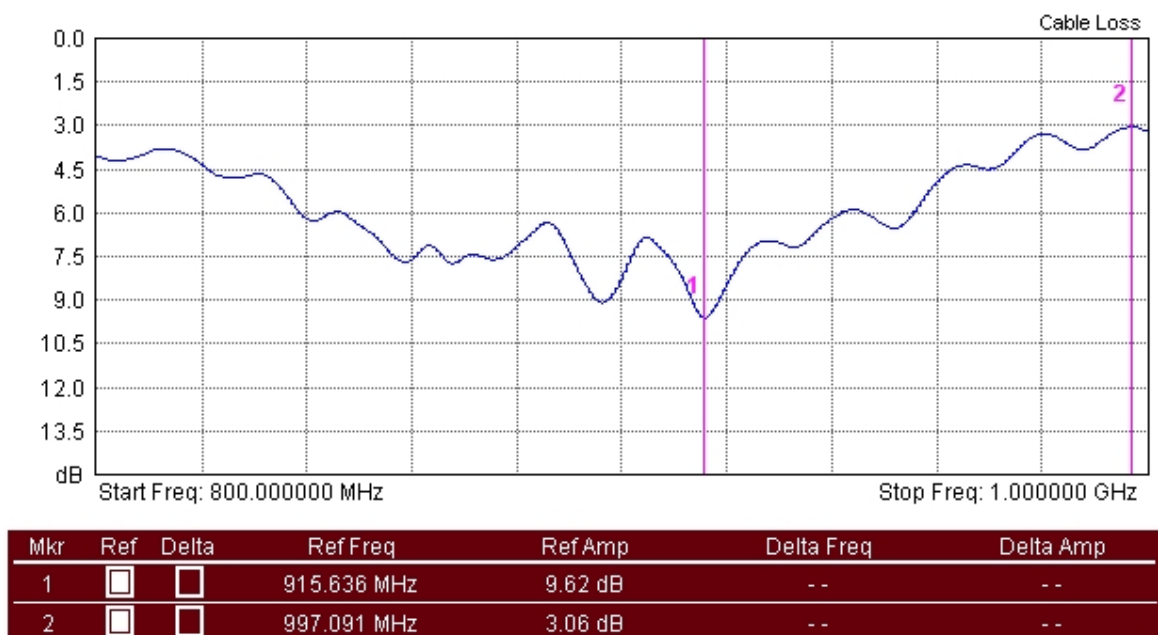


Figura V.21: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.

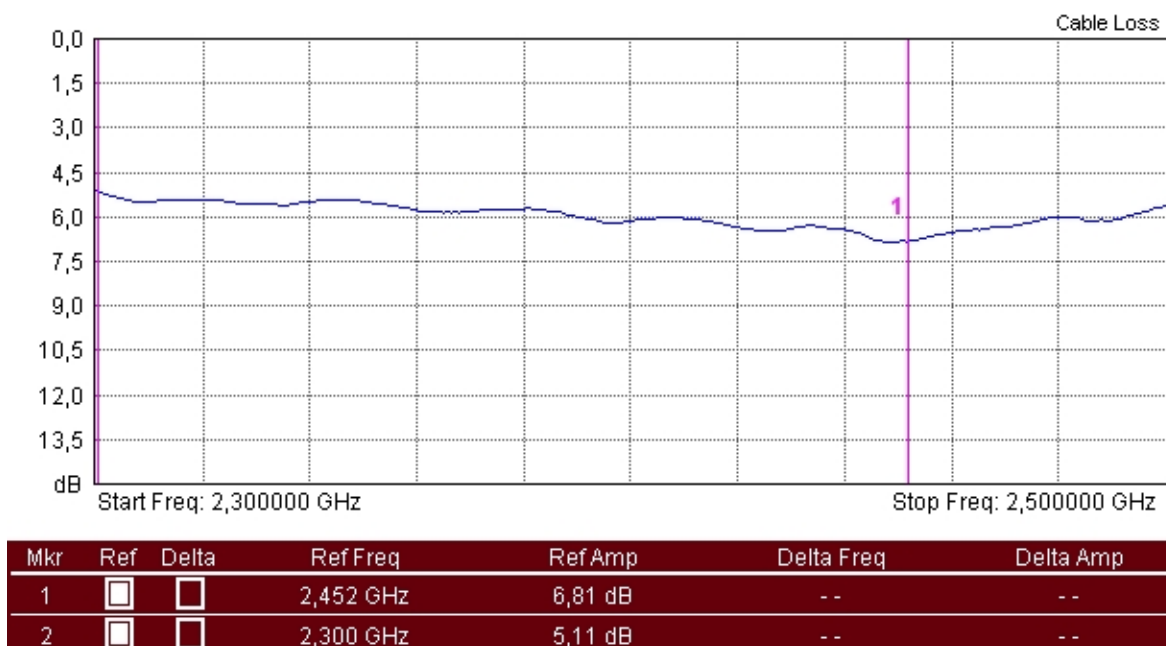


Figura V.22: Pérdida del Cable – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

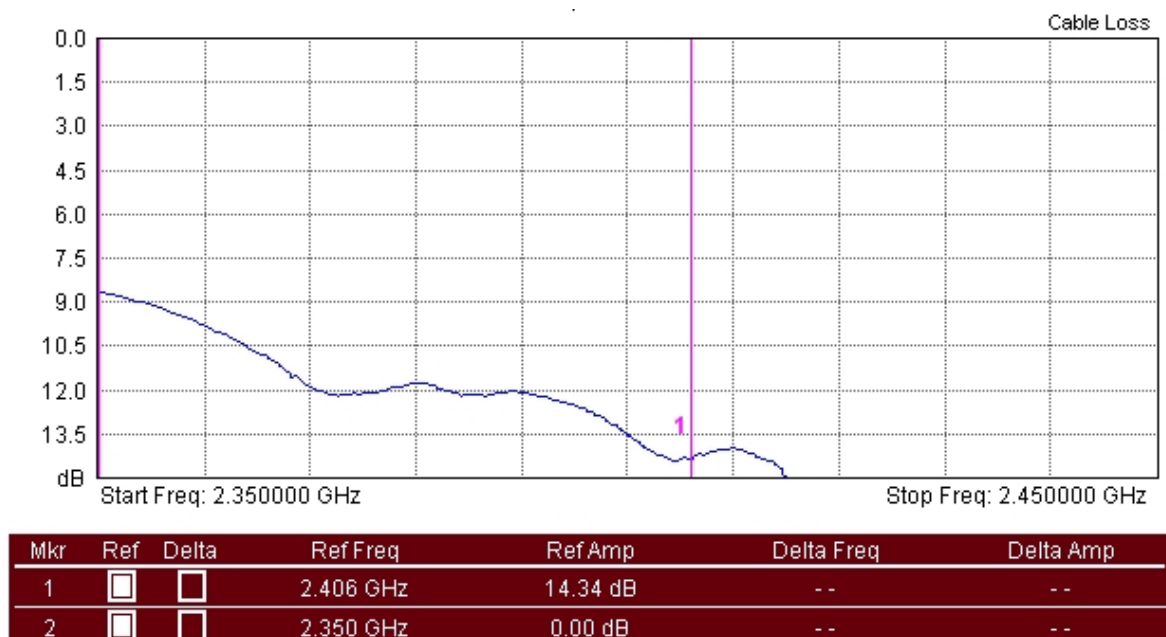


Figura V.23: Pérdida del Cable – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

Los marcadores de la Figura V.21, la Figura V.22 y la Figura V.23 muestran el valor mínimo y el valor máximo de pérdida del cable en [dB], que tienen las antenas de prueba, respectivamente.

Estos valores son:

- Antena Yagi a 911 [MHz] → Valor Mínimo: 3.06 [dB] a 997.091 [MHz].  
→ Valor Máximo: 9.62 [dB] a 915.636 [MHz].
- Antena Yagi a 2.4 [GHz] → Valor Mínimo: 5.11 [dB] a 2.300 [GHz].  
→ Valor Máximo: 6.81 [dB] a 2.452 [GHz].
- Antena Omnidireccional a 2.4 [GHz] → Valor Mínimo: 0 [dB] a 2.35 [GHz].  
→ Valor Máximo: 14.34 [dB] a 2.406 [GHz].

Como se aprecia en las gráficas anteriores, la pérdida del cable depende de la distancia de dicho cable y de la frecuencia a la que se esté trabajando. Esto de manera análoga a lo que sucede con la atenuación del cable, presentada en el capítulo II; y mencionada en la sección 2.3.

Tanto la pérdida de cable como la atenuación del cable son aspectos importantes en el diseño, simulación y construcción de cualquier antena, además de ser aspectos a tener en cuenta dentro del sistema de transmisión y el balance de potencias de dicho sistema.

#### 5.3.4 Carta de Smith

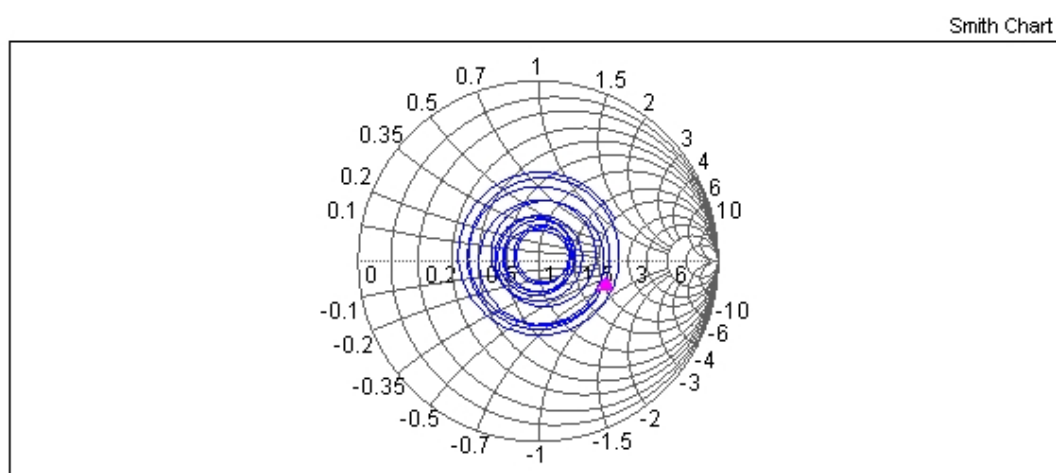
La carta de Smith es una herramienta gráfica que permite la obtención de diversos parámetros de las líneas de transmisión y la resolución de problemas de adaptación de impedancias, evitando las operaciones con números complejos, que suelen implicar estos cálculos.

Se trata de un diagrama polar especial que contiene círculos de resistencia constante, círculos de reactancia constante, círculos de relación de onda estacionaria constante y curvas radiales que representan los lugares geométricos de desfase en una línea de valor constante.



La carta de Smith se puede utilizar para una variedad de propósitos incluyendo la determinación de la impedancia, adaptación de la impedancia, optimización del ruido, la estabilidad, etc.

En las siguientes figuras se muestra la Carta de Smith, tanto de la antena Yagi a 911 [MHz], de la antena Yagi a 2.4 [GHz] y de la antena Omnidireccional a 2.4 [GHz]; adquiridas mediante el analizador de cables y antenas Anritsu S362E:



Mkr	Ref	Delta	Ref Freq	Ref Amp	Delta Freq	Delta Amp
1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	800.000 MHz	(103.03, -29.85i)	--	--
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	800.000 MHz	(103.03, -29.85i)	0.0000 Hz	(103.0338, -29.85i)

**Figura V.24: Carta de Smith – Antena Yagi – 911 [MHz] – Mediante Anritsu S362E.**

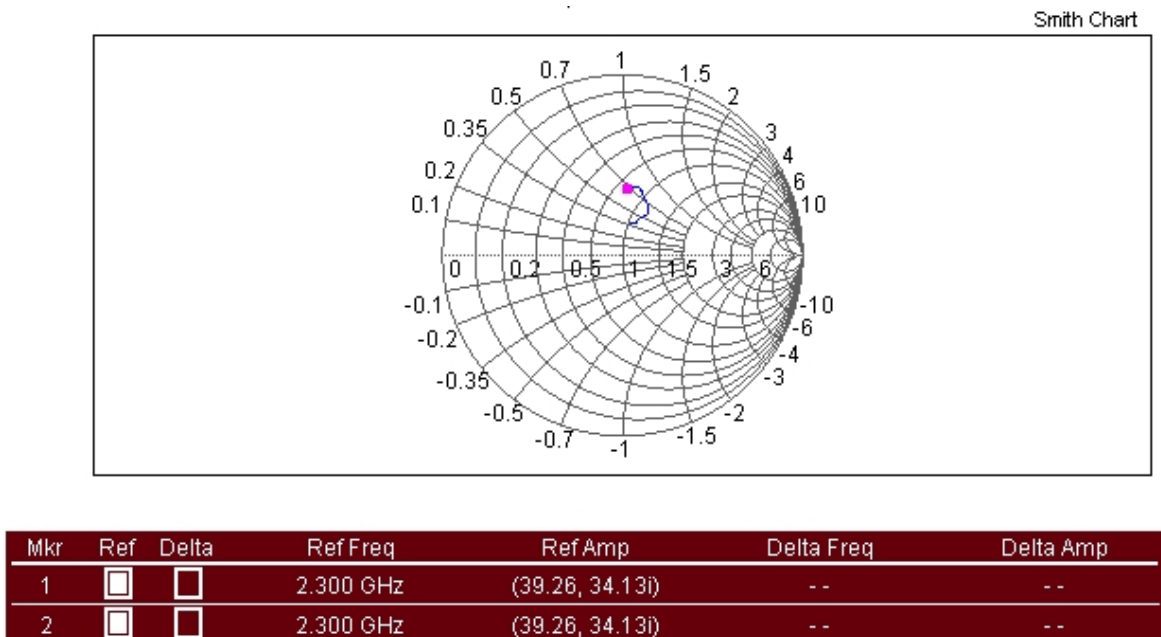


Figura V.25: Carta de Smith – Antena Yagi – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

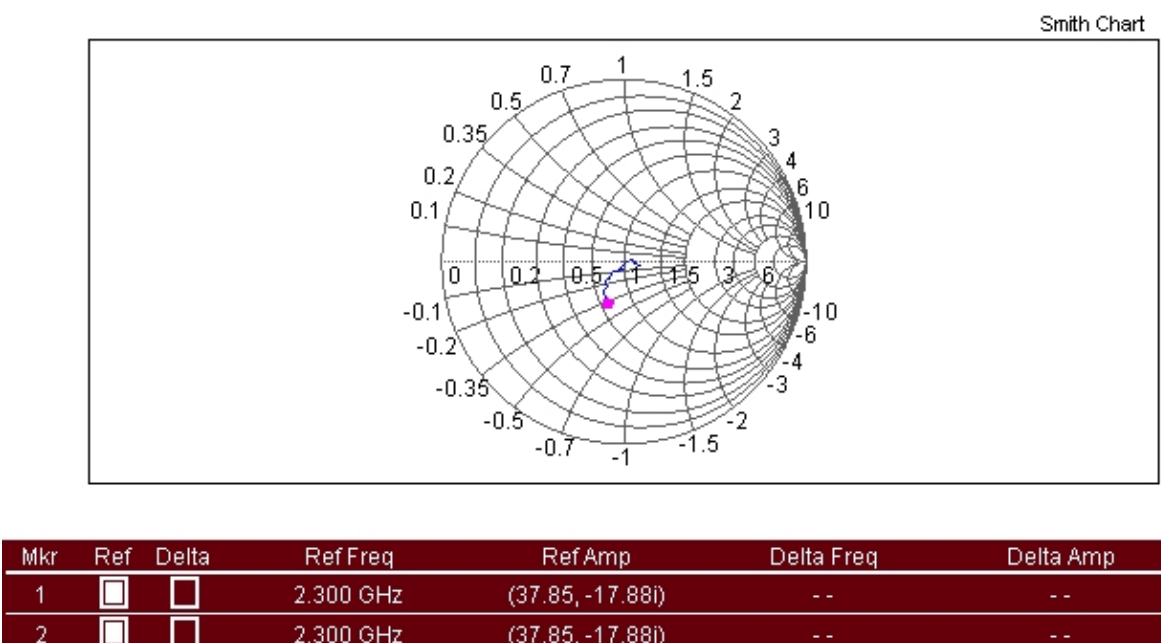


Figura V.26: Carta de Smith – Antena Omnidireccional – 2.4 [GHz] – Mediante Anritsu S362E.

La Figura V.24, la Figura V.25 y la Figura V.26 muestran la Carta de Smith, que tienen las antenas de prueba, respectivamente.

Las “circunferencias” mostradas en la Figura V.24, indican todas las frecuencias a las que las antenas trabajan (ya que no se ha fijado ninguna frecuencia en específico). Además estas “circunferencias” indican que existe una impedancia compleja, es decir, una

impedancia con parte real y parte imaginaria, señalando así, que el acople de las antenas no es perfecto.

Considerando que las “circunferencias” tienen como centro el uno, en la carta de Smith, se puede decir que a pesar de que el acople no es perfecto, es lo suficientemente aceptable como para que dichas antenas formen parte del presente proyecto.

De igual manera, las pequeñas líneas que se pueden observar en las gráficas tanto de la Figura V.25 y la Figura V.26, indican que el rango de frecuencia que se utilizó para el estudio de este parámetro de radiación es muy pequeño; pero al encontrarse cortando a la circunferencia perteneciente al “1”, se demuestra que las antenas están resonando a la frecuencia para la que fueron diseñadas y construidas.

## **5.4 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL SISTEMA DE MEDIDA**

### **5.4.1 Alcances**

Diseño y construcción de un servomecanismo de control de posicionamiento en azimut y elevación de una antena de prueba que se encuentra en la cámara anecoica, para obtener las características fundamentales de la antena trabajando en la banda UHF y microonda.

El diseño y la construcción de la minitorre de sustentación permiten de manera fácil y sencilla, reemplazar la antena de prueba que se está utilizando, por otra, si el caso fuera necesario; ya que la base donde se montan dichas antenas constan de un simple mecanismo, para llevar a cabo esta tarea de sostén.

La interfaz HMI realizada en MatLab permite la obtención del patrón de radiación de la antena de prueba; con diferentes resoluciones, ya que esta interfaz da la posibilidad de establecer el número de datos de potencia que se desean adquirir para realizar dicha gráfica.

La interfaz HMI realizada en LabView permite controlar el giro en dos grados de libertad, de la minitorre de sustentación, ya sea en azimut o elevación. De esta manera permite controlar la forma en que rotan las antenas de prueba, en azimut; ya que permite determinar los grados específicos en los que se quiere el movimiento, igualmente permite establecer el ángulo, en elevación, al cual se desea trabajar y obtener el patrón de radiación de la antena de prueba.

El prototipo, es decir las minitorres de sustentación, en conjunto con las respectivas interfaces HMI, que permiten tanto el control del giro en dos grados de libertad, de las antenas de prueba, como la obtención del patrón de radiación de dichas antenas de prueba; permiten devolver funcionalidad, a una cámara anecoica, que se encontraba en desuso y en peligro de ser desmantelada por completo.

#### **5.4.2 Limitaciones**

La minitorre de sustentación de la antena de transmisión, en la cual se realiza el giro en dos grados de libertad (azimut y elevación); se encuentra limitada por el peso de antena que se pretende usar, ya que a pesar de la colocación de un peso externo que ayude a balancear el sistema, en lo físico, dicho peso no sería suficiente si se pretendiera usar una antena de proporciones considerables; ya que el peso máximo que puede soportar, en la minitorre de sustentación, es de 0.5 [kg]. La colocación de una antena demasiado pesada ocasionaría el mal funcionamiento de los motores paso a paso, que permiten el giro en dos grados de libertad, utilizados en la minitorre de sustentación.

El rango de frecuencia de trabajo de las antenas de prueba; ya que siempre se debe tener presente que la cámara anecoica tiene una banda de operación de 2 - 3 [GHz].

La distancia de los cables coaxiales necesarios para conectar las antenas, tanto de transmisión como de recepción, a los equipos (analizador de espectros y generador de señales RF); ya que estos cables deben tener una distancia basada en el factor de propagación, como se indica en la fórmula 2.8. Además, estos cables, no pueden ser muy largos, por las pérdidas y atenuaciones, que podrían insertar dentro del sistema de transmisión.

El número de muestras (datos de potencia) que pueden ser adquiridos para obtener la gráfica del patrón de radiación de las antenas de prueba, ya que este número de muestras está basado en las características de giro del motor a pasos ( $1.8^\circ$  por pulso); por lo que dicho número de muestras, necesariamente deberá ser un múltiplo de 1.8, además de ser un divisor de  $360^\circ$ , que es el rango de giro en azimut. Este número de muestras, necesariamente afectará la resolución en la cual se presente la gráfica del patrón de radiación de las antenas de prueba.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las diversas pruebas experimentales, realizadas con el nuevo prototipo a lo largo de todo este proceso de investigación, es posible puntualizar las siguientes conclusiones:

1. El nuevo prototipo implementado cumple con los objetivos de esta tesis, Diseño y construcción de un sistema de control en azimut y elevación para la obtención de las características de radiación de antenas utilizando la cámara anecoica.
2. El análisis previo de los sistemas de control de posicionamiento, tanto en azimut como en elevación, para las minitorres de sustentación de las antenas de prueba en el laboratorio de RF, permitió determinar que un sistema de control en lazo cerrado era el más adecuado para controlar las variables involucradas dentro de la realización del presente proyecto.
3. El análisis previo de las características, tanto de diseño como de construcción, de la cámara anecoica con la que se trabajó a lo largo de todo este proyecto, fue clave para determinar el tipo de antenas con las que es posible trabajar, además de confirmar que las bandas en las que se pretendía trabajar también eran viables para este proyecto.

4. El análisis previo de las características y el funcionamiento del analizador de espectros Anritsu S362E, permitió determinar la viabilidad de su control a través de software; ya que fue posible determinar que este equipo acepta y reconoce comandos SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation).
5. La utilización de un sistema de amortiguamiento, que permita disminuir la vibración inherente al uso de motores paso a paso, en la base del prototipo, para conseguir el movimiento en azimut de la minitorre de sustentación es completamente necesario; ya que caso contrario, tal vibración, hace del prototipo un equipo inútil, debido a que anulan el movimiento continuo y armónico del sistema.
6. El prototipo construido requirió de un diseño adecuado de una fuente de alimentación, que suministre el voltaje (12 [V]) y la corriente (2 [A]) necesarios para que se energicen los motores paso a paso utilizados para conseguir el movimiento, en dos grados de libertad, de las minitorres de sustentación.
7. Para el diseño de la interfaz HMI, que permite controlar el movimiento en dos grados de libertad, a través de la PC, de las minitorres de sustentación, se requirió conocimientos del software utilizado, en este caso LabView.
8. Para el diseño de la interface HMI, que establece la comunicación de la PC con el analizador de espectros Anritsu S362E; permitiendo la adquisición de datos de potencia provenientes de este equipo de una manera virtual, se requirió conocimientos del software utilizado, en este caso MatLab.
9. Para la construcción de las antenas Yagi de prueba, se requirió conocimientos de software especializado en el diseño de dichas antenas, en este caso QY4; además de la elección de buenos materiales que permitan que estas antenas sean ligeras y portables.
10. La utilización de cable coaxial RG-58 para conectar las antenas de prueba con los equipos de medición de RF, conlleva la realización de un análisis que permita

determinar las pérdidas inherentes al uso de dicho cable. Como resultado de este análisis se obtuvieron los siguientes valores de atenuaciones:

$$\text{atenuación cable antena Tx} = 4.3150[\text{dB}]$$

$$\text{atenuación cable antena Rx} = 3.9699[\text{dB}]$$

11. El factor de propagación es un dato importante a tener en cuenta en el momento de determinar la longitud de los cables coaxiales; ya que esta longitud no es un valor al azar, sino que además de considerar este factor, se basa en la frecuencia de trabajo de las antenas de prueba.
12. El prototipo SCAE permite comprobar algunos modelos matemáticos utilizados dentro de la Propagación y el Radio Enlace a corta distancia.
13. La elaboración de pruebas de funcionamiento del sistema de control de posición y la obtención de patrones de radiación de antenas de prueba, permitieron determinar la efectividad del giro en dos grados de libertad de las minitorres de sustentación, además de permitir la comparación de dichos patrones de radiación con los patrones de radiación teóricos, obtenidos a través de software de simulación. De esta manera fue posible la realización de los análisis de resultados, a más de dar nueva vida a la cámara anecoica.



## 6.2 RECOMENDACIONES

Una vez que el diseño y construcción de un sistema de control, en azimut y elevación, para la obtención de las características de radiación de antenas utilizando la cámara anecoica ha sido desarrollado satisfactoriamente, luego de haber enfrentado y solventado una serie de inconvenientes, se puede recomendar lo siguiente:

1. Para el diseño e implementación de los circuitos es recomendable fijarse en la hoja técnica de los elementos. Hay que tener muy en cuenta la polarización, distribución de pines y la manera de cómo conectarlo para que funcione correctamente, ya que si alguno de ellos es mal colocado, se puede producir un corto circuito o el mal funcionamiento de los mismos.
2. Para la fuente de alimentación es importante tener un transformador en muy buen estado, con un voltaje y una corriente que nos den una potencia un poco mayor a lo requerido, para evitar cualquier inconveniente.
3. Familiarizar a los alumnos del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE con la cámara anecoica; ya que la gran mayoría de ellos pasa toda su vida universitaria sin saber que, dentro del departamento, existe esta herramienta de trabajo; desconociendo también, de su funcionalidad.
4. Incorporar y realizar prácticas de laboratorio, dentro de materias pertenecientes al área de Telecomunicaciones del Departamento de Eléctrica y Electrónica, como Antenas o RF, que necesiten de la utilización de la cámara anecoica; ya que muchas veces estas materias son muy teóricas y los alumnos no tiene la posibilidad de en verdad ver y hacer realidad, todo lo que están recibiendo dentro del salón de clases; haciendo que estas materias se conviertan en tediosas, aburridas y difíciles de aprender.
5. Mejorar, en lo posible, tanto el diseño como los materiales, con lo que fueron construidas las minitorres de sustentación; buscando convertirlo en un prototipo mucho más ligero y que inserte muchas menos interferencias, que el prototipo actual.

6. Cambiar o reemplazar el motor paso a paso que permite el giro en azimut, por servomotores o motores paso a paso de mejores características; que permitan tener una mejor resolución (número de muestras de datos de potencia que pueden ser adquiridos) en el momento de obtener el patrón de radiación de las antenas de prueba.
7. Cambiar o reemplazar el motor paso a paso que permite el giro en elevación, por servomotores o motores paso a paso de mejores características; que permitan tener un mayor torque dentro del sistema, permitiendo de esta manera la utilización de antenas de prueba de mayores pesos, sin el temor de entorpecer el giro, en elevación, en la minitorre de sustentación.
8. Tratar de unificar, dentro de un solo ambiente de programación, las pantallas donde se muestran las diferentes interfaces HMI; ya que estas se encuentran desarrolladas en LabView y en Matlab, respectivamente.
9. Para no producir daños al equipo, por mal uso del mismo, se deben seguir las instrucciones del manual de usuario, presentadas en los anexos del presente proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Diagrama\\_gen\\_rad.JPG](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Diagrama_gen_rad.JPG).
- [2] <http://www.zero13wireless.net/foro/showthread.php?604>.
- [3] [http://www.carlosmezquida.com/word/wp-content/archive/Pagina\\_2\\_CAPITULO3.pdf](http://www.carlosmezquida.com/word/wp-content/archive/Pagina_2_CAPITULO3.pdf)
- [4] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/hernandez\\_a\\_r/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo2.pdf)
- [5] Marcial Lopez Tafur. “Antenas”  
<http://jetclub.baleaerweb.net/get/parametros%20antenas.pdf>
- [6] Iván Bernal, Ph.D. Escuela Politécnica Nacional. “Revisión de Conceptos Básicos de Antenas y Propagación”.  
<http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/AbrilAgosto06/Inalambricas/CLASE/S/AntenasParteI.pdf> (Quito - Ecuador, 2005).
- [7] Miguel Ferrando, Alejandro Valero. Departamento de Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia. “Introducción. Parámetros de Antenas”.  
[http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Tema\\_1.PDF](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF)
- [8] <http://www.redlatinos.com/posts/cienciaytecnologia/2551/La-antena-y-sus-caracteristicas.html>.
- [9] Mario Vilma. “Introducción a las Antenas”.  
<http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/AbrilAgosto06/Inalambricas/CLASE/S/AntenasParteI.pdf> (Abril, 2005).
- [10] [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-7642011000400008&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-7642011000400008&script=sci_arttext).

- [11] <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capdos/swr.pdf>
- [12] <http://www.frm.utn.edu.ar/comunicaciones/antenas.html>
- [13] <http://www.directivesystems.com/DSFO432-15.htm>.
- [14] <http://www.laperlaonline.com.ar/site/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=2>.
- [15] [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke\\_frec\\_radio/ke\\_frec\\_radio\\_2.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_frec_radio/ke_frec_radio_2.htm).
- [16] [http://www.electronicam.es/analizador\\_espectros.html](http://www.electronicam.es/analizador_espectros.html)
- [17] [http://www.finaltest.com.mx/Analizadores\\_de\\_espectro\\_s/22.htm](http://www.finaltest.com.mx/Analizadores_de_espectro_s/22.htm)
- [18] <http://www.anritsu.com/en-us/products-solutions/products/s362e.aspx>
- [19] <http://www.webelectronica.com.ar/montajes2/nota09.htm>
- [20] <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=EC&lc=eng&ckey=748073&nid=-536902260.536908604.00&id=748073>
- [21] <http://www.qsl.net/oe3ajc/coax.pdf>
- [22] [http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/c17\\_28c.pdf](http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/c17_28c.pdf)
- [23] [http://www.telecnor.com/catalogo/cablespararadiofrecuencia/cables\\_coaxiales.php](http://www.telecnor.com/catalogo/cablespararadiofrecuencia/cables_coaxiales.php)
- [24] <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Tabla-cable-coaxial.php>.
- [25] <http://www.ie.itcr.ac.cr/marin/lic/el4515/antenas/conectores.pdf>
- [26] <http://www.epcom.net/PDF/Productos/rfconnectors.pdf>.
- [27] Ernest Cid. Ingeniero Superior en Electrónica. “Cámaras Anecoicas”.  
<http://www.cypsela.es/especiales/pdf146/camaras.pdf>
- [28] Ing. Jorge Cosco Grimaney. Universidad Nacional de Ingeniería. “Controles Eléctricos y Automatización”.

- <http://www.scribd.com/doc/2634725/CONTROLADORES> (Lima - Perú, 2008).
- [29] [http://www.galeon.com/machver/CONTROLPROC\\_I/1BASICASCONTROL.pdf](http://www.galeon.com/machver/CONTROLPROC_I/1BASICASCONTROL.pdf)
- [30] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/nunez\\_e\\_f/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf)
- [31] [www.cucei.udg.mx/~jriviera/.../IC/Acciones%20de%20control.ppt](http://www.cucei.udg.mx/~jriviera/.../IC/Acciones%20de%20control.ppt)
- [32] [http://robots-argentina.com.ar/MotorPP\\_basico.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm).
- [33] [http://robots-argentina.com.ar/MotorPP\\_basico.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm).
- [34] [http://grupos.emagister.com/imagen/motores\\_paso\\_a\\_paso/1007-158568](http://grupos.emagister.com/imagen/motores_paso_a_paso/1007-158568).
- [35] <http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html>
- [36] Ing. Javier García de Jalón, Ing. José Ignacio Rodríguez, Ing. Jesús Vidal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales - Universidad Politécnica de Madrid. “Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero”.
- <http://mat21.etsii.upm.es/ayudainf/aprendainf/Matlab70/matlab70primero.pdf> (Madrid, Diciembre 2005).
- [37] Ángel Cardama Aznar, “*Antenas*”, Editorial UPC, Págs. 233 – 234, 1998.
- [38] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory – Analysis and Design*”, Segunda Edición, Págs. 551 -556, 1997.
- [39] <http://www.ivifoundation.org/scpi/default.aspx>
- [40] Anritsu Company, “SCPI Programming Manual, S331E, S332E, S361E, S362E Site Master MS2712E, MS2713E Spectrum Master MT8212E Cell Master”, Págs. 77 – 129, Agosto 2009.
- [41] <http://www.ni.com/visa/>
- [42] <http://photos1.blogger.com/blogger/1670/691/1600/alim.jpg>
- [43] <http://javidecas.blogspot.es/img/WhitePaper.pdf>

## **FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO**

El presente proyecto de grado fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica, reposando en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí,

CrnI. Edwin Chávez Ph.D.

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

MSc. Ing. Víctor Proaño.

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACION Y CONTROL**

Dr. Jorge Carvajal.

**SECRETARIO ACADÉMICO**

Fausto Gonzalo Carrera Flores

**AUTOR**

Christian Enrique Cuvi Constante

**AUTOR**