

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DIAGRAMAS
DE RADIACIÓN DE ANTENAS, TEÓRICOS Y
EXPERIMENTALES**

www.bdigital.ula.ve

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Electricista

Br. Milena Patricia Aldana Barreto
Tutores: Prof. Zulima Barboza Morán
Prof. Francisco Viloría

Mérida, Junio, 2010

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DE ANTENAS, TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

Br. Milena Patricia Aldana Barreto

Trabajo de Grado presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado:

Prof. Zulima Barboza Morán
C.I. V-3.036.548

Prof. Francisco Viloría
C.I. V-9.164.539

Prof. José R. Uzcategui
C.I. V-13.803.000

Br. Milena P. Aldana. Estudio Comparativo de los Diagramas de Radiación de Antenas. Teóricos y Experimentales. Universidad de Los Andes. Tutores: Prof. Zulima Barboza, Prof. Francisco Viloria. Junio, 2010.

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un sistema automatizado para obtener el diagrama de radiación de una antena. El sistema consta de dos módulos: el sistema de transmisión y el sistema de recepción. El sistema de transmisión esta compuesto de una antena fuente, implementada con una antena Yagi y un transmisor implementado con un generador de RF. El sistema de recepción esta compuesto por una antena bajo prueba, un receptor implementado con un circuito para acondicionar la señal, y el nivel de la señal medido se convierte de análogo a digital a través microcontrolador, un sistema de posicionamiento implementado con un motor de pasos con un microcontrolador que gestiona la rotación de la antena bajo prueba los 360°, y un sistema de registro de datos implementado con un computador personal, que es el encargado de almacenar los datos de radiación y dibujar el diagrama; estos datos serán enviados vía RS232 desde el microcontrolador hasta el computador. Para la realización de las pruebas se diseñaron dos antenas: una antena Yagi de 5 elementos y un dipolo de media onda, ambas para trabajar en la frecuencia central del canal 14 de UHF. El sistema tiene la capacidad de hacer la comparación del diagrama de radiación teórico con el experimental obtenido. El diseño y compilación de los programas se realizó usando el lenguaje de programación C para el microcontrolador y Visual C# para el computador. En este trabajo se cumplió con el propósito establecido, implementando un sistema que permite obtener de forma automatizada el diagrama de radiación de una antena y que permite hacer el análisis comparativo entre los diagramas de radiación experimentales y teóricos, el cual fue validado con dos tipos de antenas.

Descriptores: Diagrama de Radiación, Campos de Medida, Acondicionamiento de Señal RF, Visual C#, Antenas Yagi, Dipolo de media onda, RS232, Microcontroladores PIC.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN	ii
RESUMEN	iii
Capítulo	pp
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y POSIBLES SOLUCIONES.....	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Solución Propuesta.....	6
2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS ANTENAS.....	8
2.1. Antenas.....	8
2.1.1. Campo Radiado.....	9
2.1.2. Densidad de Potencia.....	10
2.2. Parámetros Característicos de las Antenas	11
2.2.1. Diagrama de Radiación.....	11
2.2.2. Polarización.....	14
2.2.3. Impedancia de Entrada y Eficiencia.....	18
2.2.4. Directividad y Ganancia.....	21
2.2.5. Área Efectiva.....	23
2.3. Ecuación de Transmisión de Friss.....	25
3. MEDIDAS DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.....	27
3.1. Campos de prueba.....	27
3.1.1. Campos de medida en espacio libre.....	27
3.1.2. Campos de medidas con reflexión.....	32
3.1.3. Criterios para el Dimensionamiento de los Campos de Prueba.....	33
3.2. Sistema de medidas.....	37
3.2.1. Antena Fuente.....	38
3.2.2. El Transmisor.....	39
3.2.3. El Receptor.....	40
3.2.4. Sistema de Posicionamiento.....	40
3.2.5. Sistema de Registro de Datos.....	41
3.3. Diseño de las antenas bajo prueba.....	42
3.3.1. Diseño de la Antena Yagi.....	43
3.3.2. Diseño del Dipolo.....	47

4. DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.....	48
4.1. Sistema a desarrollar.....	48
4.1.1. Sistema de Transmisión.....	48
4.1.2. Sistema de Recepción.....	49
4.1.3. Circuito y Programa de PIC, para controlar el Sistema de Recepción.....	60
4.1.4. Programa del PC para representación del Diagrama de Radiación.....	66
5. SISTEMA COMPARATIVO DEL DIAGRAMA TEÓRICO Y EXPERIMENTAL.....	72
5.1. Diagramas de Radiación Teóricos.....	72
5.1.1. Usando MATLAB para obtener el diagrama de radiación teórico de un dipolo de media onda	73
5.1.2. Usando MMANA-GAL para obtener el diagrama de radiación teórico de una antena Yagi.....	74
5.2. Diagramas de radiación experimentales.....	77
5.2.1. Sistema de Transmisión.....	77
5.2.2. Sistema de Recepción	78
5.3. Comparación de los diagramas.....	83
5.4. Análisis de los resultados.....	85
5.4.1. Antena Yagi	85
5.4.2. Dipolo de Media Onda	88
5.4.3. Diagrama de Radiación en Modo Transmisión	91
CONCLUSIONES.....	92
RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	94
APENDICES	96

LISTA DE FIGURAS

Figura	pp
1.1. Diagrama Radiación en coordenadas Polares y Cartesianas.....	4
1.2. Cámara Anecoica de la ETSITB.....	4
1.3. UniTrain-I de tecnología de alta frecuencia y de antenas.....	5
1.4. Sistema a desarrollar para la obtener el diagrama de radiación de una antena.....	6
1.5. Sistema a desarrollar operando en modo transmisión.....	7
2.1. Regiones del Campo Radiado.....	9
2.2. Diagrama de Radiación de una antena Yagi de 8 elementos.....	12
2.3. Diagrama de Radiación de una antena Yagi de 5 elementos donde se muestran los diagramas principales Plano-E y Pano-H	13
2.4. Lóbulos y Haz de Media Onda de un Diagrama de Radiación.....	14
2.5. Tipos de Polarización. Lineal y vertical, Circular a la derecha y Elíptica a la izquierda.....	16
2.6. Factor de pérdida de polarización para antenas lineales.....	17
2.7. Antenas y Circuitos equivalentes en modo Transmisión y en modo Recepción	19
2.8. Ángulo Sólido del Haz.....	23
2.9. Orientación geométrica de las antenas transmisora y receptora.....	25
3.1. Campo Elevado.....	28
3.2. Campo Inclinado.....	29
3.3. Campo Compacto.....	30
3.4. Cámaras Anecoicas Rectangular y Cónica.....	31
3.5. Campo con Reflexión.....	32
3.6. Geometría del campo con Reflexión.....	36
3.7. Diagrama de bloques típico de un sistema de medida de antenas.....	38
3.8. Antena y coordenadas de medida del diagrama.....	40
3.9. Posicionador para medidas en coordenadas esféricas.....	41
3.10. Diagrama de radiación en forma polar y en forma rectangular.....	42
3.11. Antena Yagi.....	43
3.12. Ganancia de la antena Yagi en función del número de elementos.....	43
3.13. Porcentaje de reducción del dipolo en función del diámetro.....	44
3.14. Longitud de los directores en función de su diámetro y posición.....	45
3.15. Plano de la Antena Yagi diseñada, con las longitudes calculadas.....	46
3.16. Ajuste de la impedancia de la antena.....	46

3.17. Longitud de resonancia del dipolo de media onda en función de la relación longitud / diámetro del conductor.....	47
4.1. Sistema de Recepción	50
4.2. Dimensiones del Campo de Prueba del Sistema Propuesto.....	52
4.3. Proceso de acondicionamiento de la señal.....	53
4.4. Etapas del proceso de acondicionamiento de la señal.....	53
4.5. Amplificador comercial tipo Booster.....	54
4.6. Detector de Envolvente.....	55
4.7. Filtro Pasa Bajos.....	55
4.8. Amplificador de Potencia.....	56
4.9. Sistemas de Posicionamiento.....	57
4.10. Driver para rotar el motor de pasos.....	58
4.11. Interconexión entre el PC y el PIC vía RS232.....	59
4.12. Protocolo de comunicación entre el PC y el PIC.....	60
4.13. Circuito para implementar el Sistema de Recepción.....	63
4.14. Diagrama de flujo del programa del PIC.....	65
4.15. Interfaz del Programa del PC.....	67
4.16. Estados del Panel de Comunicación.....	68
4.17. Panel de Datos.....	69
4.18. Panel del Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, en escala logarítmica y lineal.....	70
4.19. Panel del Diagrama de Radiación en Coordenadas Cartesianas, en escala logarítmica y lineal	70
4.20. Panel del Diagrama de Radiación, en escala -180° a 180° y mostrando los valores.....	71
5.1. Código en MatLab para obtener el diagrama de radiación teórico de un Dipolo de media onda.....	73
5.2. Interfaz gráfica del MatLab.....	74
5.3. Interfaz gráfica de MMana-GAL con la Antena Yagi.....	75
5.4. Vista y Diagrama de Radiación de la Antena Yagi.....	76
5.5. Exportar datos del Diagrama de Radiación.....	76
5.6. Interfaz gráfica de MMana-GAL con el Dipolo de Media Onda.....	77
5.7. Vista y Diagrama de Radiación del Dipolo de Media Onda.....	77
5.8. Sistema de Transmisión.....	78
5.9. Sistema de Recepción.....	78
5.10. Ajustes del Sistema de Recepción.....	79
5.11. Ejecución del SADRAY.....	80
5.12. Interfaz Grafica del SADRAY.....	81
5.13. Panel de Comunicación de SADRAY.....	82
5.14. Tabla de datos del SADRAY.....	83
5.15. Diagrama de Radiación Experimental en escala Logarítmica.....	83
5.16. Abrir el diagrama de radiación teórico.....	84
5.17. Tabla de datos con valores experimentales y teóricos.....	84
5.18. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi	85

5.19. Campo de Prueba.....	86
5.20. Campo de Prueba con la antena Yagi en el Laboratorio.....	86
5.21. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala logarítmica.....	87
5.22. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala lineal.....	87
5.23. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala logarítmica.....	88
5.24. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala lineal.....	88
5.25. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala logarítmica.....	89
5.26. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala lineal.....	89
5.27. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala logarítmica.....	90
5.28. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala lineal.....	90
5.29. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, en modo Recepción y Transmisión.....	91

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

Las antenas tienen parámetros fundamentales que las caracterizan y establecen diferencias entre ellas. Uno de los parámetros más importantes es el diagrama de radiación, ya que indica las características de radiación de una antena (potencia, directividad y ganancia), y además a partir de él se pueden obtener otros parámetros.

Dada la importancia que tiene el diagrama de radiación de las antenas y motivado a que el Laboratorio de Microondas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes no cuenta con los equipos que permitan obtener el diagrama de radiación y los demás parámetros característicos de algunas antenas, y que los sistemas comercializados por algunas empresas resultan bastante costosos y no se han podido adquirir por el presupuesto ordinario de la Universidad, se propone el diseño e implementación de un sistema automatizado para la obtención del diagrama de radiación, para ser utilizado con fines didácticos e implementación de prácticas en las asignaturas de área de Telecomunicaciones.

Este trabajo se hace con la finalidad de cubrir las necesidades de la materia Propagación y Antenas, específicamente con el objetivo de fácil implementación para las prácticas de dicha materia. Para este desarrollo se hace énfasis a una serie de objetivos los cuales serán desarrollados en etapas sucesivamente.

Se propone como objetivo general de este trabajo, diseñar e implementar el prototipo de un sistema automatizado que permita obtener el diagrama de radiación de una antena en el plano horizontal, para posteriormente compararlo con su respectivo diagrama de radiación teórico.

Para el desarrollo de esto, específicamente se plantea,

- Implementar un sistema automatizado para la obtención del diagrama de radiación de una antena,
- Diseñar las antenas a utilizar,
- Obtener el diagrama de radiación de las antenas, mediante el uso del software, y
- Determinar la validez de los diagramas de radiación obtenidos con el software.

La estructura de este trabajo es la siguiente. En el capítulo 1 se describe el planteamiento del problema y las posibles soluciones. En el capítulo 2 se describen las antenas, su campo radiado y los parámetros característicos. Entre los parámetros se incluyen el diagrama de radiación, la polarización, la impedancia, la eficiencia, la directividad, la ganancia y el área efectiva. Además de la ecuación de transmisión de Friss. En el capítulo 3 se describen las medidas del diagrama de radiación, que incluyen la descripción de los campos de prueba y los criterios para su dimensionamiento. También se describen los sistemas de medida y la instrumentación necesaria para realizar las mediciones de un diagrama de radiación. Además se describe el diseño de las antenas a utilizar en este trabajo, que incluyen una antena Yagi de 5 elementos y un dipolo de media onda, ambas para trabajar en la frecuencia central del canal 14 de UHF. En el capítulo 4 se describe el diseño e implementación de la solución al problema planteado, que incluye un receptor implementado con circuitos para acondicionar la señal incidente y ser medida y convertida de analógico a digital a través microcontrolador PIC, un sistema de posicionamiento implementado con un motor de pasos comandado por un microcontrolador que gestiona la rotación de la antena los 360°, y un sistema de registro de datos implementado con un computador personal, que es el encargado de almacenar los datos de radiación y dibujar el diagrama; estos datos serán enviados vía RS232 desde el microcontrolador hasta el computador. Se describe la implementación de un software que permite obtener el diagrama de radiación de las antenas bajos estudio en este trabajo y que además permite determinar la validez de los diagramas de radiación obtenidos con su respectivo diagrama de radiación teórico. En el capítulo 5, se muestra como obtener el diagrama teórico de una antena, como opera el sistema diseñado para obtener el diagrama de radiación experimental de la antena, comparar ambos diagramas para validar los resultados obtenidos de forma experimental. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y POSIBLES SOLUCIONES

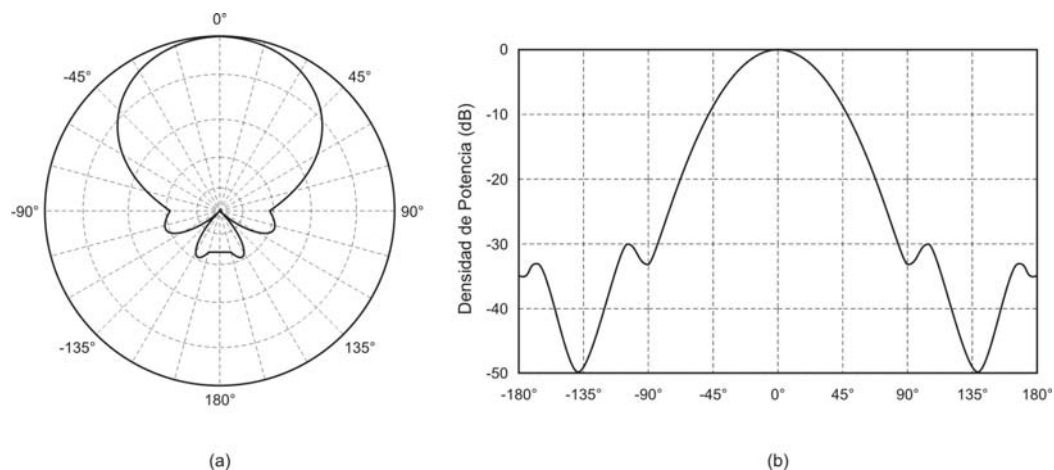
La Escuela de Ingeniería Eléctrica carece de un sistema que facilite el estudio práctico de los parámetros de las antenas, en particular su diagrama de radiación. Ante la imposibilidad de adquirir un sistema comercial con estas características, por lo elevado de su costo, se propone desarrollar este trabajo con los recursos disponibles, y es por ello que en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema automatizado para obtener el diagrama de radiación de las antenas.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las antenas tienen parámetros fundamentales que las caracterizan y establecen diferencias entre ellas. Uno de los parámetros de mayor importancia es el diagrama de radiación, ya que este indica las características de radiación de una antena (potencia, directividad y ganancia) y a partir del diagrama se pueden obtener otros parámetros. Por la importancia que tiene el diagrama de radiación hay que asegurarse que éste se obtenga de manera correcta y precisa.

Un diagrama de radiación es una representación gráfica en tres dimensiones de la intensidad de campo eléctrico que se obtiene de varias posiciones angulares en relación a una antena (Balanis, 1997, p.17). En la práctica los diagramas de radiación se miden y se representan en dos dimensiones y estos se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas, como se muestra en la Fig. 1.1. La mejor manera de medir los parámetros de las antenas es utilizando una cámara anecoica para evitar las reflexiones o por lo menos minimizarlas.

Las cámaras anecoicas son recintos cerrados y recubiertos, y sus paredes están formadas con paneles de materiales absorbentes, de manera que las reflexiones sean muy pequeñas, como se observa en la Fig. 1.2.



**Figura 1.1. Diagrama Radiación en coordenadas Polares (a) y Cartesianas(b).
(Cardama, 2000, p.21)**

www.bdigital.ula.ve



Figura 1.2. Cámara Anecoica de la ETSITB. (Cardama, 2000, p.383)

En caso de no disponer de una cámara anecoica, el diagrama de radiación se puede obtener mediante mediciones experimentales en ambientes como el Laboratorio de Microondas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, utilizando sistemas comercializados por algunas empresas

para tal fin, pero estos resultan bastantes costosos y no se han podido adquirir por el presupuesto ordinario de la Universidad.

Un ejemplo de un sistema comercial es el ofertado por empresa alemana Lucas-Nülle (Lucas-Nülle, 2008) que se muestra en la Fig. 1.3. El montaje de este sistema de antenas puede realizarse en un laboratorio normal sobre la mesa de trabajo, para la realización de las prácticas.



Figura 1.3. UniTrain-I de tecnología de alta frecuencia y de antenas.

El diagrama de radiación, también se puede obtener experimentalmente si se dispone de dos antenas, un generador de RF y un medidor de señal. Una antena se conecta al generador de señal para que actúe como antena transmisora y otra antena, que es la antena bajo prueba que se conecta a un medidor de señal. La antena bajo prueba se rota sobre su eje vertical los 360° con un determinado paso, y en cada paso se completa una tabla que tiene el valor del paso y el correspondiente nivel de la señal medido. Finalmente se usa un programa computacional para generar la gráfica en coordenadas polares o cartesianas del diagrama de radiación. Este procedimiento experimental depende de varios factores y existen varias fuentes de error que pueden cometerse en el procedimiento.

Dada la importancia que tiene el diagrama de radiación, se propone el diseño e implementación de un sistema automatizado para la obtención de los diagramas de radiación experimentales y que además permita comparar los mismos con los diagramas de radiación teóricos, a fin de validarlos y determinar las posibles fuentes de error cometidos en el procedimiento experimental.

En este trabajo se pretende crear un prototipo del sistema y que pueda ser perfeccionado con el tiempo, e inclusive que pueda comercializarse a otras universidades con fines didácticos.

1.2. SOLUCIÓN PROPUESTA

Como solución a la situación planteada se propone desarrollar un sistema automatizado para obtener el diagrama de radiación de una antena. El sistema estará formado por dos módulos, el *Sistema de Transmisión*, y el *Sistema de Recepción*, como se muestra en la Fig.1.4.

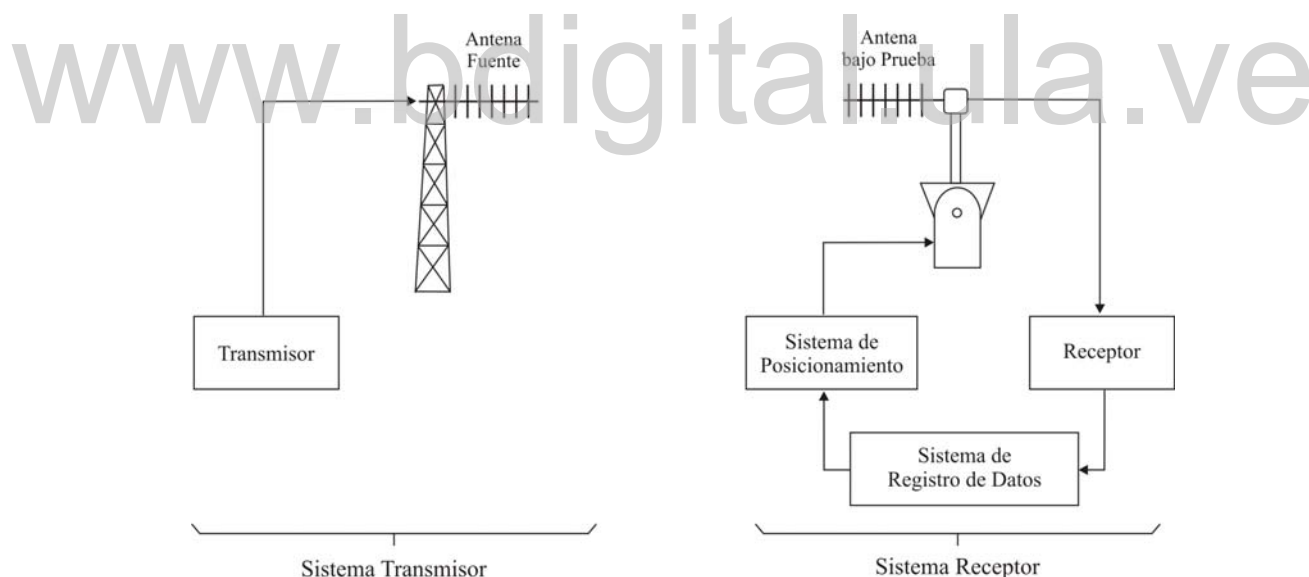


Figura 1.4. Sistema a desarrollar para la obtención del diagrama de radiación de una antena

El *sistema de transmisión* está formado por una antena fuente y un transmisor, la antena fuente será la antena Yagi diseñada en este trabajo, para el transmisor se utilizará un generador de RF. El *sistema de recepción* está formado por una antena bajo prueba, un receptor, un sistema de posicionamiento y un sistema para el registro de datos.

El receptor será diseñado e implementado con una serie de circuitos de RF para acondicionar la señal y tal señal será medida y convertida de analógica a digital a través microcontrolador. Para este trabajo se usará un microcontrolador PIC.

El sistema de posicionamiento será implementado con un motor de pasos comandado por un microcontrolador que gestiona la rotación de la antena los 360°. Se usará para la implementación el mismo microcontrolador usado en el receptor.

El sistema de registro de datos será implementado con un computador personal, y será el encargado de almacenar los datos de radiación y dibujar el diagrama. La comunicación entre el computador y el microcontrolador será según el estándar RS232. Se diseñará e implementará un software que permita obtener el diagrama de radiación de las antenas bajos estudio y que además permite determinar la validez de los diagramas de radiación obtenidos con su respectivo diagrama de radiación teórico.

El sistema propuesto obtiene el diagrama de radiación de una antena receptora, pero podrá operar de modo que pueda obtener el diagrama de la antena transmisora como se muestra en la Fig.1.5. Por principio de reciprocidad de las antenas (Barboza, 1991, p.55), ambos diagramas deben ser iguales.

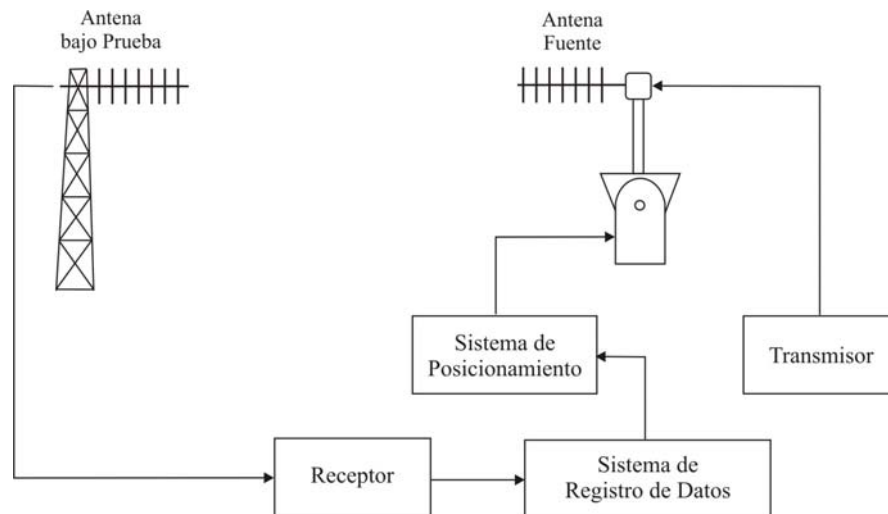


Figura 1.5. Sistema a desarrollar operando en modo transmisión

CAPÍTULO II

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS ANTENAS

En este capítulo se describirán los parámetros característicos de las antenas, como el campo radiado, el diagrama de radiación, la polarización, la impedancia, la eficiencia, la directividad, la ganancia y el área efectiva. Además de la ecuación de transmisión de Friss, dada su importancia en el análisis y diseño de sistemas de comunicación. Para así contar con todos los conceptos teóricos claros para desarrollar este trabajo.

2.1. ANTENAS

Una *antena* es un dispositivo usualmente metálico usado para la emisión o recepción de ondas electromagnéticas. El IEEE define una antena como “*un medio para radiar o recibir ondas de radio*” (IEEE, 1979, p.19).

Las antenas son componentes esenciales de los sistemas de radiocomunicaciones, por ser la estructura de transmisión entre el equipo transmisor, el espacio libre y el equipo receptor.

Todas las antenas funcionan de forma similar, al ser alimentados por una fuente de corriente alterna en los terminales de la antena, genera una distribución de tensión y corriente a lo largo de la antena, los cuales varían de acuerdo a las dimensiones y tipo de antena. La diferencia de potencial crea un *campo eléctrico* (E) perpendicular a un *campo magnético* (H) creado por la corriente que circula por la antena.

Los campos eléctricos y magnéticos varían dependiendo de la magnitud de la corriente alterna que alimentan a la antena y dan lugar a la formación y propagación de ondas electromagnéticas, conocido como radiación de la antena.

Adicionalmente para transmitir o recibir ondas electromagnéticas, una antena es usualmente optimizada para acentuar la radiación en una determinada dirección.

2.1.1. Campo Radiado

Usualmente el campo de radiación de una antena está dividido en tres regiones: el *campo cercano reactivo*, el *campo cercano de radiación (Fresnel)* y el *campo lejano (Fraunhofer)* como se muestra en la Fig. 2.1.

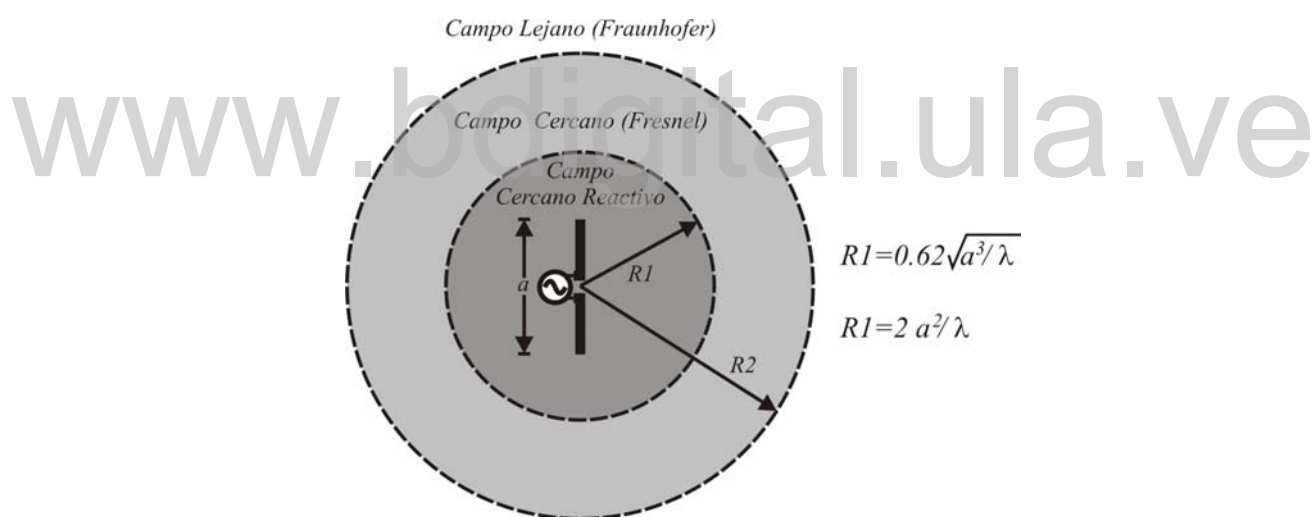


Figura 2.1. Regiones del Campo Radiado.

El *campo cercano reactivo* es la región alrededor de la antena en donde predominan los campos reactivos, en donde aun no se ha formado la radiación.

El *campo cercano de radiación (Fresnel)* es la región de campo de una antena entre el campo cercano reactivo y el campo lejano, donde predominan los campos de radiación y la distribución angular de campo depende de la distancia desde la antena.

El *campo lejano (Fraunhofer)* es la región de campo de una antena donde la distribución angular de campo es independiente a la distancia desde la antena, o sea el campo de la antena se aproxima a una onda de plano uniforme.

De acuerdo a Balanis (Balanis, 1982, p.23) si una antena tiene una dimensión a que corresponde con la dimensión lineal de la antena o el diámetro de la esfera que circunscribe y una longitud de onda λ la región del campo cercano reactivo estará a una distancia menor a R_1 ,

$$R_1 = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{a^3}{\lambda}} \quad (2.1)$$

de la antena y el campo lejano estará a una distancia mayor que R_2 ,

$$R_2 = \frac{2 \cdot a^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

Asumiendo que $a \gg \lambda$.

www.bdigital.ula.ve

2.1.2. Densidad de Potencia

La *densidad de potencia (W)* se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección radiada. Se puede calcular con los valores eficaces del *campo eléctrico (E)* y el *campo magnético (H)* y se define como,

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.3)$$

donde,

W = densidad de potencia radiada (W/m^2)

E = intensidad del campo eléctrico (V/m)

H = intensidad del campo magnético (A/m)

La *intensidad de radiación (U)* en una dirección dada, está definida como la potencia radiada desde la antena por unidad de ángulo sólido. La intensidad de radiación es un parámetro del campo lejano y esta puede obtenerse como:

$$U = R^2 \cdot W_T \quad (2.4)$$

donde,

U = Intensidad de la radiación ($W/\text{unidad de ángulo sólido}$)

R = Distancia desde la antena (m)

W_T = Densidad de la radiación (W/m^2)

2.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS ANTENAS

Las antenas, en general tienen parámetros que la caracterizan, los cuales son,

- Diagrama de Radiación,
- Polarización,
- Impedancia,
- Eficiencia,
- Directividad y Ganancia, y
- Área Efectiva.

2.2.1. Diagrama de Radiación

Un *diagrama de radiación* es una representación gráfica tridimensional de una propiedad de radiación de la antena. Las propiedades de radiación incluyen la intensidad de la radiación, la potencia radiada, la fase o la polarización. En la mayoría de los casos el diagrama de radiación se determina en la región del campo lejano.

El diagrama de radiación de una propiedad de radiación en concreto, es una distribución espacial en tres dimensiones de la energía radiada ($F(\theta, \phi)$) vista de una distancia constante a lo largo de la esfera que esta forma, como se muestra en la Fig 2.2.

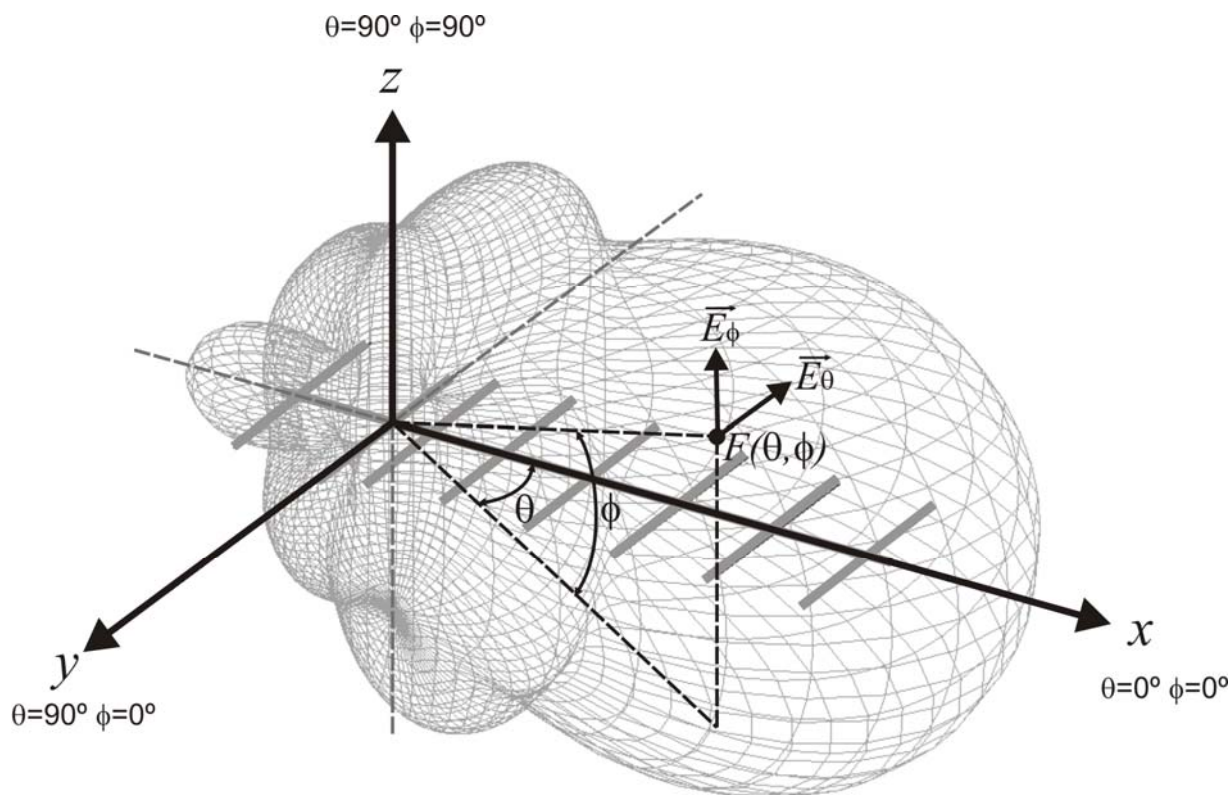


Figura 2.2. Diagrama de Radiación de una antena Yagi de 8 elementos.

En la práctica los diagramas de radiación en tres dimensiones son medidos en una serie de patrones en dos dimensiones. Esto se logra fijando un valor constante para ϕ y obteniendo un diagrama en función de θ , o viceversa. No obstante, para la mayoría de aplicaciones prácticas, unos pocos diagramas en dos dimensiones son necesarios para obtener la información.

El rendimiento de una antena es usualmente descrito en términos de los diagramas principales *plano-E* y *plano-H*. Para una antena linealmente polarizada, el diagrama del *plano-E* está definido como el plano que contiene el vector de campo eléctrico y la dirección de máxima radiación, y el diagrama del *plano-H* está definido como el plano que contiene el vector de campo magnético y la dirección de máxima radiación, como se muestra en la Fig. 2.3

Según la forma del diagrama de radiación, este podrá ser *isotrópico*, *direccional* u *omnidireccional*.

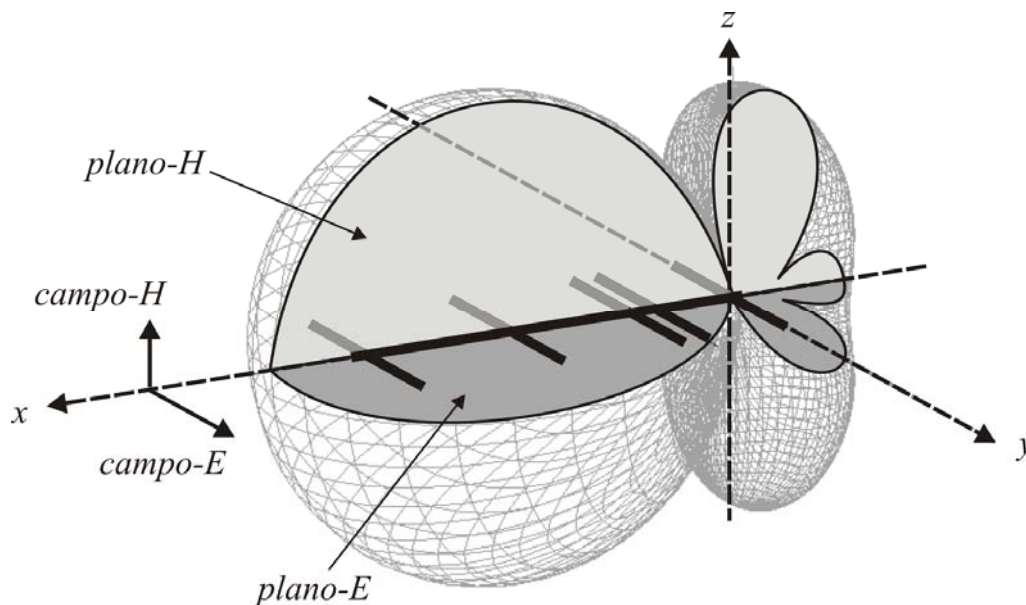


Figura 2.3. Diagrama de Radiación de una antena Yagi de 5 elementos donde se muestran los diagramas principales *Plano-E* y *Pano-H*.

Un diagrama *isotrópico* está definido como un diagrama que tiene igual radiación en todas las direcciones, este es ideal y no es físicamente realizable. Un diagrama *direccional* indica que la antena tiene la propiedad de radiar o recibir ondas electromagnéticas más efectivamente en unas direcciones que en otras, y se dividen en *unidireccionales*, que radian o reciben en una sola dirección y *multidireccionales*, que radian o reciben en múltiples direcciones. Finalmente, un diagrama *omnidireccional* tiene un diagrama no direccional en un plano y otro direccional en el plano ortogonal.

Varias partes del diagrama de radiación son referidas como *lóbulos*, los cuales se clasifican en *principales* y *menores*. Un lóbulo de radiación es una porción del diagrama de radiación en donde se produce un pico en la intensidad de radiación.

En la Fig. 2.4 se muestra un diagrama de radiación con varios *lóbulos de radiación*. El *lóbulo principal* está definido como el lóbulo de radiación que contiene la dirección de la máxima radiación. En algunos diagramas puede existir más de un lóbulo principal. Los *lóbulos menores* se definen como cualquier lóbulo excepto el lóbulo principal.

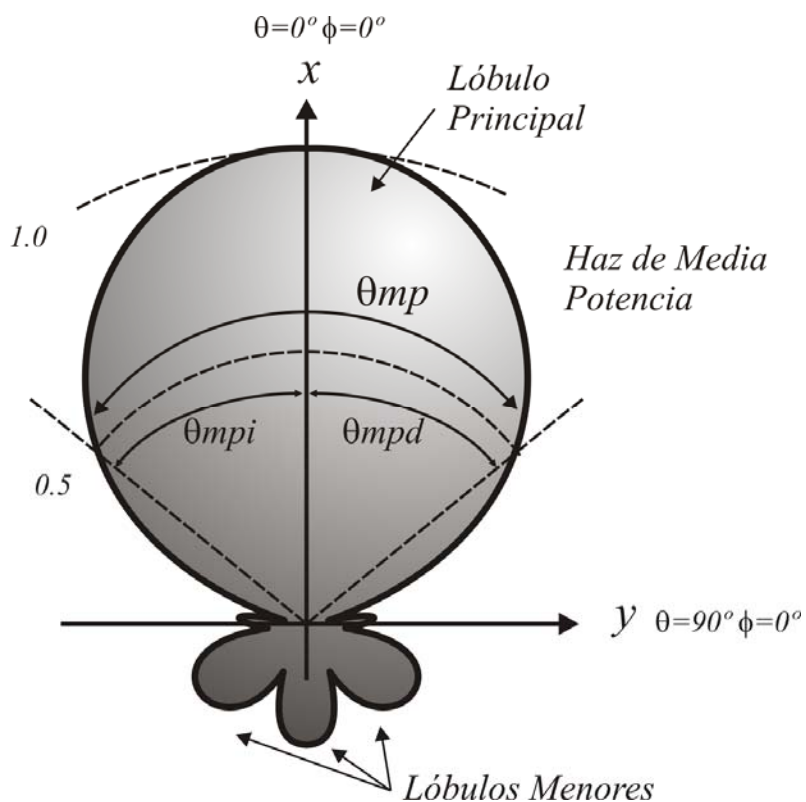


Figura 2.4. Lóbulos y Haz de Media Onda de un Diagrama de Radiación.

El ancho del haz de media potencia (θ_{mp}), es la separación angular entre los puntos del diagrama de radiación donde la potencia es igual a la mitad de su valor máximo, es decir,

$$\theta_{mp} = |\theta_{mpi} - \theta_{mpd}| \quad (2.5)$$

donde,

θ_{mp} = ancho del haz de media potencia (radianes)

θ_{mpi} y θ_{mpd} = los ángulos que corresponden a los puntos de media potencia, que están a la izquierda y derecha de la dirección de máxima radiación del lóbulo principal (radianes)

2.2.2. Polarización

La polarización de una antena es una propiedad de la radiación, la cual se refiere a la forma y a la orientación descrita por el vector de *campo eléctrico* (E) en el tiempo, con respecto a una

dirección específica, que por lo general es la dirección de máxima radiación por ser la más utilizada.

La polarización puede ser clasificada como: lineal, circular o elíptica, de acuerdo al comportamiento temporal de las componentes del campo eléctrico con respecto a un punto fijo del espacio. Si las componentes del vector eléctrico tienen la misma magnitud, fase y frecuencia esto hará que el vector resultante esté en el mismo plano y describirá en su extremo una línea, entonces se dice que esta linealmente polarizado. Dependiendo de la posición del campo eléctrico con respecto al plano horizontal, la polarización puede ser horizontal o vertical, como se muestra en la Fig. 2.5(a). Si las componentes del vector de campo eléctrico no tienen la misma fase y o frecuencia, el vector resultante variará y describirá en su extremo una circunferencia o una elipse, entonces se dice que está circular o elípticamente polarizada. La polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica y pueden ser obtenidas cuando la elipse llega a ser una línea recta o un círculo respectivamente. La figura del campo eléctrico es trazada en el sentido horario o anti horario. Dependiendo de la dirección de propagación, cuando la rotación es en sentido horario se tendrá una polarización a la derecha, y en sentido anti horario una polarización a la izquierda.

Como esta descrito en (Kraus, 1988, p.70) las componentes del campo eléctrico son,

$$E_x = E_1 \cdot \text{sen}(\omega t - \beta z) \quad (2.6)$$

$$E_y = E_2 \cdot \text{sen}(\omega t - \beta z + \delta) \quad (2.7)$$

donde:

$$\beta = \text{constante de propagación} = 2\pi/\lambda$$

$$\delta = \text{diferencia de fase ente } E_x \text{ y } E_y$$

Combinando E_x y E_y tenemos:

$$\vec{E} = E_1 \cdot \text{sen}(\omega t - \beta z) \cdot \vec{a}_x + E_2 \cdot \text{sen}(\omega t - \beta z + \delta) \cdot \vec{a}_y \quad (2.8)$$

Para un valor particular de z se puede determinar el lugar geométrico descrito por \vec{E} .

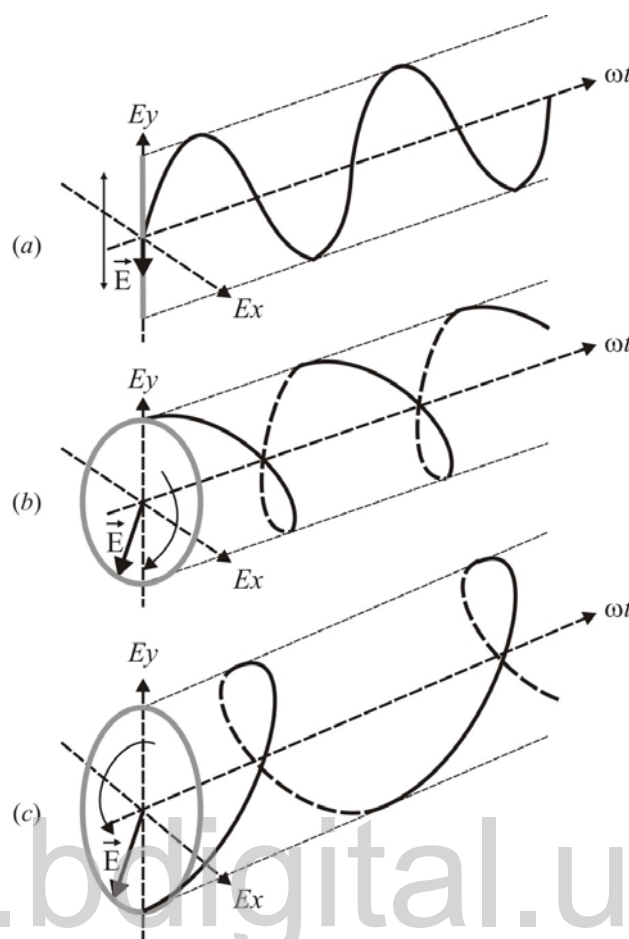


Figura 2.5. Tipos de Polarización. (a) Lineal y vertical, (b) Circular a la derecha y (c) Elíptica a la izquierda.

En la polarización lineal $E_1 = 0$ o $E_2 = 0$, en caso de polarización vertical u horizontal, o la diferencia de fase (δ) sea 0° o 180° . En la polarización circular $E_1 = E_2$ y $\delta = 90^\circ$. En el caso de la polarización elíptica $E_1 \neq E_2$. El cociente E_1 / E_2 se conoce como razón axial y nos dará una idea de la *elepticidad* de la polarización.

Una antena responde mejor a una onda incidente, cuando la polarización de la onda incidente es idéntica a la de la antena, por lo tanto cuando se diseña un sistema de comunicación la polarización de las antenas debe tener en cuenta la polarización de la antena en el terminal opuesto. En general la polarización de la onda incidente no es la misma a la de la antena. La potencia captada por la antena de la onda incidente no es máxima por la pérdida de polarización.

El campo eléctrico de la onda incidente puede ser escrito como,

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.9)$$

donde:

$\hat{\rho}_w$ = vector unidad de la onda

La polarización del campo eléctrico de la antena puede ser escrita como:

$$\vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.10)$$

donde:

$\hat{\rho}_a$ = vector unidad de la antena

La pérdida de polarización de la antena introduce el factor de *pérdida de polarización de la antena* (PLF) definido como:

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (\text{sin dimensiones}) \quad (2.11)$$

donde:

ψ_p = ángulo entre los dos vectores unidad

El alineamiento relativo de polarización de la onda incidente y la antena es mostrado en la Fig. 2.6. Si las antenas coinciden en la polarización en PLF será 1 y la antena extraerá la máxima potencia de la onda incidente, como se muestra en la Fig.2.6(a). Si la polarización de la onda incidente es perpendicular a la polarización de la antena entonces la antena no podrá extraer potencia de la onda incidente y el PLF será 0, como se muestra en la Fig.2.6(c).

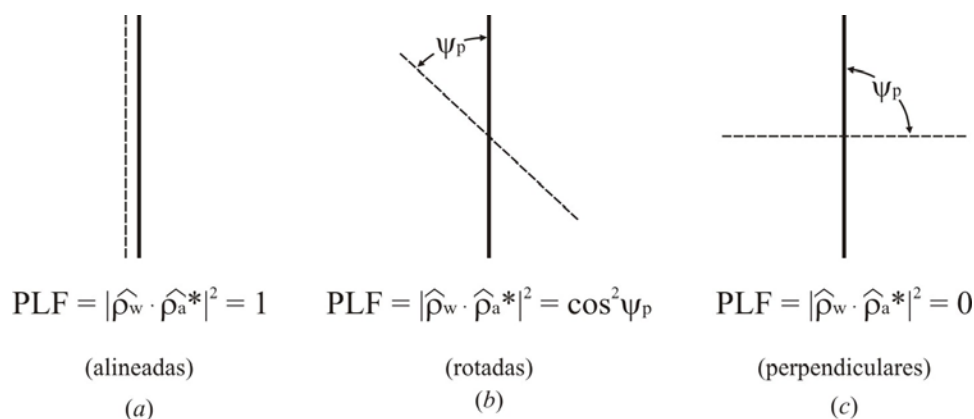


Figura 2.6. Factor de pérdida de polarización para antenas lineales

La pérdida de polarización siempre se debe tomar en cuenta en el cálculo del enlace de los sistemas de comunicación, porque en algunos casos este puede ser un factor muy crítico. El diseño debe tomar en cuenta adecuadamente todos los factores de pérdida para asegurar la correcta operación del sistema.

2.2.3. Impedancia de entrada y Eficiencia

La *impedancia de entrada* está definida como la impedancia presentada por una antena en sus terminales a través de los cuales se conecta a un equipo receptor o transmisor. La impedancia de entrada de una antena afecta la interacción entre esta y los equipos conectados a ella, por lo que es de fundamental importancia cuando se considera la eficacia con la que la antena transfiere energía desde una línea de transmisión al medio de propagación y viceversa.

En la Fig. 2.7(a), se muestra una antena en modo transmisión. Se define la impedancia de la antena entre los puntos *a* y *b*, como,

$$Z_A = R_A + j X_A \quad (2.12)$$

donde:

Z_A = impedancia de la antena (Ω)

R_A = resistencia de la antena (Ω)

X_A = reactancia de la antena (Ω)

En general la parte resistiva de la antena consiste de dos componentes, la resistencia de radiación y la resistencia de pérdida, como:

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.13)$$

donde,

R_r = resistencia de radiación de la antena (Ω)

R_L = resistencia de pérdida de la antena (Ω)

Si asumimos que la antena está conectada a un transmisor con impedancia interna:

$$Z_g = R_g + j X_g \quad (2.14)$$

donde,

Z_g = impedancia del transmisor (Ω)

R_g = resistencia del transmisor (Ω)

X_g = reactancia de transmisor (Ω)

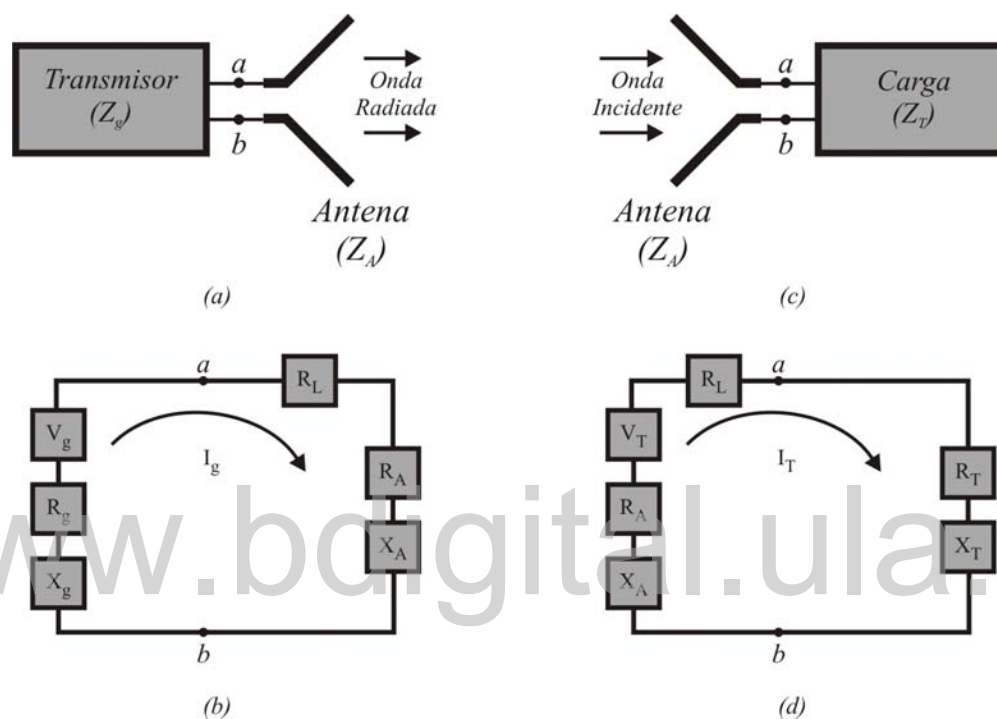


Figura 2.7. Antenas y Circuitos equivalentes en modo Transmisión (a) y (b) y en modo Recepción (c) y (d).

En la Fig.2.7(b) se representa el circuito equivalente de la antena y el transmisor de la figura 2.7(a). Para encontrar la potencia disipada por la radiación (R_r) y la potencia disipada como calor (R_L), primero encontramos la corriente del lazo (I_g), como,

$$I_g = \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \quad (2.15)$$

y en magnitud como,

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{[(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2]^{1/2}} \quad (2.16)$$

Donde V_g es el pico de voltaje del transmisor. La máxima potencia dada por la antena ocurre cuando tenemos el par conjugado,

$$R_r + R_L = R_g \quad (2.17)$$

$$X_A = -X_g \quad (2.18)$$

Sustituyendo (2.17) y (2.18) en (2.16), I_g queda como,

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{2(R_r + R_L)} \quad (2.19)$$

La potencia máxima disipada por la radiación será,

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r = \frac{|V_g|^2}{8} \cdot \frac{R_r}{(R_r + R_L)^2} \quad (2.20)$$

La potencia disipada como calor será,

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L = \frac{|V_g|^2}{8} \cdot \frac{R_L}{(R_r + R_L)^2} \quad (2.21)$$

La potencia dada por el transmisor durante el par conjugado es,

$$P_s = \frac{1}{2} V_g I_g = \frac{|V_g|^2}{4} \cdot \left[\frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (2.22)$$

La *eficiencia* (e) de una antena se mide por la relación de la potencia radiada por la antena (P_r) y la suma de la potencia radiada (P_r) y la potencia disipada (P_L) es decir,

$$e = \frac{P_r}{P_r + P_L} \quad (2.23)$$

Sustituyendo (2.20) y (2.21) en (2.23), la eficiencia resulta como,

$$e = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.24)$$

En la Fig.2.7 (c) y (d) se muestra una antena en modo recepción y su respectivo circuito equivalente. La onda incidente induce un voltaje V_T el cual es análogo al voltaje V_g en el modo transmisión. El análisis para la antena y la carga en el modo recepción se hacen de manera similar que en el modo transmisión. Entonces se puede decir que la corriente del lazo (I_T) en magnitud es,

$$|I_T| = \frac{|V_T|}{\left[(R_r + R_L + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.25)$$

Y la potencia absorbida por la carga será,

$$P_T = \frac{1}{2} |I_T|^2 R_T \quad (2.26)$$

2.2.4. Directividad y Ganancia

La *Directividad* (D) es el parámetro que describe la propiedad que tiene una antena para radiar o recibir más energía en una dirección que en otras. Según Balanis (Balanis, 1982, p.29) la directividad está definida por,

$$D = \frac{4\pi \cdot U_{\max}}{P} \quad (2.27)$$

donde,

D = directividad (*sin dimensión*)

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

P = potencia total radiada (*W*)

La intensidad de radiación máxima está dada por,

$$U_{\max} = B_0 \cdot F(\theta, \phi)|_{\max} \quad (2.28)$$

donde,

B_0 = es una constante

La potencia total radiada es encontrada usando,

$$P = B_o \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.29)$$

Sustituyendo (2.28) y (2.29) en (2.27) se obtiene,

$$D = 4\pi \cdot \frac{F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi} \quad (2.30)$$

La ecuación (2.30) puede ser escrita como,

$$D = \frac{4\pi}{\left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \right] / F(\theta, \phi)|_{\max}} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.31)$$

donde,

Ω_A es el ángulo sólido del haz definido por,

$$\Omega_A = \frac{1}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.32)$$

El *ángulo sólido del haz* (Ω_A) está definido como el ángulo sólido a través del cual toda la potencia de la antena podría seguir una intensidad de radiación constante (igual al máximo valor de U) para todos los ángulos dentro de Ω_A . Para antenas con un gran lóbulo principal y unos pocos lóbulos menores, el ángulo sólido del haz es aproximadamente igual al producto de los haz de media potencia en dos planos perpendiculares, como se muestra en la Fig.2.8. Por lo tanto la directividad puede escribirse de forma aproximada como,

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_{mp1} \cdot \theta_{mp2}} \quad (2.33)$$

El producto de la directividad por la eficiencia se denomina *ganancia*.

$$G = e \cdot D \quad (2.34)$$

La *ganancia* (G) es un parámetro más representativo que la directividad, porque no solo toma en cuenta la concentración de energía en una determinada dirección, sino tiene también en cuenta las pérdidas de potencia de la antena. Tanto la directividad como la ganancia suelen representarse en decibelios, ya que estas representan relaciones de potencia, como,

$$G(\text{dB}) = 10 \log G \quad (2.35)$$

$$D(\text{dB}) = 10 \log D \quad (2.36)$$

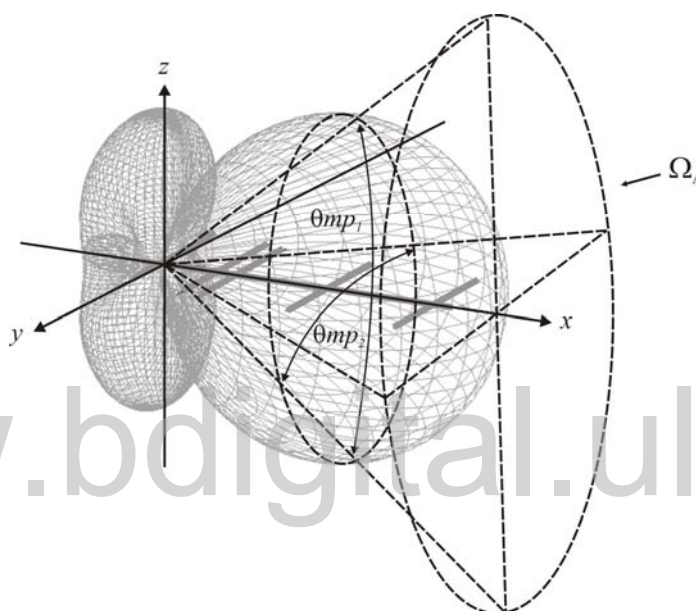


Figura 2.8. Ángulo Sólido del Haz.

La *eficiencia* (e) también se define como la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia neta, tanto en la antena transmisora y la antena receptora.

$$e = \frac{P_T}{P_t} = \frac{P_r}{P_R} \quad (2.37)$$

2.2.5. Área Efectiva

El *área efectiva* (A_e) se define tanto en recepción como en la transmisión, pero es en la recepción donde tiene un significado representativo, ya que en la recepción ésta representa el área equivalente a través de la cual la antena extrae la energía de las ondas incidentes. El área

efectiva, es la relación entre la *potencia absorbida por la carga* (P_T) y la *densidad de potencia incidente* (W_i) es decir,

$$A_e = \frac{P_T}{W_i} \quad (2.38)$$

donde,

A_e = área efectiva en metros (m^2)

P_T = potencia absorbida por la carga (W)

W_i = densidad de potencia incidente (W/m^2)

Sustituyendo (2.26) en (2.38), se obtiene

$$A_e = \frac{\frac{1}{2} |I_T|^2 R_T}{W_i} \quad (2.39)$$

Sustituyendo (2.25) en (2.39), se obtiene

$$A_e = \frac{|V_T|^2}{2W_i} \left[\frac{R_T}{(R_r + R_L + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2} \right] \quad (2.40)$$

Bajo condiciones de máxima transferencia de potencia,

$$R_T = R_r + R_L \quad (2.41)$$

$$X_A = -X_T \quad (2.42)$$

Sustituyendo (2.41) y (2.42) en (2.40), entonces el *área efectiva* se reduce a la *área efectiva máxima* (A_{em}) dada por,

$$A_{em} = \frac{|V_T|^2}{8W_i} \left[\frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (2.43)$$

De acuerdo a Balanis (Balanis, 1982, p. 63) en general el *área efectiva máxima* (A_{em}) para cualquier antena está relacionada con la directividad según la siguiente expresión

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D \quad (2.44)$$

Como existen pérdidas asociadas con la antena, la *efectividad* establece la relación como el *área efectiva* (A_e) y el *área efectiva máxima* (A_{em}), como,

$$A_e = e \cdot A_{em} \quad (2.45)$$

Sustituyendo (2.44) en (2.45), se obtiene,

$$A_e = e \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D \quad (2.46)$$

finalmente, sustituyendo (2.34) en (2.46), entre la *área efectiva* y *ganancia* queda como,

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G \quad (2.47)$$

2.3. Ecuación de Transmisión de Friis

En el análisis y diseño de sistemas de comunicación usualmente requiere el uso de la *ecuación de transmisión de Friis*. La ecuación de transmisión de Friis relaciona la potencia recibida con la potencia transmitida entre dos antenas que están separadas por una distancia R , tal que $R > 2a^2/\lambda$, donde a es la dimensión más grande de ambas antenas, como se muestra en la Fig. 2.9.

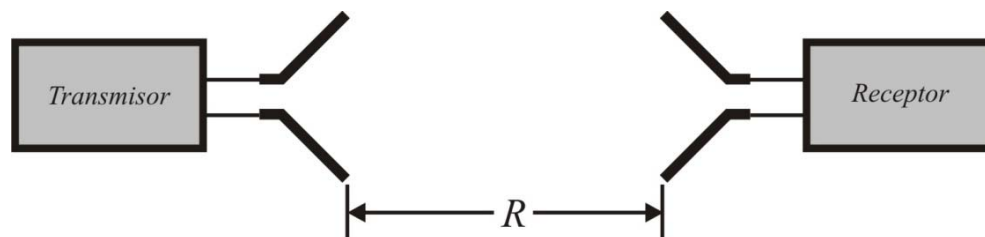


Figura 2.9. Orientación geométrica de las antenas transmisora y receptora.

Según la ecuación (2.38) el *área efectiva del receptor* (A_{er}) estará dada por la potencia absorbida por el receptor (P_r) y la densidad de potencia que incide (W_T), entonces podemos escribir a P_r como:

$$P_r = A_{er} \cdot W_T \quad (2.48)$$

y la *directividad* (D_t) de la antena transmisora es:

$$D_t = \frac{4\pi \cdot U}{P_T} \quad (2.49)$$

Sustituyendo (2.4) en (2.49), se obtiene:

$$D_t = \frac{4\pi \cdot R^2 \cdot W_T}{P_T} \Rightarrow W_T = \frac{P_T \cdot D_t}{4\pi \cdot R^2} \quad (2.50)$$

Según (2.47), el *área efectiva del receptor* (A_{er}) es:

$$A_{er} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_r \quad (2.51)$$

Sustituyendo (2.50) y (2.51) en (2.48), se obtiene:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \cdot \frac{P_T \cdot D_t}{4\pi \cdot R^2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot R} \right)^2 \cdot G_r \cdot D_t \cdot P_T \quad (2.52)$$

Según, (2.34) y (2.37), se tiene que:

$$G_t = e_t \cdot D_t \quad \text{y} \quad P_t = e_t \cdot P_T \quad (2.53)$$

Sustituyendo (2.53) en (2.52), finalmente se obtiene:

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot R} \right)^2 \cdot G_r \cdot G_t \cdot P_t \quad (2.54)$$

Expresión conocida como la *ecuación de transmisión de Friis*, en la cual se asume que las antenas tienen igual polarización y están orientadas para máxima ganancia. En el diseño de sistemas de comunicación es costumbre expresar la potencia en decibelios, de modo que la expresión (2.54) se puede escribir como:

$$P_r(\text{dB}) = P_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) - 20 \log \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right) \quad (2.55)$$

El término $20 \log(4\pi R/\lambda)$ es llamado el *factor de pérdida en espacio libre*, y este toma en cuenta las pérdidas dadas por la propagación esférica de la energía de la antena. De la expresión (2.55) se puede deducir que al disminuir la distancia (R) o la frecuencia (aumentar la longitud de onda λ) se disminuye las pérdidas de transmisión en espacio libre.

CAPÍTULO III

MEDIDAS DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Este capítulo contiene la descripción de los campos de prueba y los criterios para su dimensionamiento, para la medida de un diagrama de radiación. También se describen los sistemas de medida y la instrumentación necesaria para realizar las mediciones. Además se describe el diseño de las antenas a utilizar en este trabajo.

3.1. CAMPOS DE PRUEBA

La situación ideal para determinar las características de una antena es cuando la antena bajo prueba esta iluminada por una onda plana y con amplitud uniforme, con el objetivo de simular las condiciones que presenta el campo lejano de la antena. Para simular esta situación existen básicamente dos configuraciones del campo de prueba, las cuales son:

- Campo de medida en espacio libre.
- Campo de medida con reflexión.

3.1.1. Campos de medida en espacio libre

En esta configuración se procura eliminar las señales que no siguen la trayectoria directa entre una antena fuente y la antena bajo prueba. Esto se logra haciendo que las señales provenientes del lóbulo principal de la antena fuente no sean reflejadas por el terreno existente entre las antenas. Esto se logra por la combinación de factores tales como: (Esteves, 1980, p.644)

- Control de la directividad y de los lóbulos menores de la antena fuente y de la antena bajo prueba,
- Control del perfil del terreno,
- Cambio de dirección, absorción o dispersión de las señales que llegan a las regiones de la reflexión,
- Técnicas especiales para el procesamiento de la señal recibida.

Las configuraciones típicas asociadas con campos en espacios libres incluyen:

- Campo Elevado,
- Campo Inclinado,
- Campo Compacto, y
- Cámaras Anecoicas.

Campos Elevados, para evitar las reflexiones de las señales que no siguen la trayectoria directa entre las antenas, se sitúan las antenas en lugares elevados como por ejemplo en dos torres de dos edificios adyacentes, o en dos montañas separadas por un valle como se muestra en la Fig.3.1.

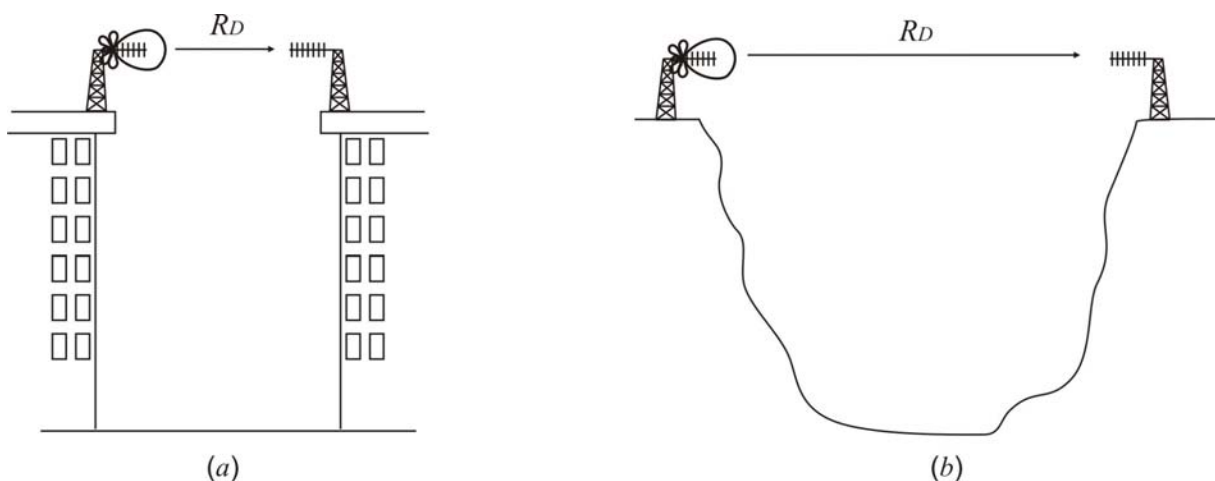


Figura 3.1. Campo Elevado.

Esta configuración se utiliza usualmente para probar antenas físicamente grandes. Las reflexiones son usualmente reducidas por:

- 1) Selección cuidadosa de la directividad y el nivel de los lóbulos menores de la antena transmisora,
- 2) No existir interferencia en la línea de vista entre las antenas, y
- 3) La rugosidad e irregularidad del terreno.

Campos inclinados, se utiliza usualmente cuando no existen espacios físicos suficientemente grandes para realizar las mediciones. En esta configuración se sitúa la antena bajo prueba en una torre no conductora, mientras la antena fuente se sitúa cerca del terreno, como se muestra en la Fig.3.2. La antena fuente es diseñada y posicionada para que el lóbulo principal del diagrama de radiación este orientado a la antena bajo prueba y que presente un nulo en la dirección del suelo donde se produce reflexión.

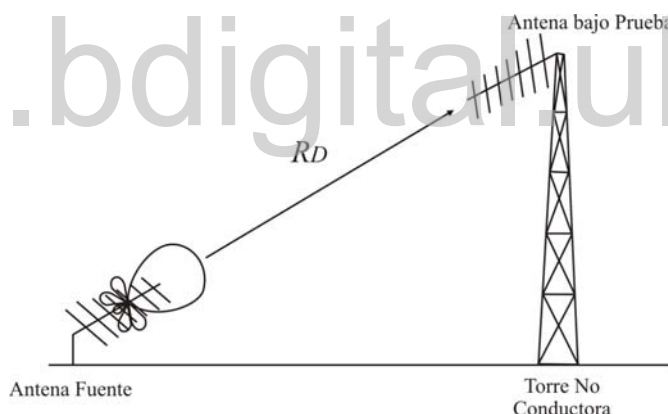


Figura 3.2. Campo Inclinado.

Campos compactos, para medir algunas antenas usualmente se requiere que la radiación ilumine la antena bajo prueba como una onda plana uniforme. Esto se logra ubicando la antena en las regiones de campo lejano, o sea a distancias muy grandes. Como esto no siempre es posible, se recurre a generar una onda plana uniforme mediante métodos alternativos. Esto puede lograrse reflejando la onda en un reflector parabólico, de forma tal se refleje la onda de forma plana uniforme como se muestra en la Fig.3.3. Esta técnica permite la simulación del patrón de campo lejano y requiere distancias más pequeñas que los métodos convencionales.

La antena fuente se sitúa en frente del receptor el cual deberá tener un tamaño lo suficientemente grande para garantizar una onda plana uniforme sobre la toda la antena bajo prueba. La implementación práctica no es sencilla, pues se han de resolver ciertos problemas como la difracción de los campos en los bordes del reflector o la radiación directa entre la antena fuente y la antena bajo prueba. Para evitarlos se suele aislar la antena fuente de la zona de medida.

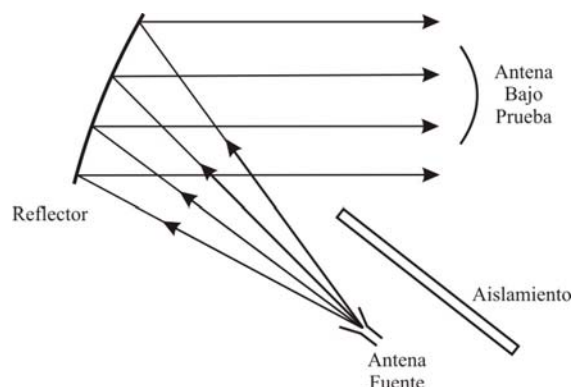


Figura 3.3. Campo Compacto.

Cámaras anecoicas, otra manera de medir las antenas es evitar las reflexiones o por lo menos que estas reflexiones tengan un valor muy bajo y esto es lo que se intenta lograr con campos de medida en espacios cerrados.

Las cámaras anecoicas son recintos cerrados que intentan evitar las reflexiones, y para tal fin se recubren sus paredes con paneles de materiales absorbentes que permitan que las reflexiones en ellas sean muy pequeñas como se muestra en la Fig.3.4. Existen dos tipos básicos de cámaras anecoicas, que son la rectangular y la cónica.

La cámara anecoica rectangular, es generalmente diseñada para simular las condiciones de espacio libre, se utiliza un material absorbente de alta calidad en las superficies en donde se refleja la energía directamente hacia la zona de prueba, con el objetivo de reducir el nivel de energía reflejada. A pesar de que las paredes, pisos y techos están cubiertos con tal material absorbente, pueden ocurrir pequeños reflejos en esas superficies, especialmente para el caso de

grandes ángulos de incidencia. Una precaución que se puede tomar es limitar los ángulos de incidencia para que la energía reflejada este por debajo del nivel consistente con la precisión requerida de las mediciones que se realizan en la cámara.

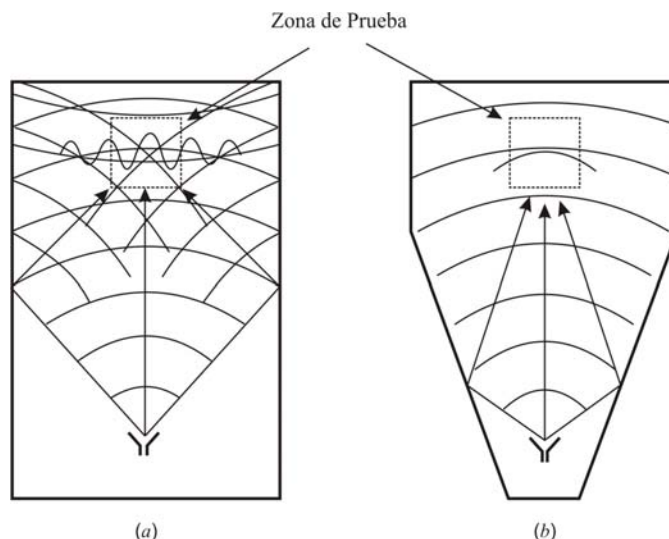


Figura 3.4. Cámaras Anecoicas Rectangular (a) y Cónica (b), (IEEE, 1979, p. 31).

Usualmente, para estos materiales absorbentes, este límite es tomado para un rango de ángulos de incidencia desde 0° a 70° . Para una cámara rectangular esto lleva a una restricción de la anchura o la altura de la cámara, de tal manera que (IEEE, 1979, p.30):

$$w \geq \frac{R}{2,75} \quad (3.1)$$

donde,

R = separación entre las antenas (transmisora y bajo prueba), y

w = ancho o alto de la cámara.

El tamaño de la antena fuente debe ser elegido de tal manera que ninguna parte del lóbulo principal de la antena incida sobre las paredes, techos y pisos, en la Fig.3.4(a) se observa una cámara anecoica rectangular.

La cámara anecoica cónica, esta diseñada en forma de una bocina piramidal que va desde una pequeña fuente cónica a una gran región rectangular de prueba, como se muestra en la

Fig.3.4(b). Este tipo de cámara anecoica tiene dos modos de operación. Cuando se trabaja en el extremo inferior de la banda de frecuencias para la que la cámara esta diseñada, es posible colocar la antena fuente lo suficientemente cerca del vértice de la sección cónica, de manera que las reflexiones de las paredes laterales que contribuyen directamente al campo de la antena bajo prueba ocurra muy cerca de la antena fuente. Utilizando técnicas de trazado de rayos se puede demostrar que para una antena fuente debidamente ubicada hay poco cambio en la diferencia de fase entre los rayos del camino directo y del camino reflejado en cualquier punto de la región de prueba en la cámara cónica. La mejor posición es determinada experimentalmente, y una forma útil para calcular la posición deseada es haciendo una analogía de la cámara anecoica cónica con los campos de medida con reflexión. Usando la analogía podemos decir que la distancia perpendicular h_t desde la antena fuente a las paredes de la cámara debe satisfacer la siguiente inecuación (IEEE, 1979, p.31):

$$h_t < \frac{\lambda \cdot R}{4h_r} \quad (3.2)$$

donde,

λ = longitud de onda

R = separación entre las antenas (fuente y bajo prueba),

h_r = distancia perpendicular desde la antena bajo prueba y las paredes de la cámara.

Si la antena fuente se mueve hacia delante en la cámara, el patrón de interferencia se hace mas pronunciado, con nulos profundos que aparecen en la zona de prueba.

Cuando la frecuencia de operación se incrementa, se hace cada vez mas difícil colocar la antena fuente lo suficientemente cerca del vértice de la cámara. Cuando esto ocurre, se usa una ganancia más grande en la antena fuente para suprimir las reflexiones y se aleja la antena del vértice y la cámara se usa en el modo de espacio libre similar a la cámara rectangular.

3.1.2. Campos de medidas con reflexión

Esta configuración se muestra en la Fig.3.5. y se utiliza la energía reflejada por la superficie de campo de prueba con el objeto de originar una interferencia constructiva entre las señales que

siguen la trayectoria directa entre las antenas (R_D) y las señales reflejadas por el terreno (R_R). La geometría de esta configuración es controlada de forma de obtener una pequeña atenuación esencialmente simétrica de la iluminación sobre la antena bajo prueba.

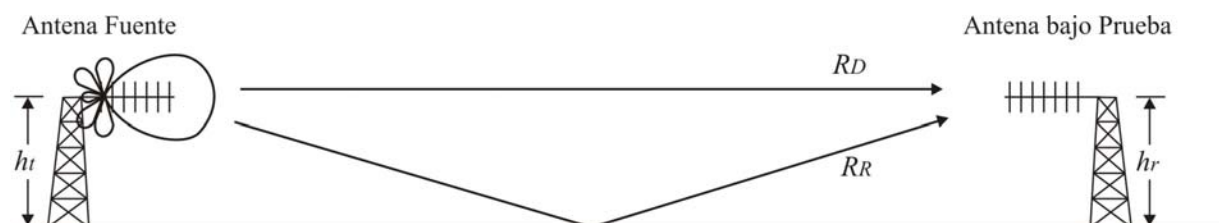


Figura 3.5. Campo con Reflexión (Albornoz, 1995, p.26).

3.1.3. Criterios para el Dimensionamiento de los Campos de Prueba

Independientemente del tipo de campo de prueba que sea utilizado, los siguientes criterios deben ser analizados,

- Acoplamiento entre las antenas fuente y receptoras,
- Variación de fase del frente de onda incidente sobre la antena de prueba,
- Variación de amplitud del frente de onda incidente sobre la antena de prueba,
- Variaciones periódicas en el espacio del frente de onda incidente sobre la antena bajo prueba (generadas por reflexión), e
- Interferencias de fuentes de falsas radiaciones.

De los criterios anteriormente mencionados los cuatro primeros pueden ser controlados por la selección adecuada de la separación y posición de las antenas, así como también de las características de las antenas. El último criterio depende básicamente de la región en donde se localizará el campo de prueba.

A continuación se examinarán las pautas que rigen el adecuado dimensionamiento de los campos de prueba propuestos por (Esteves, 1980, p.645-658), tanto para el campo elevado como para el campo con reflexión. Inicialmente se analizarán los criterios para dimensionar el

campo elevado, y algunos de estos criterios serán aplicados también para dimensionar un campo con reflexión.

Acoplamiento entre antenas. Los efectos del acoplamiento entre la antena fuente y la antena bajo prueba se consideran despreciables cuando se satisface la siguiente condición,

$$R \geq 10 \cdot \lambda \quad (3.3)$$

donde,

R = la distancia entre las antenas,

λ = representa la longitud de onda a la cual se realiza la medición.

Este criterio está descrito en las ecuaciones que describen los campos radiados por un dipolo corto, la cual establece que la distancia de 10 longitudes de onda, el valor del campo inductivo de dipolo estará 36 dB por debajo del nivel del campo de radiación.

Variación de la fase del frente de onda incidente sobre la antena de prueba. Para una antena bajo prueba en la región de campo lejano de una antena fuente, iluminada por el lóbulo principal, la variación de fase es aquella correspondiente a un frente de onda esférico con centro en la antena fuente, entonces la *diferencia de fase* ($\Delta\phi$) estará dada por,

$$\Delta\phi = \frac{\pi \cdot a^2}{4 \cdot \lambda \cdot R} \quad (3.4)$$

donde,

a = máxima dimensión de la antena bajo prueba.

Comúnmente el criterio para despreciar la variación de fase ($\Delta\phi$) es que esta sea menor a $\pi/8$. Entonces de (3.4) resulta que la distancia R debe ser,

$$R \geq 2 \cdot \frac{a^2}{\lambda} \quad (3.5)$$

Variación de la amplitud del frente de onda incidente sobre la antena bajo prueba. Para simular la situación de campo lejano, la iluminación de la onda incidente debe ser lo

suficientemente constante en amplitud. Considérese una antena bajo prueba con una región activa que tiene máxima dimensión L , la razón ρ_p entre las densidades de potencia entre los extremos de la región activa esta dado por,

$$\rho_p(dB) = 20 \log \frac{R + L/2}{R - L/2} \quad (3.6)$$

Para la mayoría de los tipos de antenas con una región activa grande, tales errores son usualmente considerados como despreciables cuando ρ_p es menor que 1 dB. Esta condición corresponde aproximadamente a,

$$R \geq 10 \cdot L \quad (3.7)$$

Variaciones periódicas en el espacio del frente de onda incidente sobre la antena bajo prueba. Las variaciones periódicas del campo incidente sobre la antena bajo prueba son causadas básicamente por reflexiones en la superficie del campo de prueba. Para la configuración de campo elevado, estas reflexiones se pueden minimizar procurando eliminar los obstáculos en la línea de vista directa entre las antenas. Además se minimizan cuando se cumple que,

$$h_r \geq 4,5 \cdot a \quad (3.8)$$

donde,

h_r = altura de la antena bajo prueba.

Este criterio no es siempre posible, es decir, algunas antenas en la banda UHF poseen lóbulos principales bastantes anchos, lo que implica una altura bastante amplia para la estructura que soporta la antena bajo prueba, para estos casos se utiliza el *campo con reflexión*.

En un campo con reflexión, las señales que llegan a la antena bajo prueba siguen dos trayectorias una directa (R_D) y una producida por reflexión (R_R), como se muestra en la Fig.3.6. En este tipo de configuración se usan antenas fuente de baja directividad, de manera de iluminar la superficie del campo con una señal aproximadamente igual a la del trayecto

directo, resultando de esto un diagrama de interferencia sobre la región donde se sitúa la antena bajo prueba.

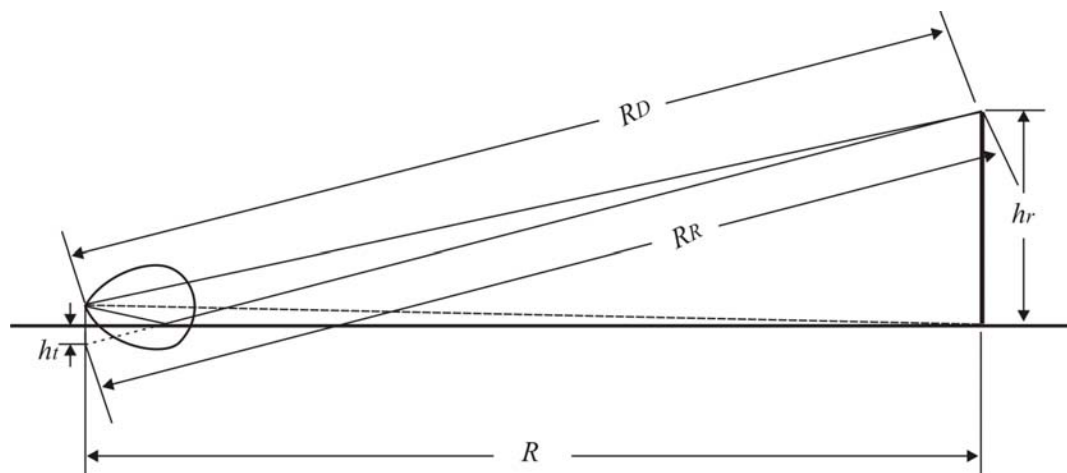


Figura 3.6. Geometría del campo con Reflexión (Esteves, 1980, p.655).

Para dimensionar un campo con reflexión son válidos los criterios de acoplamiento y variación de fase descritos anteriormente, entonces analizaremos a continuación el problema de variación de amplitud para controlar las superficies de reflexión.

Variación de amplitud del campo incidente, considérese la geometría mostrada en la Fig.3.6, las señales de los trayectos directos y reflejados se combinan en fase en el centro de la antena de prueba. Los dos trayectos serán relacionados por la ecuación,

$$R_R = R_D + (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.9)$$

donde,

n = número entero positivo, para el primer lóbulo de interferencia $n = 1$.

De la Fig.3.6, se tiene,

$$R_D = [R^2 + (h_r - h_i)^2]^{1/2} \quad (3.10)$$

$$R_R = [R^2 + (h_r + h_i)^2]^{1/2} \quad (3.11)$$

Sustituyendo (3.10) y (3.11) en (3.9) y asumiendo que $R \gg h_t$ y $R \gg h_r$, se obtiene que,

$$h_t \approx \frac{\lambda \cdot R}{4 \cdot h_r} \quad (3.12)$$

donde,

h_t = altura de la antena fuente,

h_r = altura de la antena bajo prueba.

Según (Esteves, 1980, p. 665) la variación del campo incidente sobre la antena bajo prueba estará dada por,

$$E(h) \propto \frac{\text{sen} \pi h}{2 \cdot h_r} \quad (3.13)$$

Estableciendo la variación de amplitud sea menor o igual que 0.25 dB, para $h = h_r \pm a / 2$, resulta,

$$h_r \geq 3.3D \quad (3.14)$$

Estos criterios presentados por el campo elevado y el campo con reflexión tienen el fin de producir una onda plana uniforme para un determinado campo de medida y establecen los requisitos que debe cumplir una instalación al realizar las mediciones del diagrama de radiación de una antena, además teniendo en cuenta las bandas de frecuencia a las cuales se va a trabajar.

3.2. SISTEMA DE MEDIDAS

El diagrama de radiación de una antena transmisora representa la distribución espacial de la energía electromagnética radiada por ésta, y el diagrama de radiación de una antena receptora contiene información acerca de cómo varía el voltaje inducido en los terminales de la antena en relación a una onda que incide sobre la ésta. Si la antena receptora no contiene elementos activos, el *principio de reciprocidad* (Barboza, 1991, p.55) permite asegurar que los patrones de radiación correspondientes a transmisión y recepción son idénticos.

En general, la instrumentación requerida para la medida de antenas consta de 4 subsistemas:

1. una antena fuente y un transmisor,
2. una antena bajo prueba y un receptor,
3. un sistema de posicionamiento, y
4. un sistema de registro de datos.

Un diagrama de bloques típico para un sistema de medida de antena es mostrado en la Fig.3.7 el cual se describe los *Procedimientos Estándares de Prueba para Antenas del IEEE* (IEEE, 1979, p.33).

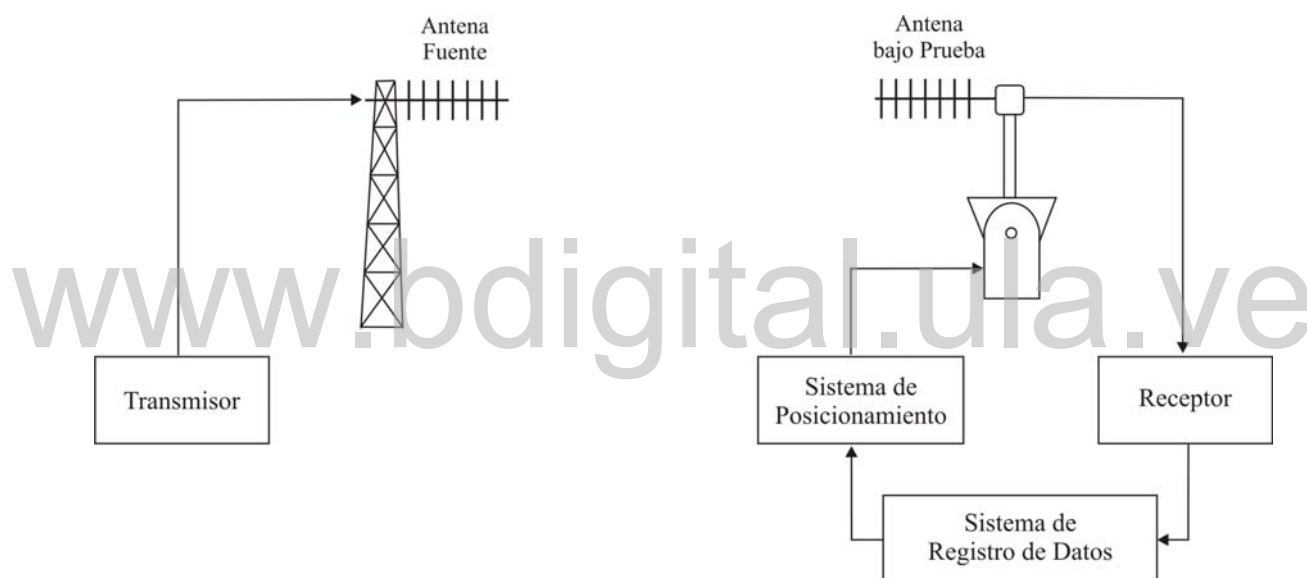


Figura 3.7. Diagrama de bloques típico de un sistema de medida de antenas.

3.2.1. Antena Fuente

La *antena fuente* normalmente es diseñada para operar en la frecuencia en la cual se va a realizar la medida. Para frecuencias superiores de 1GHz antenas de arreglos logarítmicos periódicos son usualmente utilizados, para frecuencias por arriba de 400 MHz, antenas parabólicas de banda ancha son las más utilizadas. En algunos casos antenas de bocinas tienen que ser utilizadas. Un controlador de la polarización es usualmente requerido para direccionar la antena. La *antena fuente* debe estar polarizada en la dirección de la antena bajo prueba.

3.2.2. El Transmisor

Los *transmisores* pueden ser muy diversos, y van desde un simple oscilador hasta los sintetizadores de frecuencia que permiten cambiar rápidamente la frecuencia, con gran precisión, estabilidad y pureza espectral, pasando por tubos de onda progresiva para conseguir grandes potencias de salida en los campos lejanos de medida. El empleo de unos o de otros dependerá de los requisitos de la medida.

Sea cual sea el tipo de señal fuente seleccionada para el transmisor, se deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Control de la Frecuencia, el valor de frecuencia deberá poder ser establecido al valor de frecuencia deseada de operación del sistema. Dependiendo del tipo de señal fuente usada medios mecánicos, electromecánicos o eléctricos pueden ser empleados.
- Estabilidad de la Frecuencia, dado que las antenas y sus circuitos de radiofrecuencia asociados son altamente sensibles a la frecuencia es necesario que la frecuencia de la señal fuente permanezca constante en todo el periodo de medición, el cual puede ser 30 minutos.
- Pureza Espectral, algunos tipos de osciladores son ricos en armónicos, los cuales, si son transmitidos, podrían contaminar la señal. Para eliminar estas señales no deseadas se pueden utilizar filtros o emplear receptores que discriminen entre la señal deseada y la no deseada.
- Nivel de Potencia, el nivel de potencia requerido para la señal fuente dependerá de la ganancia tanto de la antena fuente como de la antena bajo prueba, la sensibilidad del receptor y la pérdida de transmisión entre las dos antenas y el rango dinámico para la medida. Es importante que la salida de potencia de la señal fuente sea constante.
- Modulación, para algunos sistemas la modulación de amplitud es requerida por lo tanto la señal fuente debe tener esta capacidad.

3.2.3. El Receptor

El *receptor* es usado para la lectura del nivel de señal incidente en la antena bajo prueba con el que se obtendrá el diagrama de radiación de la antena, y puede ser implementado por simplemente detectores a base de un diodo rectificador asociados con un amplificador. El nivel de señal leído en el receptor se envía al sistema de registro de datos.

3.2.4. Sistema de Posicionamiento

El *sistema de posicionamiento* se utiliza para desplazar la antena fuente alrededor de la antena bajo prueba e ir registrando las variaciones de la señal recibida y obtener el diagrama de radiación de la antena bajo prueba. A nivel práctico no es la antena fuente la que se mueve, lo habitual es que sea la antena bajo prueba, la que se haga rotar en dos ejes ortogonales y la antena fuente esté fija. A no ser que se realice alguna medida especial en campo cercano, el movimiento aparente entre la antena bajo prueba y la antena fuente es esférico, es decir, como si la antena fuente se desplazase sobre una esfera centrada en la antena bajo prueba, siguiendo los movimientos de los ángulos esféricos θ y ϕ , como se muestra en la Fig. 3.8.

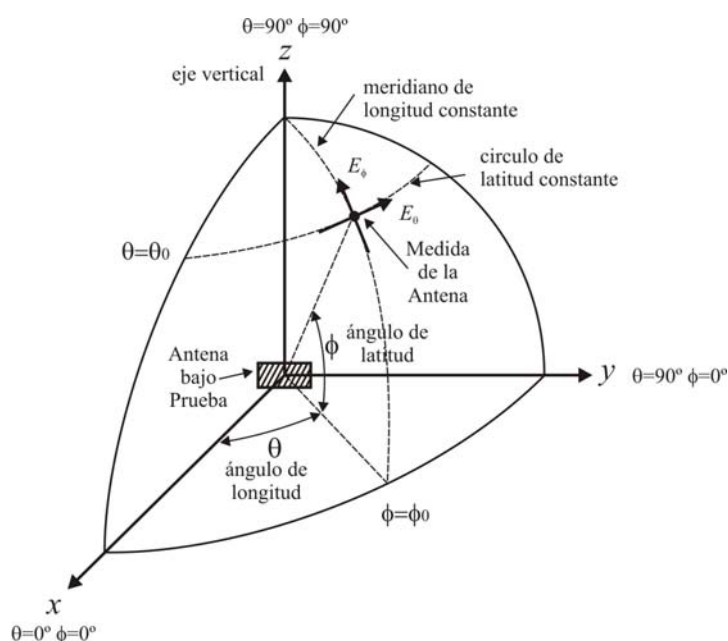


Figura 3.8. Antena y coordenadas de medida del diagrama (Kraus, 1988, p.806).

Lo habitual es querer hacer medidas completas del diagrama, con lo cual son necesarios dos posicionadores que roten la antena sobre los ejes ortogonales como se muestra en la Fig.3.9. Si sólo se requiere la medida de un corte del diagrama, será suficiente con un posicionador que rote la antena bajo prueba respecto a un eje. Los posicionadores deben tener un sistema que controle la rotación de la antena y este debe estar dirigido por el sistema de registro de datos.

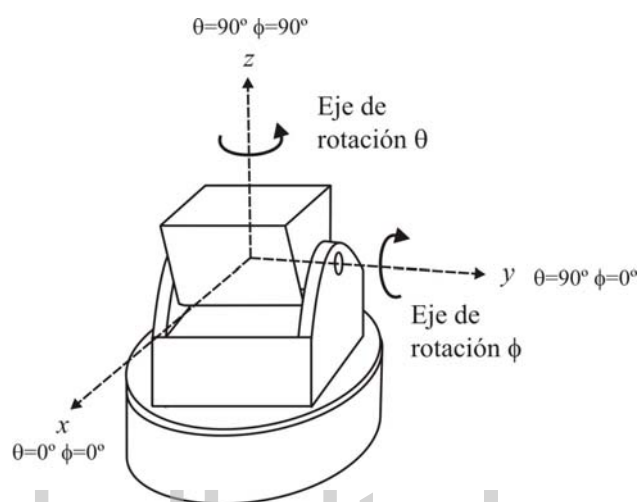


Figura 3.9. Posicionador para medidas en coordenadas esféricas (Cardama, 2000, p.387).

3.2.5. Sistema de Registro de Datos

El *sistema de registro de datos* puede ser utilizado para registrar de forma inmediata los datos medidos sobre algún soporte gráfico, normalmente con un trazador sobre papel.

Los patrones de la antena pueden ser registrados en forma polar o rectangular como se muestra en la Fig.3.10. La forma polar es usualmente preferida para imprimir diagramas de antenas que no son altamente direccionales. La forma polar es usada para visualizar la distribución de potencia en el espacio. En la forma rectangular la amplitud de la señal esta en el eje Y, y el ángulo posición en el eje X. La forma rectangular permite visualizar las regiones de baja ganancia que no es posible en la forma polar.

Lo más habitual es que todo el proceso de la medida sea controlado por un computador, desde el movimiento de los posicionadores hasta el control de los medidores. Los datos se suelen

almacenar en tal computador y se pueden representar o realizar sobre ellos cualquier tipo de procesamiento.

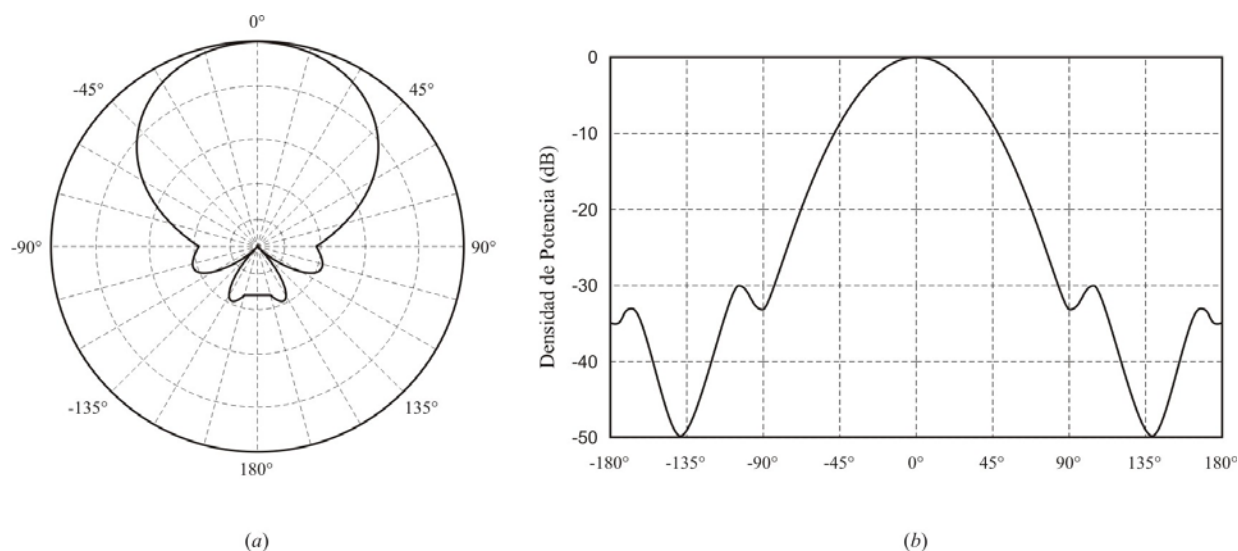


Figura 3.10. Diagrama de radiación en forma polar (a) y en forma rectangular (b).

3.3. DISEÑO DE LAS ANTENAS BAJO PRUEBA

Para este trabajo se diseñaran dos antenas, una *antena Yagi* y un *dipolo de media onda*, que serán utilizadas como antenas bajo prueba.

3.3.1. Diseño de la Antena Yagi

La antena Yagi es una de las antenas más utilizadas para la recepción de señales de televisión (VHF y UHF) y las frecuencias de FM, por ser esta antena de bajo costo, alta ganancia y fácil construcción. La antena está formada por un dipolo de media onda por su centro (elemento activo conectado al transmisor o al receptor) y varios dipolos cortocircuitados (elementos parásitos) sobre un soporte común y paralelos entre si, como se muestra en la Fig. 3.11.

Existen distintos métodos para calcular una antena Yagi, para este trabajo se utilizará el método descrito en (Barboza, 1991, p.196-199). La antena Yagi se construyó con tubo de

aluminio de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, siendo este un factor no muy crítico porque las características de estas antenas se mantienen para otros diámetros.

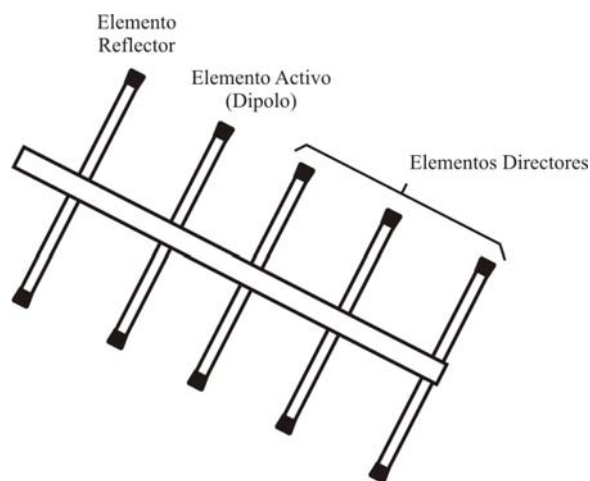


Figura 3.11. Antena Yagi.

Para diseñar la antena seguimos los siguientes pasos,

- Se establece la ganancia y haciendo uso de la curva de la grafica de la Fig.3.12 se determina el número de elementos. Para este trabajo se establece una ganancia de 9.8 y 5 elementos.

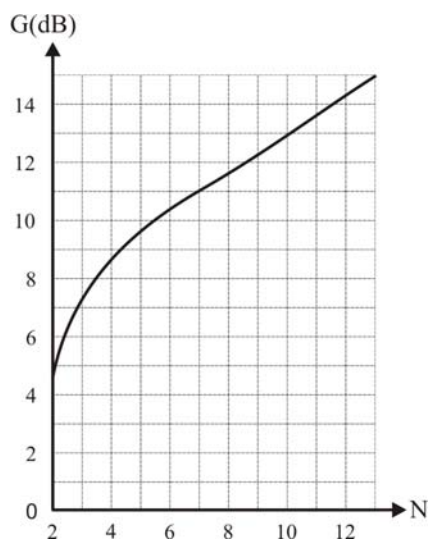


Figura 3.12. Ganancia de la antena Yagi en función del número de elementos (Barboza, 1991, p.196).

- Se seleccionó el canal 14 de UHF (470 – 476MHz) para operar la antena, a una frecuencia central de 473 MHz.
- Se calcula el valor de λ ,

$$\lambda = c \cdot T = \frac{v}{f} = \frac{300.000 \times 10^3 \text{ m/s}}{473 \times 10^6 \text{ Hz}} = 0,6342 \text{ m} = 63,42 \text{ cm} \quad (3.15)$$

- En base al diámetro del conductor con que se construye la antena se determina el porcentaje de reducción del dipolo de media onda según la Fig.3.13,

$$\frac{\lambda}{2 \cdot a} = \frac{\lambda}{2 \cdot \frac{d}{2}} = \frac{\lambda}{d} = \frac{63,42 \text{ cm}}{1,27 \text{ cm}} = 49,944 \cong 50 \quad (3.16)$$

de la Fig.3.12 y con $\lambda/2a = 50$ se obtiene que el Porcentaje de Reducción (PR) es 0,855

- La longitud del dipolo es,

$$L_D = PR \cdot \frac{\lambda}{2} = 0,854 \cdot \frac{63,42 \text{ cm}}{2} = 27,11 \text{ cm} \quad (3.17)$$

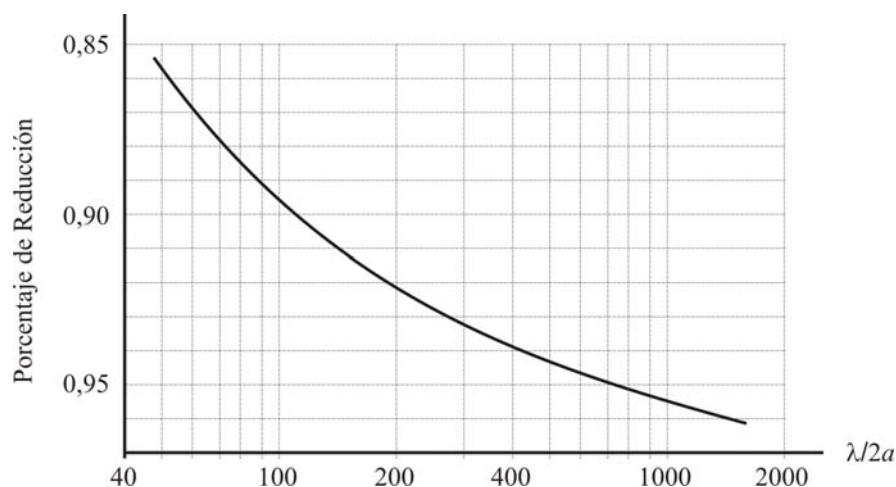


Figura 3.13. Porcentaje de reducción del dipolo en función del diámetro (Barboza, 1991, p.198).

- La longitud del elemento reflector, el cual es 5% mayor a la longitud del dipolo (L_D)

$$L_R = 1,05 \cdot L_D = 1,05 \cdot 27,11cm = 28,46cm \quad (3.18)$$

- La longitud de los directores se calcula en función del diámetro de los elementos y la posición de los directores a partir de la Fig.3.14. De la expresión 3.18 determinamos que el diámetro ($2a$) es igual a $\lambda/50$. A partir de la curva que corresponde a valor del diámetro ($1/50$) obtenemos que,

- La longitud del primer director es,

$$L_{D1} = 0,43 \cdot \lambda = 0,43 \cdot 63,42cm = 27,27cm \quad (3.19)$$

- La longitud del segundo director es,

$$L_{D2} = 0,423 \cdot \lambda = 0,423 \cdot 63,42cm = 26,82cm \quad (3.20)$$

- La longitud del tercer director es,

$$L_{D3} = 0,426 \cdot \lambda = 0,426 \cdot 63,42cm = 27,01cm \quad (3.21)$$

- La separación entre los elementos se calcula por la Tabla.3.1, la cual fue tomada de la Tabla.8.3 de (Barboza, 1991, p.199) solo tomando la fila que corresponde a 5 elementos, que son los usados en este diseño. Además en la tabla se muestra el valor medio, y el cálculo de cada una de las longitudes de separación entre los elementos.

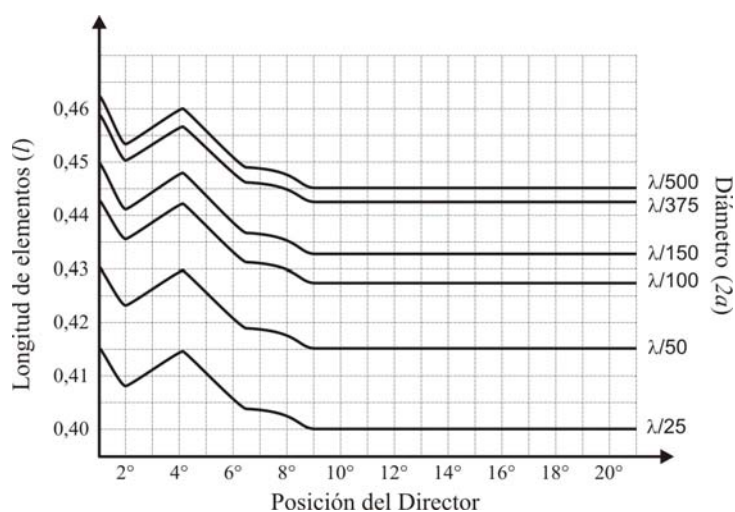


Figura 3.14. Longitud de los directores en función de su diámetro y posición (Barboza, 1991, p.198).

Tabla 3.1. Longitud de separación entre los elementos.

No. de Elementos	R-E	E-D1	D1-D2	D2-D3
5	$(0,15-0,22)\lambda$	$(0,14-0,17)\lambda$	$(0,15-0,20)\lambda$	$(0,17-0,20)\lambda$
Valor Medio	$0,185\lambda$	$0,155\lambda$	$0,175\lambda$	$0,185\lambda$
Separaciones	11,72cm	9,82cm	11,09cm	11,72cm

Finalmente se construyó la antena como se muestra en la Fig.3.15. Se usó para la construcción de la antena 5 tubos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, con las longitudes calculadas, 1 tubo cuadrado de 1 pulgada que sirve como base, 10 regatones y 5 tornillos de estría. Además se le colocó a la antena una base de apoyo con la cual se sujetará al tubo vertical donde estará fijada.

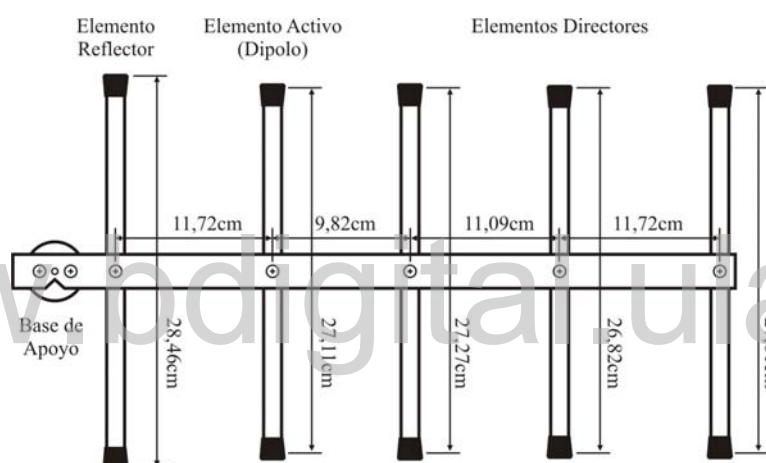


Figura 3.15. Plano de la Antena Yagi diseñada, con las longitudes calculadas.

Para ajustar la impedancia de la antena, se colocó bajo el elemento activo un condensador como se muestra en la Fig.3.16.

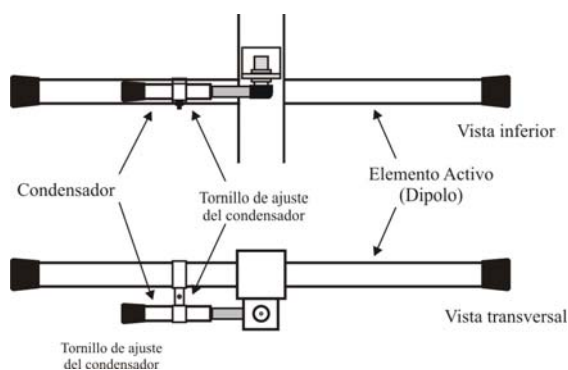


Figura 3.16. Ajuste de la impedancia de la antena.

3.3.2. Diseño del Dipolo

Existen varios métodos para el diseño de una antena tipo dipolo, y en este trabajo se utilizará el diseño del dipolo con acoplamiento gamma descrito en (Barboza, 1991, p.180).

Para el diseño del dipolo con adaptación gamma se siguieron los siguientes pasos:

- Se seleccionó el canal 14 de UHF (470-476MHz) para operar la antena en una frecuencia central del 473MHz, similar a la antena Yagi diseñada anteriormente, donde $\lambda = 63.42 \text{ cm}$
- Se seleccionó un tubo de aluminio de diámetro $5/8 \text{ pulgadas}$, aproximadamente $1,5 \text{ cm}$. $2a = 1.5 \text{ cm}$.
- Como $\lambda = 63.42 \text{ cm}$, la relación longitud diámetro es

$$\frac{L}{2a} = \frac{\lambda/2}{2a} = \frac{31,71 \text{ cm}}{1,5 \text{ cm}} = 21,14 \quad (3.22)$$

- Usando la grafica la de Fig.3.17., obtenemos la longitud fisica de la antena como

$$L_f = 0,476 \cdot \lambda = 0,476 \cdot 63,42 \text{ cm} = 30,18 \text{ cm} \quad (3.23)$$

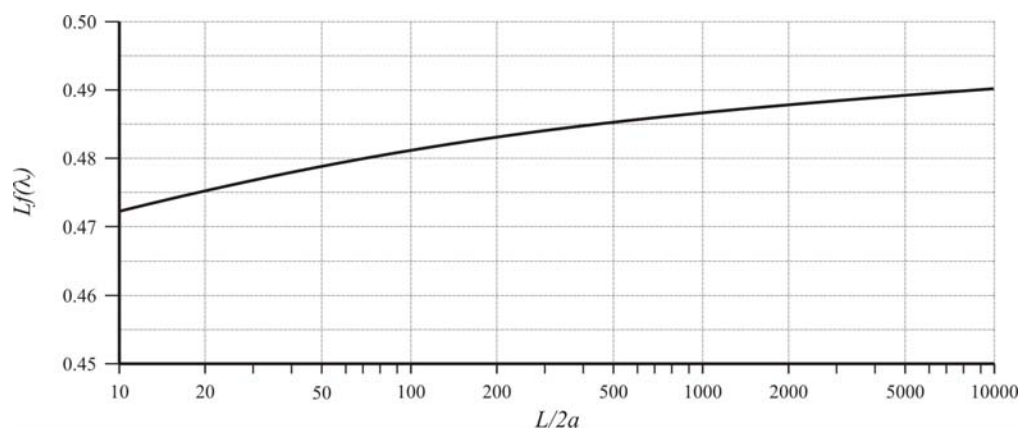


Figura 3.17. Longitud de resonancia del dipolo de media onda en función De la relación longitud / diámetro del conductor.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN

En este capítulo se describe el diseño e implementación de la solución al problema planteado. La solución propuesta está formada por dos módulos el Sistema de Transmisión y el Sistema de Recepción en donde se dibuja el Diagrama de Radiación. Se muestra los circuitos, los diagramas de flujo y los programas que forman la solución.

4.1. SISTEMA A DESARROLLAR

En este trabajo se propone implementar un sistema automatizado para obtener el diagrama de radiación de una antena. El diseño del sistema está basado en el diagrama de bloques típico para un sistema de medición de antenas propuesto por el IEEE en el Std 149-1979, que fue explicado en el capítulo 3. Se dividirá el diseño en dos módulos, el sistema de transmisión y el sistema de recepción. A continuación se describe como se implementará cada uno de los subsistemas con que está compuesto el sistema a desarrollar que es mostrado en la Fig.3.8.

4.1.1. Sistema de Transmisión

El *sistema de transmisión* está formado por una antena fuente y un transmisor.

Antena Fuente, utilizaremos como *antena fuente* la antena Yagi diseñada en el capítulo 3, la cual fue calculada para trabajar a una frecuencia de 473 MHz. Esta antena fue seleccionada

porque tiene buena directividad y el lóbulo mayor de su diagrama de radiación debe ser apuntado hacia la antena bajo prueba. La antena fuente será fijada en una base de hierro para asegurar la estabilidad de la antena y no se produzca ruido y la antena bajo prueba le incida una onda plana uniforme.

Transmisor, se utilizará como *transmisor* un *generador de señal* PICO MACOM® PLM860SAW, ya que este generador tiene los requerimientos necesarios para tal fin, como son:

- Control de la frecuencia: este equipo permite establecer la frecuencia de la señal en cualquier frecuencia deseada en el rango de 216 a 860MHz, para este trabajo se utilizará una frecuencia de 473MHz,
- Estabilidad de la frecuencia y pureza espectral: la fuente de frecuencia de este equipo un oscilador de alta calidad, que opera en el rango de frecuencia del equipo, y este tiene excepcionales características de bajo ruido.
- Nivel de la potencia: el rango de nivel de la salida de este equipo es de 45 a 55dBmV para todo el rango de frecuencia, suficiente para los fines de este trabajo, y
- Modulación: este equipo provee modulación.

Este equipo tiene una impedancia de 50Ω y se conectará a través de un cable coaxial RG-58 a la antena fuente, por lo que es necesario que en la antena fuente sea ajustada la impedancia a 50Ω .

4.1.2. Sistema de Recepción

El *sistema de recepción* está formado por una antena bajo prueba, un receptor, un sistema de posicionamiento y un sistema para registro de datos, como se mostró en la Fig.3.8.

En la Fig.4.1, se muestra como se implementará el sistema de recepción, en donde el sistema de posicionamiento será implementado con motores de pasos y un microcontrolador para gestionar la rotación de los motores, el receptor será implementado con un detector de envolvente junto con unos amplificadores y un microcontrolador para convertir el nivel de

señal medido de análogo a digital. Ambos sistemas estarán implementados en un único microcontrolador. Finalmente el sistema para el registro de datos será implementado con un computador personal, en donde se obtendrá el diagrama de radiación de la antenna bajo prueba.

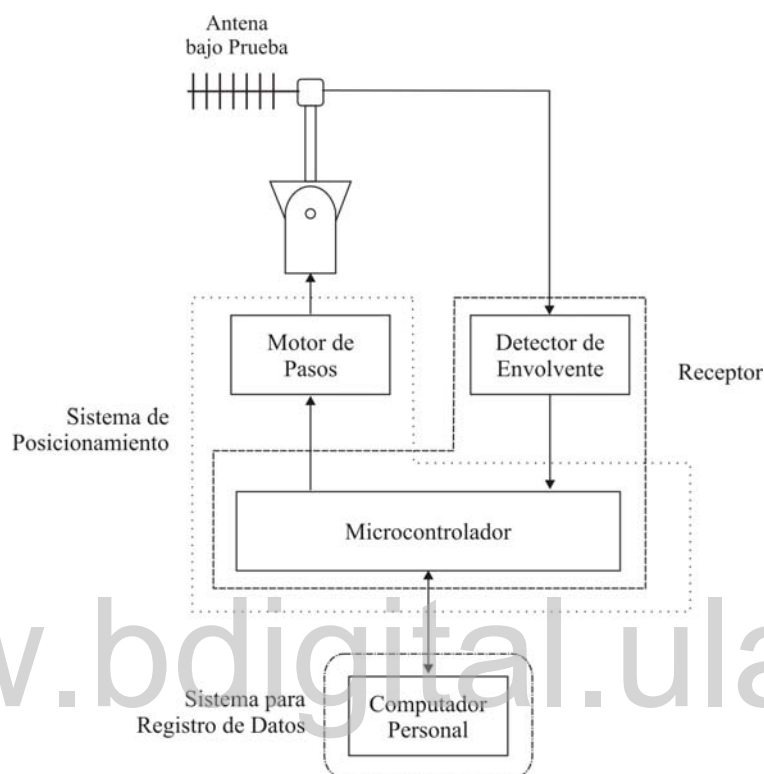


Figura 4.1. Sistema de Recepción.

Antena bajo Prueba, como *antena bajo prueba* se utilizan dos antenas diferentes, la antena Yagi y un dipolo de media onda que fueron diseñadas en el capítulo 3 y a las cuales se les obtendrá el diagrama de radiación. De acuerdo a las dimensiones físicas de la antena y la frecuencia de operación se dimensiona el campo de prueba.

Dimensionamiento del Campo de Prueba. Para que los efectos de *acoplamiento mutuo* entre las antenas sea despreciable se debe satisfacer la expresión (3.3). La longitud de onda (λ) para la frecuencia de trabajo es de 63.42cm , como se muestra en la expresión (3.14) por lo tanto resulta que las antenas deben estar separadas una distancia R dada por,

$$R \geq 10 \cdot \lambda = 10 \cdot 63,42\text{cm} \Rightarrow R \geq 6,34\text{m} \quad (4.1)$$

Para que la *variación de fase* entre las antenas sea despreciable se debe satisfacer la expresión (3.5). La dimensión más grande de la antena bajo prueba (a) es de 44.35cm , como se muestra en la Fig.3.14, por lo tanto resulta que las antenas deben estar separadas una distancia R dada por:

$$R \geq 2 \cdot \frac{a^2}{\lambda} = 2 \cdot \frac{44,35^2}{63,42} \text{cm} \Rightarrow R \geq 62,02\text{cm} \quad (4.2)$$

Condición que se satisface con la expresión (4.1).

Para que la *variación de amplitud* entre las antenas sea despreciable se debe satisfacer la expresión (3.7). Se considera la longitud de la región activa (L) de la antena bajo prueba como 1m , que es un valor exagerado para una antena en la banda de *UHF* (Albornoz, 1980, p.77), por lo tanto resulta que las antenas deben estar separadas por lo menos a una distancia R dada por,

$$R \geq 10 \cdot L = 10 \cdot 1\text{m} \Rightarrow R \geq 10\text{m} \quad (4.3)$$

Los criterios anteriores quedan satisfechos con este nuevo valor de R . Para este trabajo seleccionamos la separación de las antenas (R) de 12m .

El ajuste de la *iluminación de la antena* bajo prueba en el campo con reflexión se controla con la altura de las antenas y lo establecen las expresiones (3.12) y (3.15). Por lo que la altura para la antena bajo prueba (h_r) debe ser de al menos,

$$h_r \geq 3,3 \cdot a = 3,3 \cdot 44,35 \Rightarrow h_r \geq 1,46\text{m} \quad (4.4)$$

Se selecciona la altura de la antena bajo prueba (h_r) como $1,5\text{m}$ y la altura de la antena fuente (h_t) debe ser aproximadamente,

$$h_t \approx \frac{\lambda \cdot R}{4 \cdot h_r} = \frac{63,42\text{cm} \cdot 12\text{m}}{4 \cdot 1,5\text{m}} = 1,26\text{m} \quad (4.5)$$

En resumen, las dimensiones del campo de prueba para el sistema propuesto son mostradas en la Fig.4.2, las cuales son:

- Separación de las antenas: $R = 12\text{ m}$,
- Altura de la antena fuente: $h_r = 1.5\text{ m}$, y
- Altura de la antena bajo prueba: $h_t = 1.26\text{ m}$.

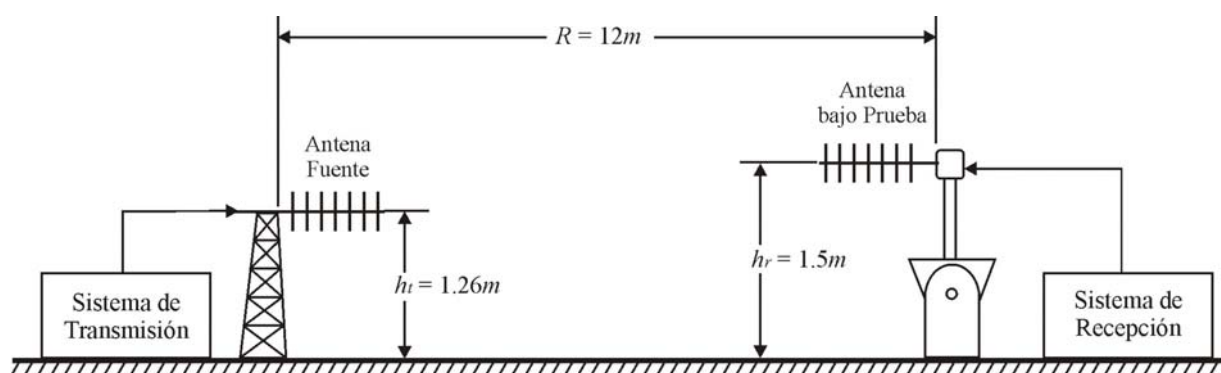


Figura 4.2. Dimensiones del Campo de Prueba del Sistema Propuesto.

El receptor, será el encargado de leer los niveles de radiación recibidos por la antena bajo prueba y transmitir estos valores al sistema de registro de datos, para que en este se dibuje finalmente el diagrama de radiación de la antena bajo prueba. El receptor será implementado con una serie de circuitos para medir la señal de radiación incidente, que incluyen, un amplificador RF, un detector de envolvente, un filtro paso bajos y un amplificador. Además por un microcontrolador, que posea un conversor análogo/digital (A/D), que pueda convertir el nivel de señal analógico en digital y pueda ser transmitido al sistema de registro de datos.

Antes de que el microcontrolador pueda leer el nivel de señal, está señal debe pasar por una etapa de acondicionamiento. El proceso de acondicionamiento de señal se ilustra en la Fig.4.3, y está formado por cuatro etapas. En la primera etapa es necesario amplificar la señal recibida en la antena Fig.4.3(b). Luego de amplificada la señal se pasa por un detector de envolvente Fig.4.3(c). La salida del detector de envolvente es pasada por un filtro pasa bajos Fig.4.3(d),

para tener una señal lo más continua posible. Finalmente, la salida del filtro es pasada a través de un amplificador, para que ésta pueda ser leída por el conversor A/D del microcontrolador.

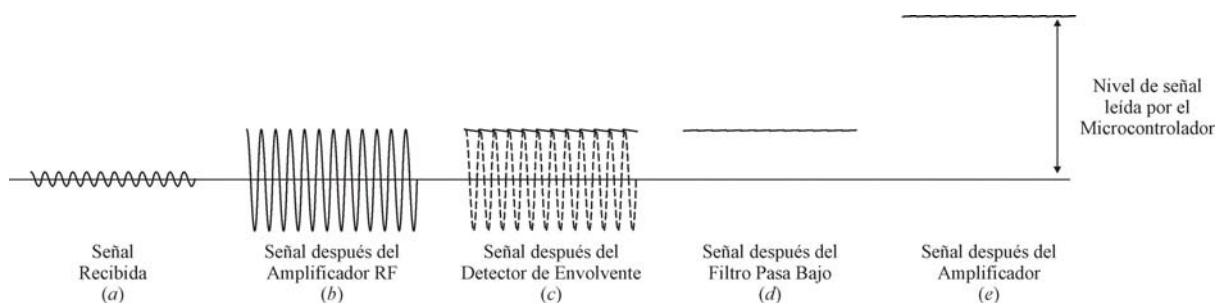


Figura 4.3. Proceso de acondicionamiento de la señal.

Para llevar a cabo este acondicionamiento se interconecta la antena bajo prueba con el microcontrolador como se muestra en la Fig.4.4, a través de cuatro etapas.

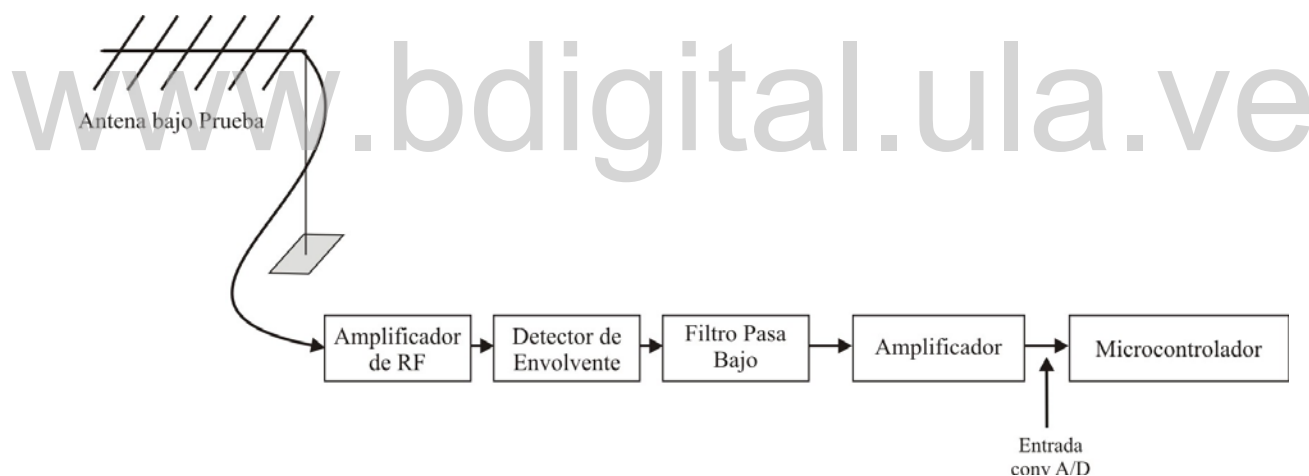


Figura 4.4. Etapas del proceso de acondicionamiento de la señal.

La etapa de *Amplificador RF* se hará a través de un amplificador comercial tipo *Booster*, que se muestra en la Fig.4.5. A la entrada de este amplificador se conectará la antena bajo prueba y la salida será conectada a la siguiente etapa que es el detector de envoltorio. Se utilizó este amplificador comercial, pues está disponible en el mercado local y es un amplificador ampliamente utilizado y trabaja en un amplio rango de frecuencias, que incluye FM, VHF y UHF. Este amplificador tiene una impedancia de entrada de 75Ω por lo que es necesario que en la antena bajo prueba sea ajustada la impedancia a 75Ω .

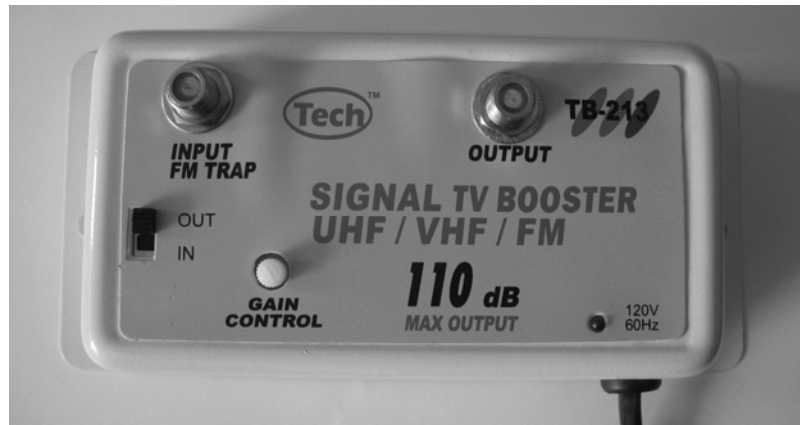


Figura 4.5. Amplificador comercial tipo *Booster*.

La etapa de *Detector de Envolvente* se hará a través del circuito mostrado en la Fig.4.6. El circuito está formado por una resistencia de entrada R_i que se usa para acoplar el circuito con la salida del amplificador de RF, el valor de la resistencia es de 75Ω correspondiente a la impedancia de salida del amplificador. Luego la señal es pasada por un diodo demodulador D (1N60) y seguidamente por una resistencia R_e en paralelo a un condensador C_e . Los valores de R_e y C_e deben calcularse tal que se pueda obtener un rizado adecuado para no perder el nivel de la señal. La implementación del detector de envolvente es descrita en (Pietrosemoli, 1995, pag. 4-3 y 4-4), en donde se explica que la frecuencia de corte del circuito RC debe estar entre las frecuencias f y ω , donde $f \geq 10 \cdot \omega$ para una buena operación, por lo tanto basta tomar la constante RC como,

$$R_e \cdot C_e = 10 \cdot \frac{1}{f} \quad (4.6)$$

Para la frecuencia de trabajo $f = 473\text{MHz}$ y seleccionando un valor comercial para el condensador $C_e = 47\text{pF}$, entonces resulta que la resistencia es,

$$R_e = \frac{10}{f \cdot C_e} = \frac{10}{473\text{MHz} \cdot 47\text{pF}} = 450\Omega \quad (4.7)$$

Seleccionamos un valor comercial para $R_e = 470\Omega$.

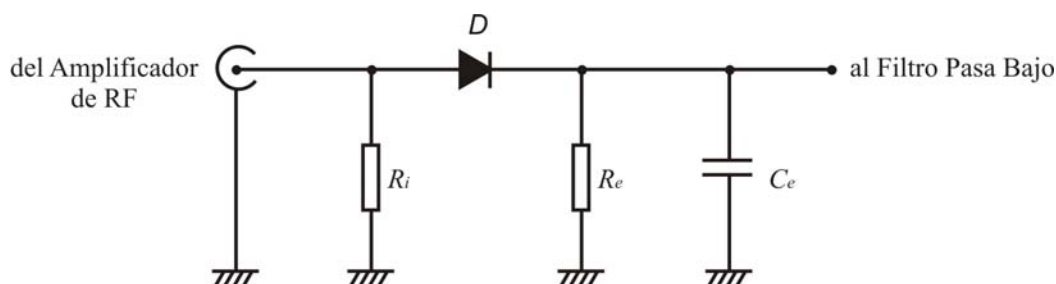


Figura 4.6. Detector de Envolverte.

La etapa de *filtro pasa bajo* se hará a través del circuito de la Fig.4.7. El filtro está formado por una resistencia R_f y un condensador C_f . La frecuencia de corte del filtro es dada por la expresión (4.6) y para obtener una señal lo más continua posible se decidió filtrar todas la frecuencias superiores a la 10Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_f} \quad (4.6)$$

Se selecciono un valor comercial para el condensador $C_f = 10\mu F$ y con la expresión (4.6) se calculo el valor para $R_f = 1.5 K\Omega$.

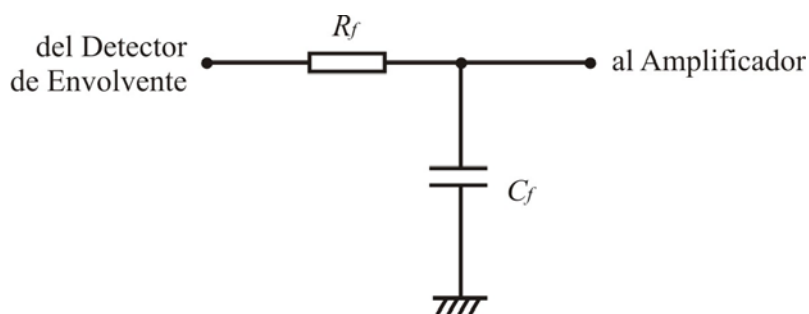


Figura 4.7. Filtro Pasa Bajos.

La etapa del *amplificador* se hará a través del circuito de la Fig.4.8. El amplificador está formado por un amplificador de instrumentación AD620. En la salida, además se cuenta con un diodo zener de 4.7V polarizado inversamente, para eliminar niveles de potencia superiores a los 4.7V, ya que el valor máximo permitido en la entrada del conversor análogo/digital del microcontrolador es 5V.

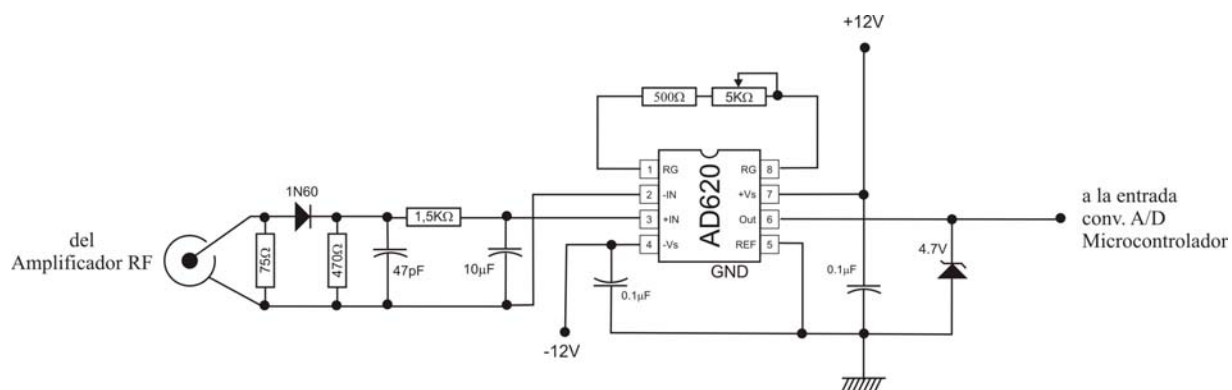


Figura 4.8. Amplificador de Potencia.

El nivel de la señal proveniente de la antena depende de la potencia de la señal incidente y está en el orden de los milivoltios. El amplificador de instrumentación aumenta el nivel de la señal de entrada de 2 hasta 100 veces, y esta ganancia estará controlada por la resistencia variable de $50K\Omega$, como se observa en la expresión 4.7.

$$G_{\max} = \frac{49.4K\Omega}{500\Omega} + 1 = 100 \quad G_{\min} = \frac{49.4K\Omega}{500\Omega + 50K\Omega} + 1 = 2 \quad (4.7)$$

La ganancia del amplificador de instrumentación se debe establecer en el momento de la medición, cuando la antena bajo prueba este direccionada en la máxima ganancia.

El sistema de posicionamiento será el encargado de hacer girar la antena bajo prueba a lo largo de la esfera (Fig.3.8) que se forma para obtener el diagrama de radiación, como se muestra en la Fig.3.9. En este trabajo se propone usar un motor de pasos para controlar la rotación de la antena en el plano horizontal. O sea, los diagramas de radiación que se van a obtener en este trabajo corresponden a diagramas paralelos al plano horizontal con latitud constante ($\phi = \phi_0$). Para variar la latitud del diagrama, se debe hacer un ajuste manual en el soporte de la antena, como se muestra en la Fig.4.9.

El soporte de la antena está conectado a un engranaje de 124 dientes, que fué construido especialmente para este trabajo. El motor de pasos usado en este trabajo, consta de 48 pasos por rotación y tiene un engranaje conectado a su eje de 16 dientes.

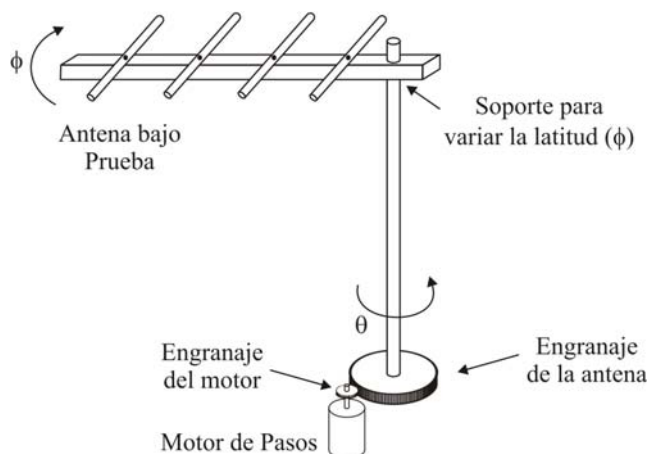


Figura 4.9. Sistemas de Posicionamiento.

El engranaje de la antena se conecta al engranaje del motor de pasos para hacer funcionar la rotación de la antena. El número total de pasos (NP) que son necesarios para rotar la antena bajo prueba los 360° es de 372 pasos, como lo muestra la siguiente expresión:

$$\frac{48 \text{ pasos}_m}{16 \text{ dientes}_m} = \frac{NP}{124 \text{ dientes}_{ant}} \Rightarrow NP = \frac{48 \text{ pasos}_m \times 124 \text{ dientes}_{ant}}{16 \text{ dientes}_m} = 372 \text{ pasos} \quad (4.6)$$

Entonces, se obtiene que 1 *paso* de rotación del motor corresponde a $0,9677^\circ$ de rotación de la antena, como se muestra en la expresión,

$$\frac{360^\circ}{372 \text{ pasos}} = 0,9677^\circ / \text{paso} \quad (4.7)$$

Para establecer el paso de rotación, se seleccionan valores de pasos que sean múltiplos 372 pasos, resultando estos valores en 1, 2, 3, 4, 6, 12, 31 y 62 pasos. Para este trabajo se estableció que el paso de rotación corresponderá con los valores múltiplos de 372 encontrados anteriormente.

El controlador de posición será implementado por un microcontrolador, que controlará la rotación del motor de pasos. Para este trabajo se selecciono un microcontrolador PIC16F876A, el cual está disponible en el mercado local. La comunicación entre el microcontrolador y el motor de pasos se realizará a través de un *driver* que proporcionará la corriente necesaria para

poder mover el motor, ya que la corriente proporcionada por las salidas de microcontrolador no es suficiente para mover el motor. Para este trabajo se utilizó un motor de pasos PF55-48 y un driver SN754410, y la interconexión se muestra en la Fig.4.10.

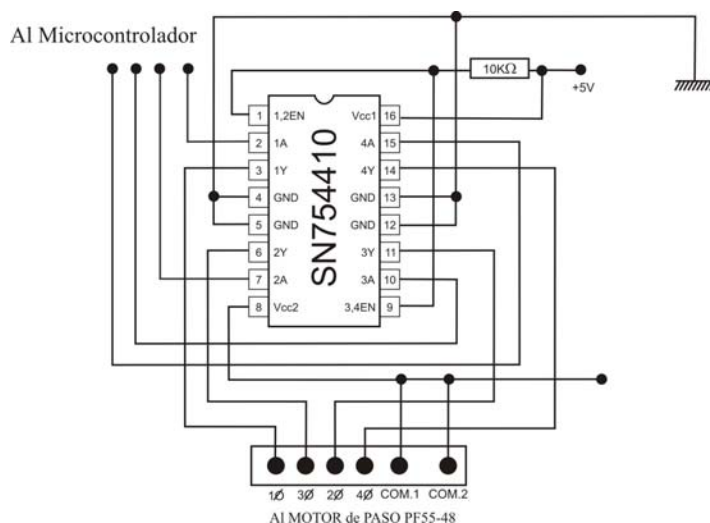


Figura 4.10. Driver para rotar el motor de pasos.

La rotación de la antena bajo prueba estará dirigida por el *sistema de registro de datos*, que en este trabajo se implementa con un computador personal (PC). La comunicación entre el microcontrolador y el PC se realizará a través de la comunicación serial y el estándar RS-232 es el más indicado para tal fin, por las siguientes razones:

1. La antena bajo prueba y el PC estarán separados físicamente unos pocos metros y el estándar RS-232 permite conectar 2 dispositivos hasta unos 15 metros, que es suficiente para este trabajo.
2. La velocidad de comunicación requerida entre el microcontrolador y el PC en este trabajo no es crítica, pues existen elementos mecánicos en el sistema de baja velocidad (motor de pasos), y la cantidad de datos a transmitir también es baja, entonces basta con tomar una velocidad de 9.600 bits por segundo (bps), de los 59.600 bps máximos que permite el estándar RS-232.
3. Tanto el PC como el microcontrolador PIC seleccionado para este trabajo (con ciertos circuitos adicionales, como se muestra en la Fig.4.11) tienen disponible un puerto serial RS-232.

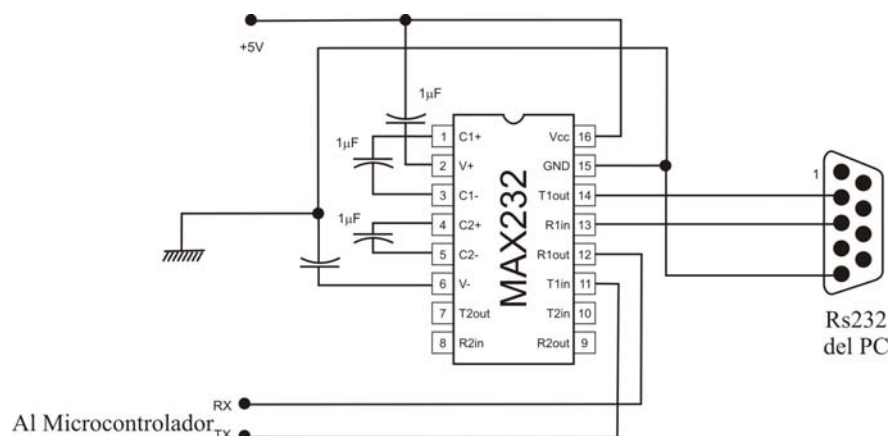


Figura 4.11. Interconexión entre el PC y el PIC vía RS232.

Protocolo de Comunicación. Para establecer la comunicación entre el sistema de registro de datos implementado con un PC y el controlador del sistema de posicionamiento implementado con un PIC, se definió un protocolo de comunicación, como se muestra en la Fig.4.12(a).

La comunicación entre el PC y el PIC se hará a través de mensajes de 8 bits, y siempre se iniciará desde el PC. Desde el PC se puede preguntar el estado del PIC o se puede indicar una rotación de la antena.

Cuando el PC solicita el estado del PIC, se envía el mensaje ESTADO (Fig.4.12(b)) y el PIC responderá al PC con un mensaje OK (Fig.4.12(d)). Si el PC recibe el mensaje OK del PIC, esto indicará al PC que el PIC está listo para la comunicación y se puede empezar el proceso para obtener el diagrama de radiación. Si el PC no recibe el mensaje de respuesta OK del PIC en un tiempo de 2 segundos, esto indicará al PC que el PIC no está listo para la comunicación.

Cuando se inicia el proceso para obtener el diagrama de radiación, el PC enviará a rotar la antena bajo prueba los 360° y leerá los niveles de señal incidentes en la antena en cada rotación. Para esto el PC solicita al PIC que realice la rotación correspondiente del motor de pasos, y entonces se envían mensajes ROTAR(*dir*, *pasos*) (Fig.4.12(c)), donde *dir* indicará la dirección de la rotación (1 anti-horario y 0 horario) y *pasos* el número de pasos que rotará el motor. *Pasos* es una variable de 6 bits, por lo que tendrá un rango de 0 a 63, y el PIC rotará el motor “*pasos*” pasos.

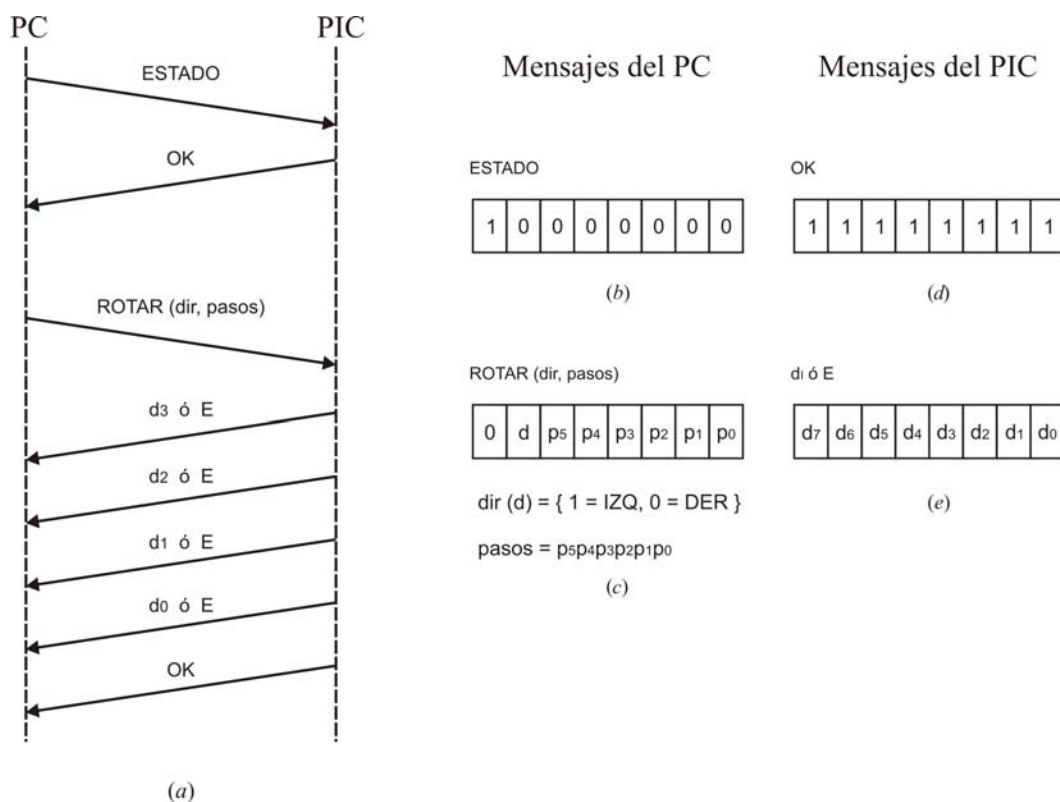


Figura 4.12. Protocolo de comunicación entre el PC y el PIC.

El PIC ante este mensaje realizará la lectura del nivel de señal en la entrada del convertidor analógico/digital de 10 bits y procederá a rotar el motor en la dirección *dir*, “*pasos*” pasos. Luego de la rotación, el PIC responderá al PC con 4 mensajes indicando la respuesta a la rotación, seguido de un mensaje OK que confirmará la comunicación, como se muestra en la Fig.4.12(a). La respuesta a la rotación serán los 4 bytes en BCD (Binario Codificado Decimal) correspondientes a la lectura del nivel de señal por el convertidor analógico/digital del PIC. Para evitar las vibraciones de la antena causadas por la rotación, el PC enviará los mensajes cada 4 segundos, tiempo en el cual la antena se estabiliza luego de la rotación. Si se produce algún error o cambio de estado en el PIC, la respuesta a la rotación será “EEEE” indicando que no se pudo completar la rotación.

4.1.3. Circuito y Programa de PIC, para controlar el Sistema de Recepción

Como se describió en la etapa del amplificador, la ganancia del amplificador debe controlarse de forma manual con la resistencia variable que se estableció para tal fin. Para ajustar la ganancia es necesario que la antena bajo prueba está posicionada en la dirección de máxima

ganancia, y para esto se conectan dos pulsadores al PIC para realizar la rotación manual de la antena, bien sea en sentido horario o anti-horario. Además se conectará otro pulsador para iniciar el ajuste de la ganancia, junto con unos diodos LED que indiquen si el valor de la ganancia es el adecuado. Para que no exista interferencia entre los ajustes manuales de la antena y la lectura del diagrama de radiación, se usa un switch para indicar si la antena está en ajuste manual o en modo comunicación. El proceso de ajuste manual de la antena, que incluye el posicionamiento manual de la antena y el ajuste de la ganancia lo llamaremos MOD_SWITCH, y el proceso de comunicación, que incluye la lectura de los niveles de señal incidente para obtener el diagrama de radiación lo llamaremos MOD_COM.

El circuito para implementar el sistema de recepción se muestra en la Fig.4.13. En este circuito se muestra:

- El circuito para implementar la etapa de acondicionamiento de la señal. Esta etapa se conecta al pin RA0 (pin 2) del PIC, que es una entrada del convertor A/D del PIC.
- El circuito para implementar la comunicación serial (vía RS232) entre el PC y el PIC. Este circuito se conecta a los pines RC6 (TX, pin 17) y RC7 (RX, pin 18) del PIC.
- El circuito para implementar las rotaciones del motor de pasos. Este circuito se conecta a los pines RC0, RC1, RC2 y RC3 (pines 11, 12, 13 y 14) del PIC.
- La alimentación requiere voltajes -12V, +12V y +5V. El amplificador de instrumentación -12V y +12V, el motor con 12V y el resto de circuitos con +5V. Se usa un diodo LED (LED_POWER) para indicar que el circuito está energizado.
- El PIC 16F876A usado para este trabajo, se conecta a un resonador de 4MHz.
- Adicional a los circuitos descritos, este circuito tiene 1 switch, 5 pulsadores, y 7 diodos LED, que tiene las siguientes funciones:
 - Pulsador RESET: tiene la función de inicializar el PIC.
 - Switch SW_MODO: conectado al pin RC4 (pin 15) del PIC, cuando está abierto el PIC trabajara en MOD_COM y cuando está cerrado el PIC trabajara en MOD_SWITCH.
 - Pulsador BTN_DER: conectado al pin RB5 (pin 26) del PIC, cuando el PIC está en MOD_SWITCH, se usa para rotar la antena un paso en sentido horario.

- Pulsador BTN_IZQ: conectado al pin RB4 (pin 25) del PIC, cuando el PIC está en MOD_SWITCH, se usa para rotar la antena un paso en sentido anti-horario.
- Pulsador BTN_CANCEL: conectado al pin RB6 (pin 27) del PIC, cuando se pulsa y el PIC está en MOD_COM, se detiene el proceso de comunicación.
- LED_MOD_COM: conectado al pin RA2 (pin 4) del PIC, está encendido durante el MOD_COM.
- LED_MOD_SW: conectado al pin RA1 (pin 3) del PIC, está encendido durante el MOD_SWITCH.
- LED_COM: conectado al pin RB2 (pin 23) del PIC, está encendido durante el proceso de comunicación entre el PC y el PIC.
- LED_IZQ: conectado al pin RB4 (pin 25) del PIC, está encendido durante la rotación manual de la antena en sentido anti-horario.
- LED_DER: conectado al pin RB5 (pin 26) del PIC, está encendido durante la rotación manual de la antena en sentido horario.
- Pulsador BTN_CAL: conectado al pin RC5 (pin 16) del PIC, cuando se pulsa y el PIC está en MOD_SWITCH, se inicia el proceso de ajuste de la ganancia. Después del ajuste, se pulsa para finalizar el ajuste.
- LED_GMB: conectado al pin RA3 (pin 5) del PIC, está encendido cuando el nivel de la señal leída por el PIC es muy bajo, por debajo de 40% del valor máximo.
- LED_GMA: conectado al pin RA5 (pin 7) del PIC, está encendido cuando el nivel de la señal leída por el PIC es muy alto, por encima de 90% del valor máximo.
- LED_GOK: conectado al pin RB7 (pin 28) del PIC, está encendido cuando el nivel de la señal leída por el PIC está en un valor aceptable, entre el 40 y 90% del valor máximo.
 - Cada switch y pulsador son activos en bajo y sus respectivas pines del PIC están conectados a través de una resistencia de $10K\Omega$ a 5V. Cada LED está conectado a través de una resistencia de 330Ω a tierra.

El PIC se programo para cumplir con las funciones antes descritas. El diagrama de flujo del programa del PIC se muestra en la Fig.4.14.

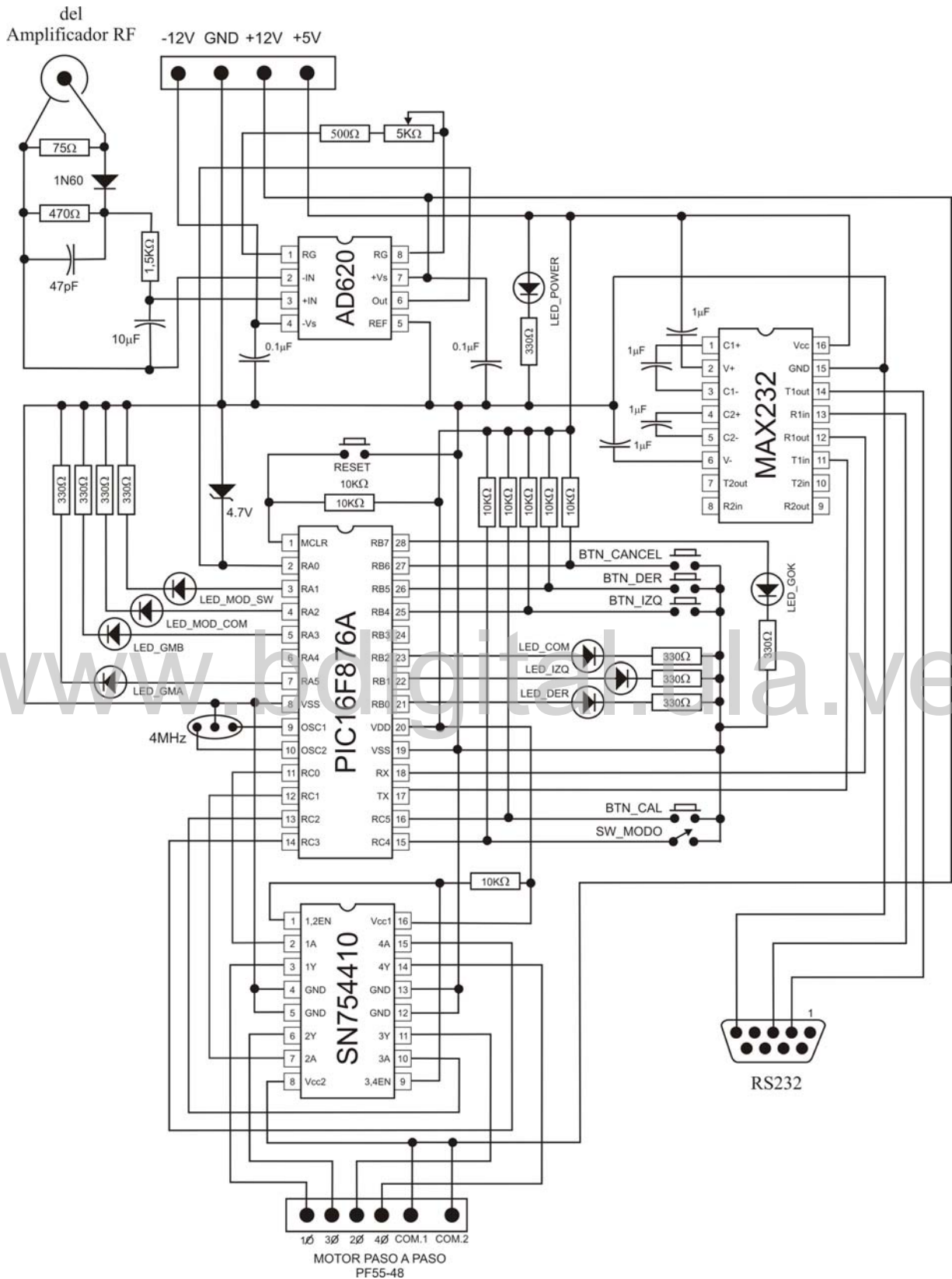


Figura 4.13. Circuito para implementar el Sistema de Recepción.

Lo primero que se observa en el diagrama de flujo es *Inicialización*. En esta inicialización se configuran los pines del PIC. El puerto PORTA usa el pin RA0 para la entrada del conversor A/D, y los pines RA1, RA2, RA3 y RA5 para las salidas de los LEDs: LED_MOD_SW, LED_MOD_COM, LED_GMB y LED_GMA respectivamente, por lo que el registro TRISA debe configurarse con 0x01 (Microchip, 2003, pp. 29-30). El puerto PORTB usa los pines RB0, RB1, RB2 y RB7 como salidas de los LEDs: LED_DER, LED_IZQ, LED_COM y LED_GOK respectivamente y usa los pines RB4, RB5 y RB6 como entrada de los pulsadores: BTN_IZQ, BTN_DER y BTN_CANCEL respectivamente, por lo que el registro TRISB debe configurarse con 0x70 (Microchip, 2003, pp. 31-32). El puerto PORTC usa todos los 4 pines menos significativos como salidas para controlar el motor y los pines RC4, RC5 y RC7 como entradas para: SW_MOD, BTN_CAL y RX, y el pin RC6 como salida para TX, por lo que el registro TRISC debe ser configurado con 0xB0 (Microchip, 2003, pp. 33-34). También se escribe en el puerto PORTC 0x03, para activar 2 de las bobinas del motor y se quede en posición inicial.

También se configuran el conversor analógico/digital, para que la entrada analógica sea RA0, y la conversión sea de 10bits, por lo que el registro ADCON0 debe ser configurado con 0x01 y el registro ADCON1 debe ser configurado con 0x8E (Microchip, 2003, pp. 111-112). Se configura el puerto serial, para que trabaje de 9600 bps y 8 bits de datos, por lo que el registro SPBRG debe ser configurado con 26, el registro RCSTA debe ser configurado con 0x90 y el registro TXSTA debe ser configurado 0x24 (Microchip, 2003, pp. 95-98).

Finalmente se encienden todos los LEDs, para verificar que todos están funcionando correctamente, se espera un segundo y se apagan todos los LEDs para indicar que el PIC está listo para operar.

En el bucle principal del programa, primero se chequea el SW_MODO para saber en que modo está operando el circuito. Si está en MODO_SWITCH, se lee la orden a través de los pulsadores BTN_DER, BTN_IZQ y BTN_CAL. Si la orden es BTN_DER se rota el motor en sentido horario, si la orden es BTN_IZQ se rota el motor en sentido antihorario y si la orden es BTN_CAL, se inicia el proceso de ajuste de la ganancia.

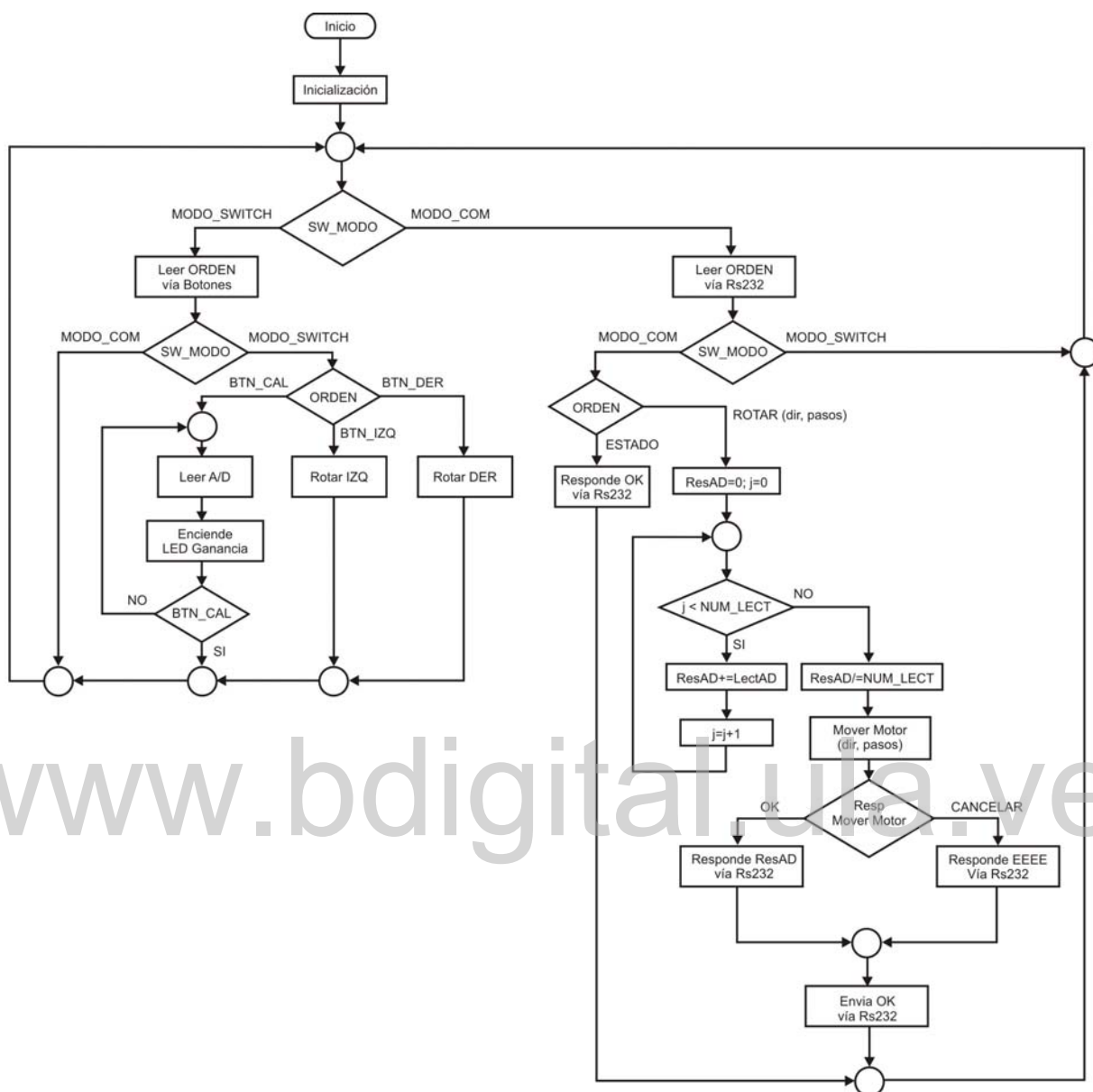


Figura 4.14. Diagrama de flujo del programa del PIC.

Cuando se inicia el proceso de ajuste de la ganancia se encienden los LEDs: LED_GMB, LED_GMA y LED_GOK, se espera un segundo y se apagan los LEDs. Se supone que la antena bajo prueba debe estar en la dirección de máxima ganancia y el PIC lee la entrada del convertor A/D. Si el nivel está por debajo del 40% del valor máximo se enciende el LED_GMB, si el nivel está por encima del 90% del valor máximo se enciende el LED_GMA y en caso contrario se enciende el LED_GOK. Se debe ajustar la resistencia variable hasta que el LED_GOK se encienda. Si únicamente queda encendido el LED_GMB, es que la antena no

está recibiendo suficiente señal, por lo que es necesario que la ganancia en el generador de señal sea aumentada. Este proceso se repite hasta que se presiona de nuevo el BTN_CAL, y se encienden los LEDs: LED_GMB, LED_GMA y LED_GOK, se espera un segundo y se apagan los LEDs para indicar que finalizó el proceso de ajuste de la ganancia.

Si el SW_MODO para está en MODO_COM, se lee la orden desde el puerto RS232. Si la orden es *ESTADO*, el PIC responde al PC con OK. Si la orden es *ROTAR(dir, pasos)*, el PIC lee el nivel en la entrada del conversor A/D, para hacer la medida mas exacta, lee la entrada del conversor 20 veces (NUM_LECT), con un retardo de 50ms entre lecturas, y luego hace un promedio de las lecturas. Finalizada la lectura, envía a rotar el motor en la dirección *dir*, “*pasos + 1*” pasos. Durante la rotación del motor se puede presionar el BTN_CANCEL y en ese caso el proceso de rotación devuelve CANCELAR, en caso contrario devuelve OK. Si la rotación fue OK, se envía al PC el valor del nivel de señal leído en el conversor A/D en BCD y si la rotación fue CANCELAR, se envía al PC “EEEE” para indicar que se canceló la rotación. Finalmente se envía OK para indicar que finaliza la comunicación.

Finalizado bien el MODO_SWITCH o el MOD_COM, se vuelve a iniciar el bucle principal. Si durante la lectura de la orden (en cualquiera de los dos modos de operación) o durante la rotación del motor, se cambia el SW_MODO se vuelve a iniciar el bucle principal.

El listado del programa del PIC se muestra en los apéndices y fue compilado con la versión demo del compilador ANSI C de HI-TECH C® PRO, versión 9.60 PL5, disponible en la web de Hi-Tech Software (<http://www.htsoft.com>).

4.1.4. Programa del PC para representación del Diagrama de Radiación

Finalmente para completar el diseño se implementa el sistema para el *registro de datos* con un Computador Personal (PC), en donde se representará el diagrama de radiación. El programa del PC tiene como función principal la lectura de los datos de la radiación provenientes de receptor y la de dibujar el diagrama de radiación. Para tal fin se programó en el PC una interfaz gráfica que se muestra en la Fig.4.15. Fue programada usando el lenguaje Visual C# (Microsoft, 2008) y compilada usando Microsoft Visual Studio 2005 (Microsoft, 2005). Se

uso Visual C# para programar la interfaz gráfica, debido a que es un lenguaje de programación de propósito general y es fácil crear una aplicación para distribuir, sin necesidad luego de tener instalado ningún otro software. Además, su sintaxis se basa en el lenguaje C, el mismo usado para programar el PIC y fue más fácil aprender tal lenguaje. Y finalmente porque se tenía una licencia original de este software para hacer la programación.

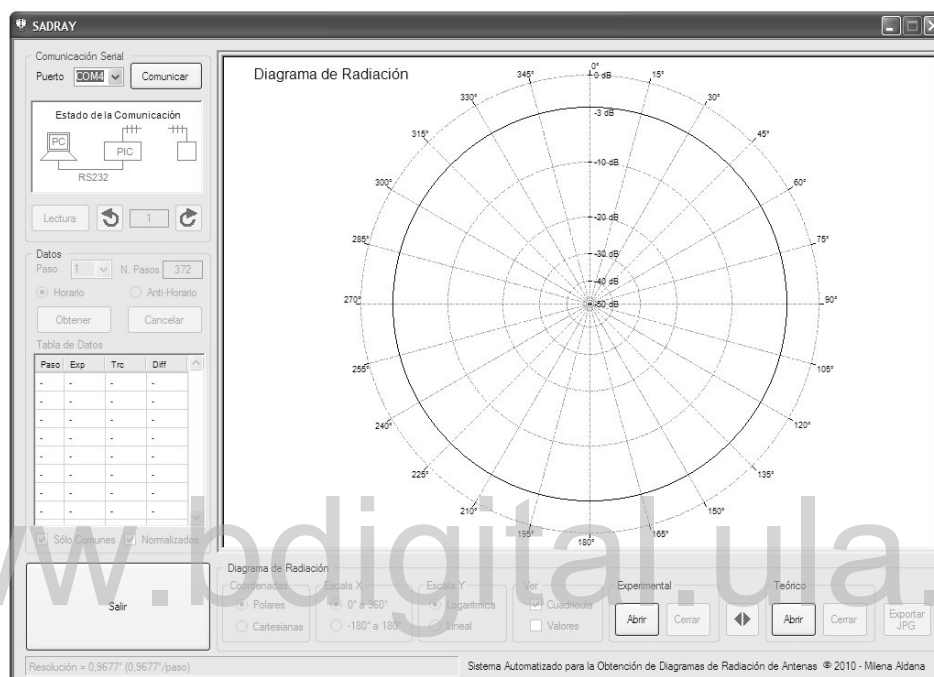


Figura 4.15. Interfaz del Programa del PC.



En el lado izquierdo de la interfaz de la Fig.4.15 se encuentran el panel de *Comunicación Serial*, el panel de *Datos* y el botón de *Salir*. El botón *Salir* simplemente funciona para cerrar la aplicación.

El panel de *Comunicación Serial* es el que nos permite seleccionar el puerto de comunicación serial del PC que se usará para comunicarse con el PIC y además mostrará el estado de la comunicación. En la Fig.4.16 se muestran los posibles estados del panel de comunicación serial. La Fig.4.16(a) muestra la forma inicial del panel de comunicación serial. En esta pantalla se selecciona el puerto serial del PC (*COM1*, *COM2*, ...) en el cual este conectado el cable de comunicación serial con el PIC. Posteriormente se debe presionar el botón *Comunicar* para conectarse con el sistema.



Figura 4.16. Estados del Panel de Comunicación.

El sistema puede responder de 2 formas, una respuesta es que no exista comunicación con el PIC, y en este caso en panel de comunicación aparece como se muestra en la Fig.4.16(b) en donde solo es resaltado el PC. Esta situación se puede presentar o bien porque el PIC no este operando, para lo cual se debe revisar la alimentación eléctrica del PIC, que el PIC está en MODO_SWITCH, que el cable de comunicación no está bien conectado o este defectuoso. La otra respuesta es que el PIC esté en estado OK y puede iniciarse el proceso de obtención del diagrama de radiación, y en ese caso aparece en el panel de comunicación serial como se muestra en la Fig.4.16(c). A partir de este momento se puede iniciar le transferencia de los datos, desde el PIC.

Se puede usar los botones  y  para rotar la antena en sentido horario y anti-horario respectivamente, desde la interfaz del PC, de la misma manera como se hace desde los switches, a diferencia que el número de pasos a rotar es dado por el valor que podemos escribir entre ambos botones. Además se puede usar el botón *Lectura* para obtener el nivel de señal que actualmente está recibiendo el PIC.

Cuando la comunicación serial es OK, (Fig.4.16(c)) se activa el Panel de *Datos*. En el panel de datos se selecciona el paso (1 a 63) con el que se va a realizar el diagrama de radiación, como se muestra en la Fig.4.17(a) donde está seleccionado 12 como paso. Luego de seleccionar el paso con que se quiere el diagrama de radiación, se presiona el botón *Obtener*. Esto hará que comience el proceso de lectura del diagrama de radiación. Luego que llegan los datos de los niveles de señal para los distintos ángulos de rotación, aparece cada una de las medidas en la

Tabla de Datos del panel de datos, como se muestra en la Fig.4.17(b). Cada fila de la tabla tiene el paso y el valor de nivel de señal normalizado. Si se desea ver el valor del nivel de señal tal como fue leído por el PIC, se deselecciona la opción *Normalizados*, como se muestra en la Fig.4.17(c). Luego de recibido todos los datos se dibuja el diagrama de radiación en el panel del diagrama, como se muestra en la Fig.4.18(a).

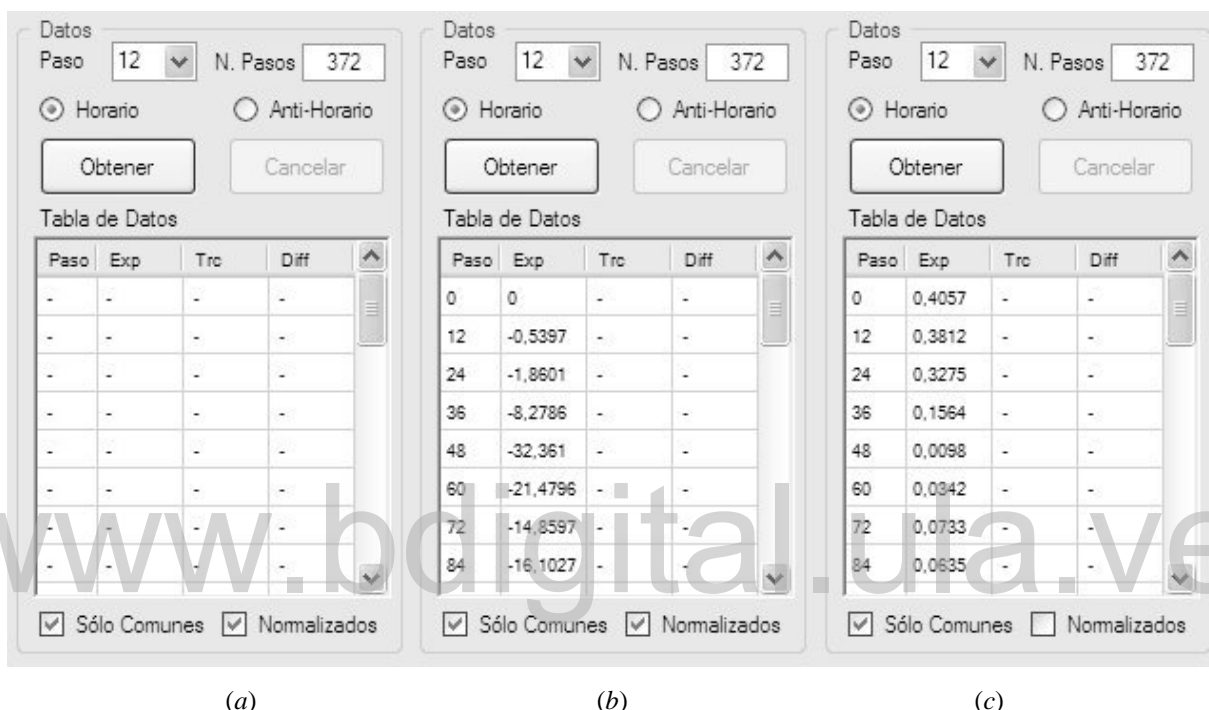
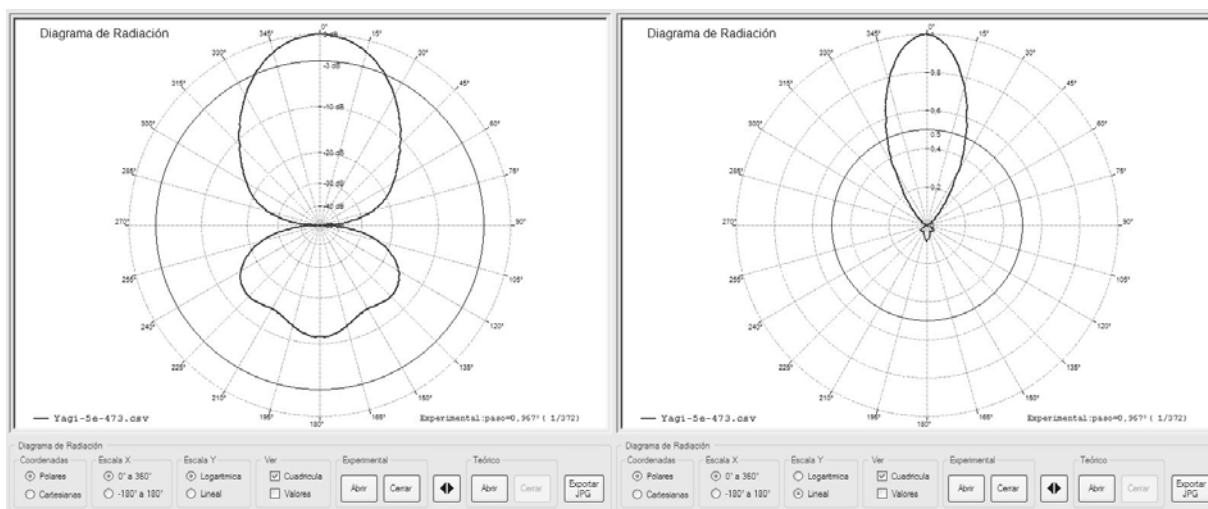


Figura 4.17. Panel de Datos.

Del lado derecho de la interfaz (Fig.4.15) se encuentra el panel del *Diagrama de Radiación*. El diagrama de radiación obtenido se dibujará en el panel como se muestra en la Fig.4.18 y Fig.4.19. Se puede manipular el diagrama con los controles que se encuentran debajo de tal panel. La opción *Coordenadas* permite cambiar el tipo de coordenadas con las que está dibujado el diagrama, las cuales puede ser *Polares* o *Cartesianas*. En la Fig.4.18 el diagrama de radiación está dibujado en coordenadas polares, y en la Fig.4.19 el diagrama de radiación está dibujado en coordenadas cartesianas. La opción *EscalaY* permite cambiar el tipo de escala Y con que se dibujará el diagrama de radiación, las cuales pueden ser *Logarítmica* o *Lineal*. En la Fig.4.18(a) y Fig.4.19(a) los diagramas están dibujados en escala logarítmica y en la Fig.4.18(b) y Fig.4.19(b) los diagramas están dibujados en escala lineal.

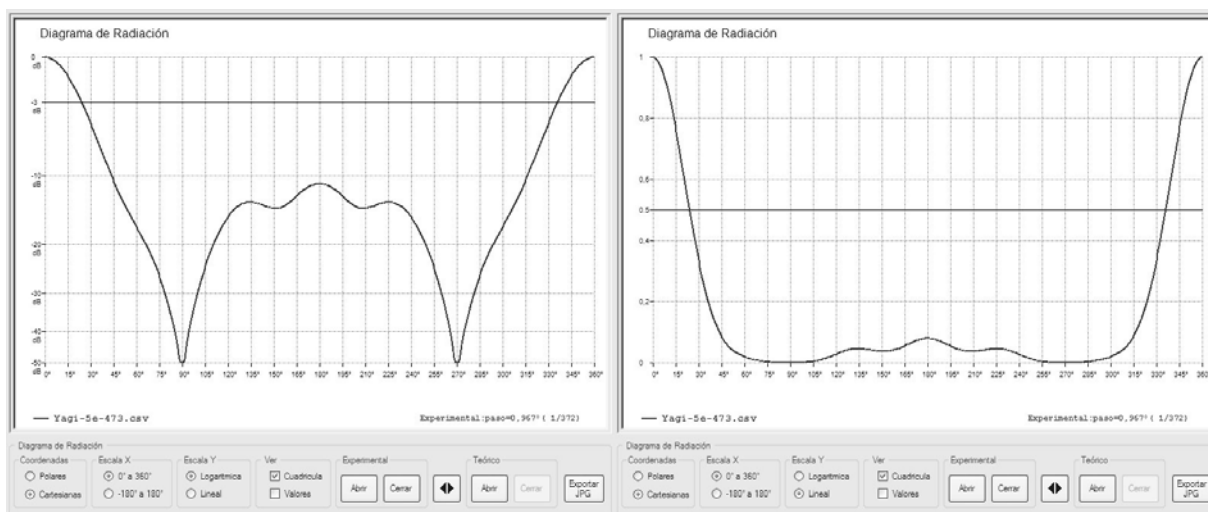


(a)

(b)

Figura 4.18. Panel del Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, en escala logarítmica (a) y lineal (b).


En la opción *EscalaX* se puede cambiar la escala X del diagrama, la cual puede ser de 0° a 360° como se muestra en las Fig.4.18 y Fig.4.19, o del -180° a 180° como se muestra en la Fig.4.20(a). Con la opción *Ver*, se puede o no mostrar tanto la cuadrícula como los valores con que fue construido el diagrama. Note que en la Fig.4.18, Fig.4.19 y Fig.4.20(a) no están marcados los valores con que fue dibujado el diagrama y en la Fig.4.20(b) si están pintados los puntos (valores) con que fue dibujado en diagrama de radiación.

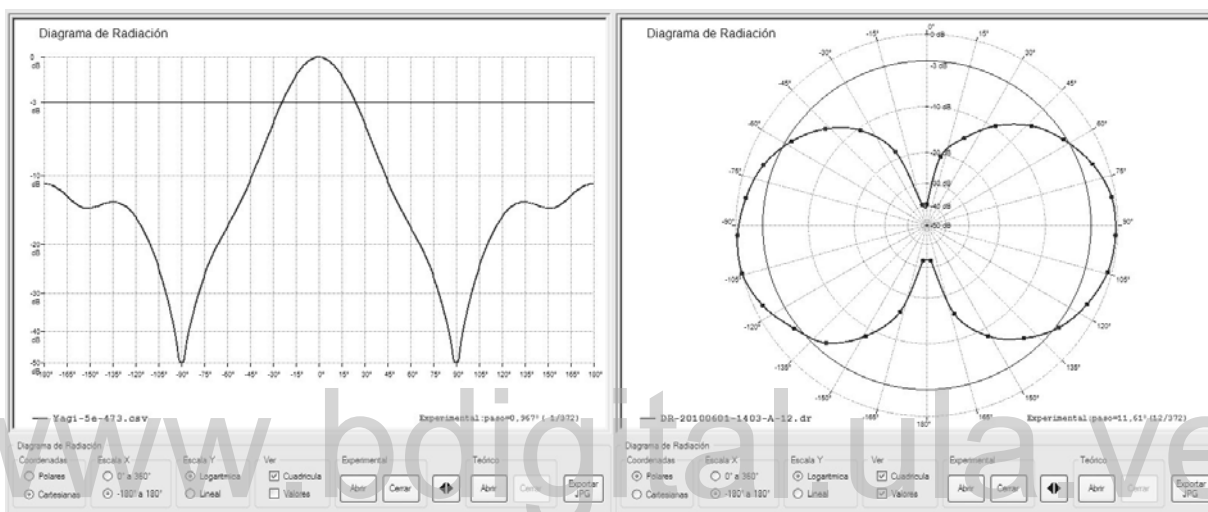


(a)

(b)

Figura 4.19. Panel del Diagrama de Radiación en Coordenadas Cartesianas, en escala logarítmica (a) y lineal (b).

Además de las opciones *Coordenadas*, *EscalaX*, *EscalaY* y *Ver*, existen varios botones. En este programa se pueden abrir dos diagramas de radiación de forma simultánea (*Experimental* y *Teórico*), con la finalidad de hacer comparaciones entre los diagramas. La idea es que luego de obtener un diagrama de radiación de forma experimental, este se pueda comparar con su respectivo diagrama de radiación teórico. Entonces, hay un panel que permite *Abrir* o *Cerrar* diagramas obtenidos de forma *Experimental* y un panel que permite *Abrir* o *Cerrar* diagramas obtenidos de forma *Teórica*. El botón  permite intercambiar los diagramas.



(a)

(b)

Figura 4.20. Panel del Diagrama de Radiación, en escala -180° a 180° (a) y mostrando los valores (b).

Además, existe un botón *Exportar JPG* que permite exportar el o los diagramas de radiación que estén dibujados en el panel del diagrama de radiación, como una imagen JPG que posteriormente puede ser usada con otro programa.

CAPÍTULO V

SISTEMA COMPARATIVO DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN TEÓRICO Y EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestra como obtener el diagrama de radiación de una antena de forma teórico a través de programas computaciones. Además se muestra también, como obtener el diagrama de radiación experimental de una antena, a través del sistema diseñado e implementado en este trabajo. Finalmente se hace una comparación de los diagramas teóricos y experimentales de las antenas diseñadas.

5.1. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN TEÓRICOS

Existen distintas maneras de obtener el diagrama de radiación teórico de una antena. Si se conoce la expresión matemática del diagrama de radiación ($F(\theta, \phi)$) se puede usar un programa estilo MATLAB para generar el diagrama. Esto no siempre es posible pues en algunas antenas no es tan sencillo obtener la expresión matemática del diagrama, por ejemplo una antena Yagi. En este trabajo se estudian dos antenas, un dipolo de media onda y una antena Yagi. Para el dipolo se conoce la expresión del diagrama de radiación, por lo que se usará MATLAB para obtener su diagrama teórico. Para la antena Yagi, se uso un programa llamado MMANA-GAL, disponible de forma gratuita en la web en la siguiente dirección:

<http://mmhamsoft.amateur-radio.ca/pages/mmana-gal.php>

5.1.1. Usando MATLAB para obtener el diagrama de radiación teórico de un dipolo de media onda.

Para un dipolo de media onda orientado de forma horizontal, el diagrama de radiación normalizado está dado por la siguiente expresión,

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (5.1)$$

Usando MATLAB se puede determinar el diagrama de radiación para el dipolo de media onda usando el código que se muestra en la Fig.5.1. La variable *NP* representa el número total de puntos a lo largo de los 360° en los que se calculará el diagrama y la variable *paso* representa la cantidad de pasos en que se incrementaran los puntos de cálculo del diagrama. Las variables *paso* y *NP* corresponden al paso y número total de pasos del sistema diseñado. Es conveniente que se use los mismos valores, tanto para obtener el diagrama teórico, como experimental, para luego poder hacer las comparaciones entre los diagramas.

```
NP = 372;
paso = 1;

x = 0:paso:NP-1;
z = abs(cos(pi/2*cos(x*2*pi/NP))./sin(x*2*pi/NP));
polar(x*2*pi/NP,z);

y = [x; z];
fid = fopen('DipoloMO473ML.dr', 'wt');
fprintf(fid, '%.0f:%f\n', y);
fclose(fid);
```

Figura 5.1. Código en MatLab para obtener el diagrama de radiación teórico de un dipolo de media onda.

Al ejecutar el código anteriormente descrito, se dibuja el diagrama de radiación teórico como se muestra en la Fig.5.2. y se genera un archivo llamado *DipoloMO473ML.dr* que puede ser abierto por el sistema diseñado y así poder ser comparado con el diagrama de radiación experimental para un dipolo.

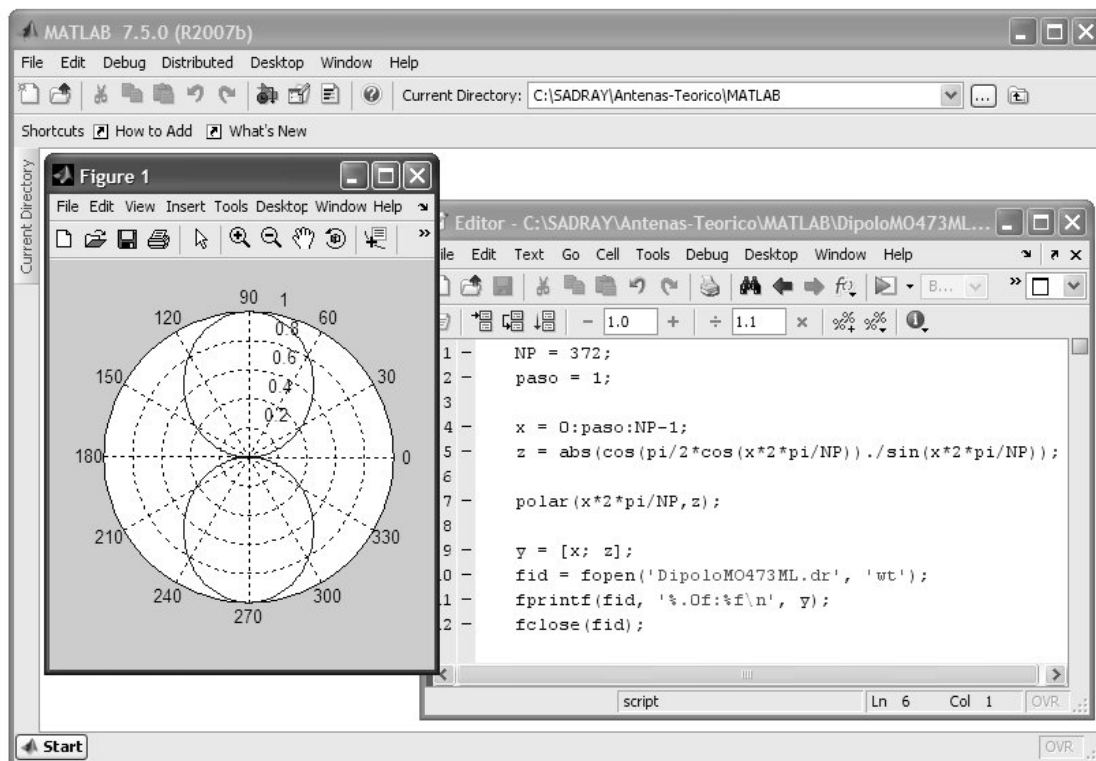


Figura 5.2. Interfaz gráfica del MatLab.

5.1.2. Usando MMANA-GAL para obtener el diagrama de radiación teórico de una antena Yagi

Para una antena Yagi no es tan sencillo obtener una expresión matemática para su diagrama de radiación, por lo que es necesario el uso de un programa computacional que permita obtenerlo. MMANA-GAL es un programa de dominio público desarrollado por Makoto Mori, Igor Gontcharenko y Alexander Schewelew, y es una herramienta para el análisis de antenas y está basado en el método de momentos. Está disponible de forma gratuita en la web para su descarga y uso con fines académicos. La interfaz gráfica del programa se muestra en la Fig.5.3. El programa tiene 4 tabuladores, que son Geometría, Vista, Cálculo y Diagrama de campo lejano.

Para calcular el diagrama, el primer paso es introducir las dimensiones de la antena en el tabulador de Geometría, y en la figura se muestran las dimensiones de la antena Yagi diseñada en este trabajo. Es importante notar que las dimensiones de los elementos de la antena están en

metros y está orientada en el plano horizontal (X,Y), por lo que las dimensiones en el eje vertical (Z) siempre son 0. Las dimensiones se especifican con las dos coordenadas en 3 dimensiones de los extremos de cada elemento (x_1, y_1, z_1) y (x_2, y_2, z_2). Las dimensiones del radio de cada uno de los elementos de la antena se especifican en milímetros. Además de las dimensiones, se debe indicar la frecuencia de operación (Frec = 473MHz) y la posición del elemento activo (Fuentes = w2c).

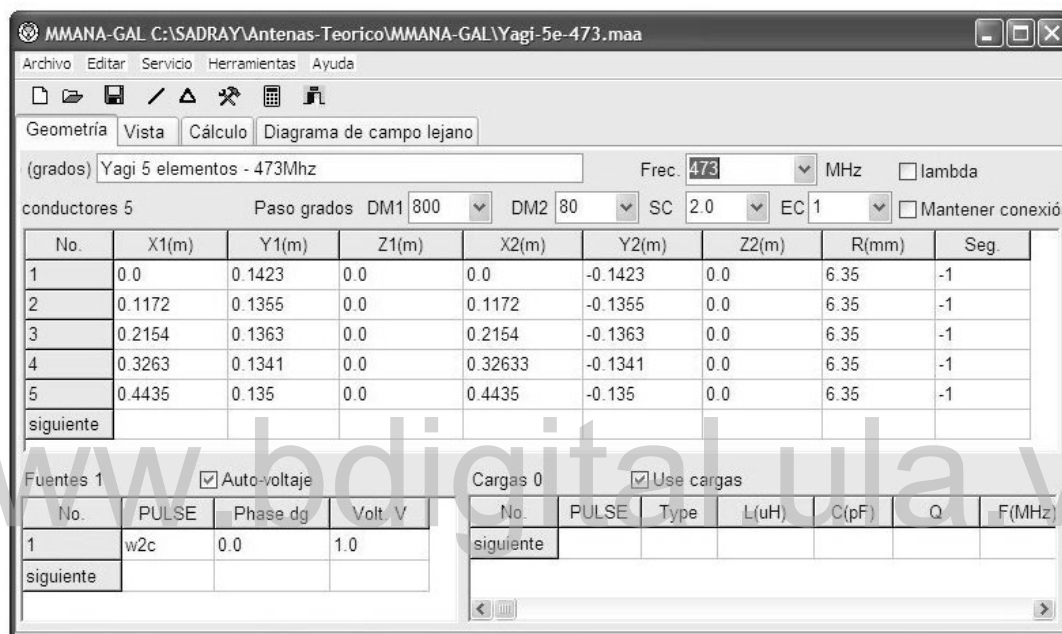


Figura 5.3. Interfaz gráfica de MMANA-GAL con la Antena Yagi.

Luego de proporcionar las dimensiones de la antena, en el tabulador Vista se puede observar de forma gráfica tales dimensiones, como se muestra en la Fig.5.4(a). Para que el programa haga el cálculo, se debe presionar el botón Calcular en el tabulador Cálculo. Finalmente se obtiene el diagrama de radiación de la antena en el tabulador de Diagrama de campo lejano, como se muestra en la Fig.5.4.(b)

Para usar los datos del diagrama de radiación en el sistema implementado, es necesario exportar la Tabla de Angulo/Ganancia (*.csv) que se encuentra en la opción Archivo del menú principal. El sistema implementado se programó para que importe archivos CSV generados por MMANA-GAL, pero se deben seleccionar adecuadamente los parámetros del archivo.

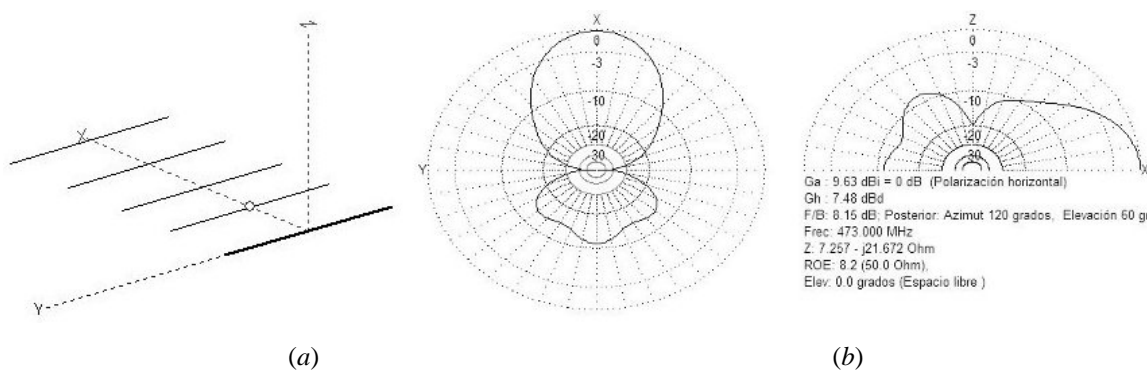


Figura 5.4. Vista y Diagrama de Radiación de la Antena Yagi.

En la Fig.5.5 se muestran los parámetros que se pueden configurar al momento de exportar el archivo CSV. El Azimut debe comenzar en 0.0° y el paso en grados debe ser 0.9677 , que corresponde a la resolución del sistema, como se mostró en la expresión (4.7) y la cantidad de pasos (372) corresponde al número total de pasos. Como se desea obtener un diagrama horizontal el Cenit se configura para iniciar en 90.0° y un solo paso, al valor de paso en grados es irrelevante pues solo se calculará para el valor 90.0° . Se debe seleccionar el directorio donde se exportará el archivo, y es conveniente que lo haga en el directorio del sistema implementado.

Angulo	Comenzar grado	Paso grados	Cantidad de pasos
Azimut	0.0	0.9677	372
Cenit	90.0	10.0	1

File path: C:\SADRAY\Antenas-Teorico\MMANA-GAL\Yagi-5e-47

Figura 5.5. Exportar datos del Diagrama de Radiación.

MMANA-GAL es un programa que tiene la capacidad de determinar el diagrama de radiación de una gran variedad de antenas, por lo que también se calculo el diagrama de radiación para el dipolo de media onda, con el mismo procedimiento usado para la antena Yagi. En la Fig.5.6 se muestra el dimensionamiento del dipolo de media onda y en la Fig.5.7 la vista y el diagrama de radiación resultante.

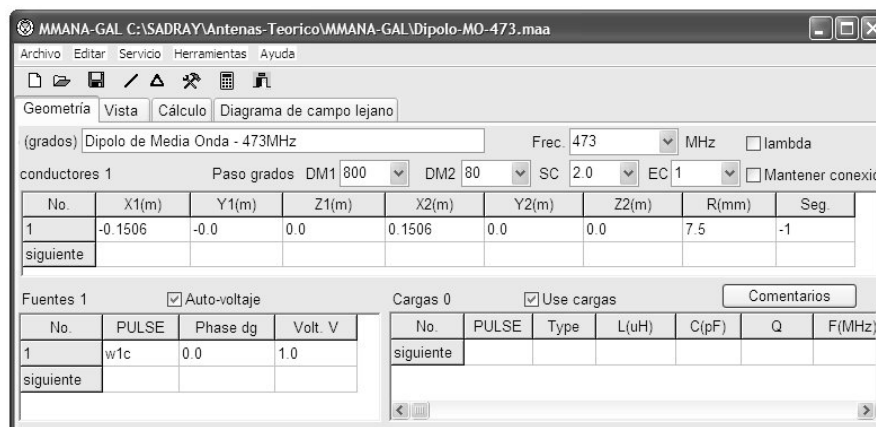


Figura 5.6. Interfaz gráfica de MMANA-GAL con el Dipolo de Media Onda.

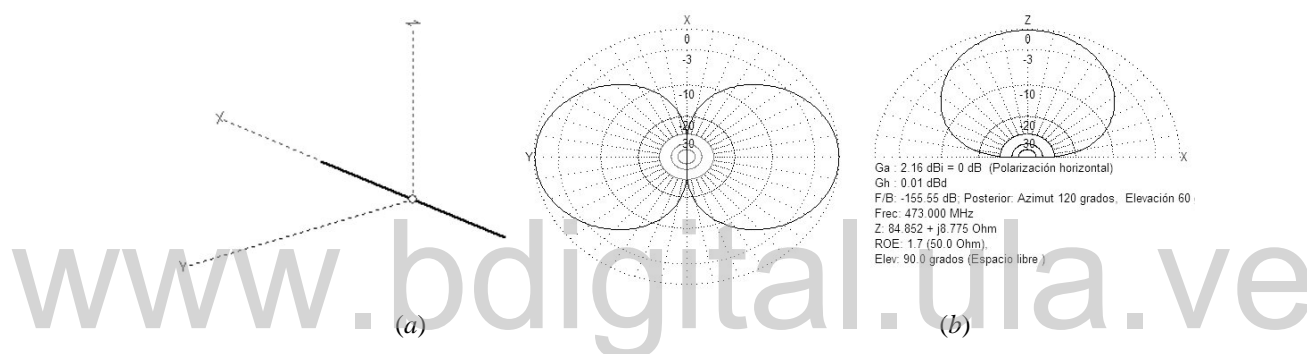


Figura 5.7. Vista y Diagrama de Radiación del Dipolo de Media Onda.

5.2. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN EXPERIMENTALES

A continuación explicaremos el procedimiento para obtener el diagrama de radiación de una antena.

5.2.1. Sistema de Transmisión

El sistema de transmisión está compuesto por una antena fuente y un transmisor y se muestra en la Fig.5.8. Se coloca la antena fuente en el soporte para tal fin y se orienta en la dirección del sistema de recepción, la antena fuente debe estar a una altura de $1.26m$ (expresión (4.5)) y se conecta a la salida RF al generador de señal. El generador de señal debe estar ajustado a la frecuencia de 473MHz y a máxima potencia.

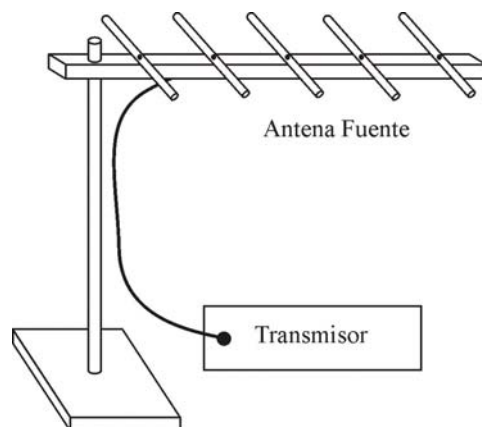


Figura 5.8. Sistema de Transmisión.

5.2.2. Sistema de Recepción

El sistema de recepción está compuesto por una antena bajo prueba y una serie de circuitos que permite el acondicionamiento y la medida de la señal incidente en la antena y luego enviar al PC los datos de la radiación para obtener el diagrama. En la Fig.5.9 se muestra el sistema de recepción. La antena bajo prueba debe estar a una altura de $1.46m$ (expresión (4.4)), y la distancia entre las antenas debe ser de $12m$ (expresión (4.4)).

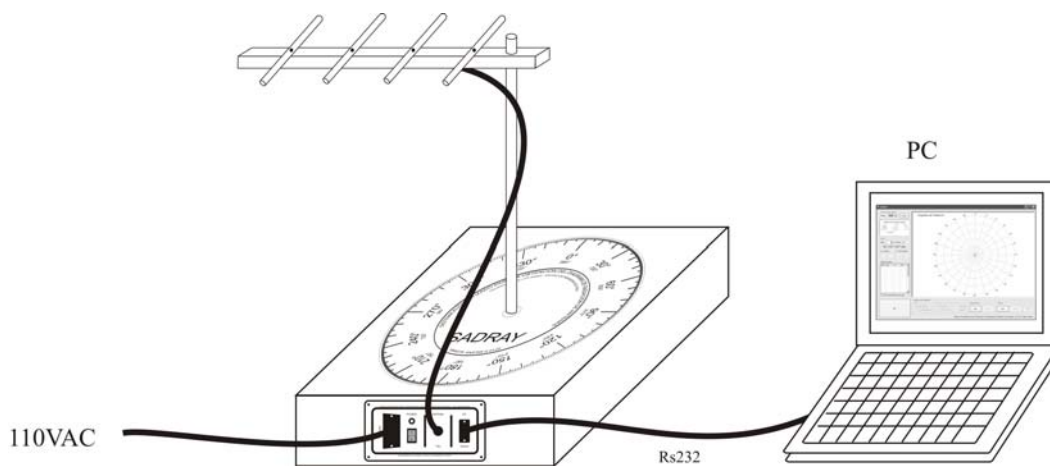




Figura 5.9. Sistema de Recepción.

El sistema de recepción cuenta con un panel trasero, mostrado en la Fig.5.9. En este panel se encuentra la conexión a:

- La fuente de alimentación de 110VAC, a través de una cable de alimentación,

- La antena bajo prueba, a través de un cable coaxial RG-59, y
- La PC, a través de un cable RS232.

Además este panel tiene un switch que permite poner en funcionamiento el sistema y un LED_POWER que indica que está alimentado. Posteriormente, se debe ajustar el sistema de recepción, que incluye, el direccionamiento de la antena en la dirección de máxima ganancia y el ajuste de la ganancia del receptor.

Para tal fin, el sistema de recepción cuenta con un panel frontal que se muestra en la Fig.5.10. Para el ajuste, el se coloca el sistema en MODO SWICHTH, y se ajusta la dirección de la antena con los botones de rotación en sentido horario  o anti-horario . Para contralar la dirección, la antena cuenta con un círculo graduado en grados en su base, mostrado en la figura, y el sistema se debe posicionar de forma que el 0° este en dirección de la antena fuente.

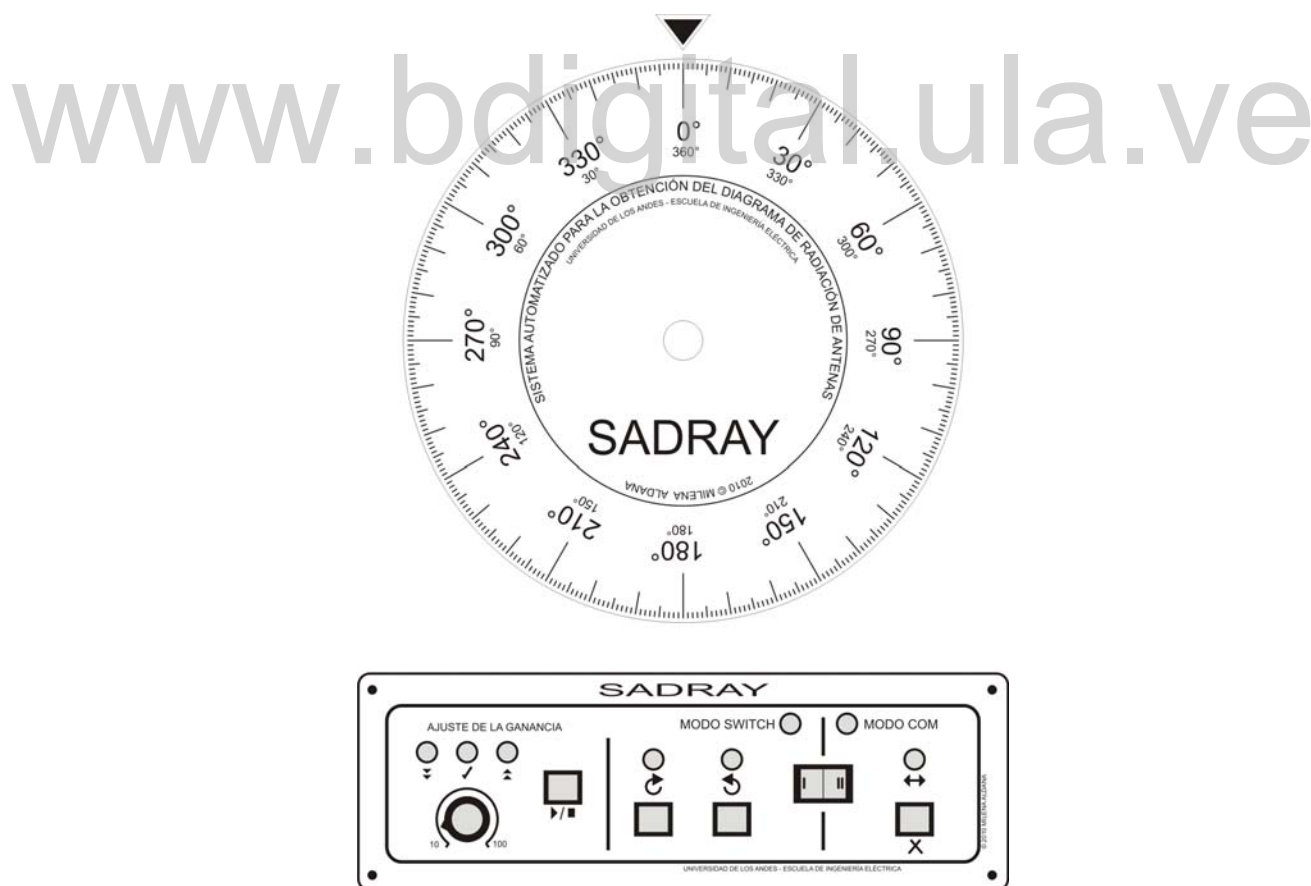


Figura 5.10. Ajustes del Sistema de Recepción.

Luego de direccionada la antena, se debe ajustar la ganancia del receptor pulsado el botón de inicio/fin ▶/■ del ajuste de ganancia. Al iniciarse este proceso, los tres LED que indican el nivel de la ganancia se encienden, se espera un segundo y se apagan. Luego se enciende el LED correspondiente al nivel de la ganancia actual, y la ganancia puede ser:

- Ganancia Muy baja ▼,
- Ganancia Adecuada ✓, o
- Ganancia Muy Alta ▲.

Para ajustar la ganancia se usa el potenciómetro. Se ajusta el potenciómetro hasta que se enciende el LED que indica que el nivel de ganancia es adecuada. Si solo el LED de ganancia muy baja está encendido se aumenta la potencia de salida del generador. Finalizado el proceso de ajuste se vuelve a presionar el botón inicio/fin ▶/■ del ajuste de ganancia.

Luego de finalizado el proceso de ajuste de la ganancia, el sistema está listo para leer los niveles de radiación y obtener el diagrama. Para esto se cambia el sistema a MODO COM. El LED de comunicación ↔ indica que se está en proceso de comunicación y si se desea cancelar la comunicación se presiona el botón de cancelar la comunicación X.

El SADRAY es el software diseñado para el PC, que permite obtener el diagrama de radiación experimental de una antena. El SADRAY se proporciona con este trabajo y puede instalarse en cualquier computador personal con Microsoft Windows XP, Vista o 7. No hace falta que tenga instalado el Visual Studio 2005 con que fue programado. Requiere muy poca memoria RAM, por lo que puede instalarse casi en cualquier PC, solo que este debe poseer un puerto de comunicación serial RS232 o disponer de una interfaz USB/RS232. Para ejecutar el SADRAY se presiona Inicio → SADRAY → SADRAY, como se muestra en la Fig.5.11.

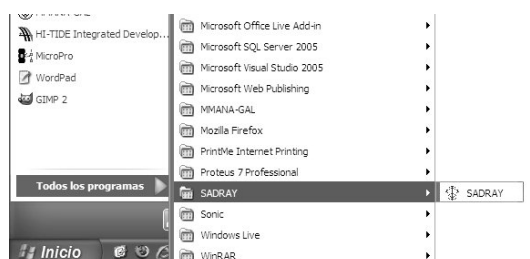


Figura 5.11. Ejecución del SADRAY.

La interfaz gráfica del SADRAY se muestra en la Fig.5.12. y esta ya fue explicada en el capítulo anterior. Debe conectar el cable RS232 antes de ejecutar el SADRAY si quiere comunicar el PC con el sistema de recepción. El SADRAY puede ser ejecutado para ver diagramas de radiación experimentales previamente guardados por el sistema o para hacer comparaciones con otros diagramas de radiación.

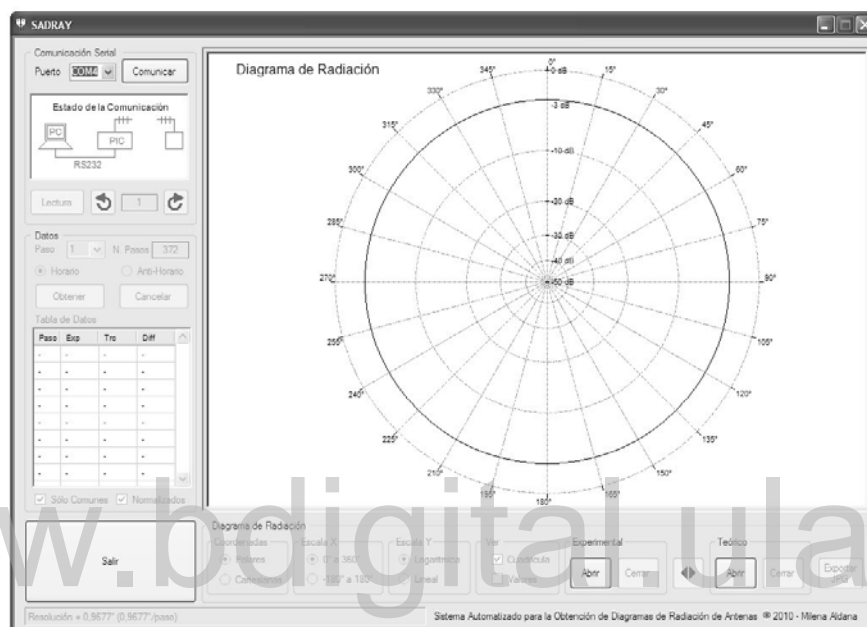


Figura 5.12. Interfaz Gráfica del SADRAY.

Para iniciar la lectura del diagrama de radiación se usa el Panel de *Comunicación Serial*, que se muestra en la Fig.5.13(a). Inicialmente se selecciona el puerto serial al cual está conectado el PIC y se presiona el botón *Comunicar* para establecer la comunicación con el sistema de recepción. En caso de que la comunicación sea exitosa se mostrará el estado de la comunicación como se encuentra en la figura. En caso de error en la comunicación se dará un mensaje que indica la posible causa del error.

A continuación se selecciona el paso con el cual se quiere obtener el diagrama de radiación en el panel de *Datos* (Fig.5.13(b)). Note que en la figura está seleccionado 12 como paso y en la *Barra de Estado* que se encuentra en la parte inferior izquierda de la interfaz se muestra la resolución en grados correspondientes al paso seleccionado, en este caso: $Resolución = 11.612^\circ (0.9677^\circ/paso)$.

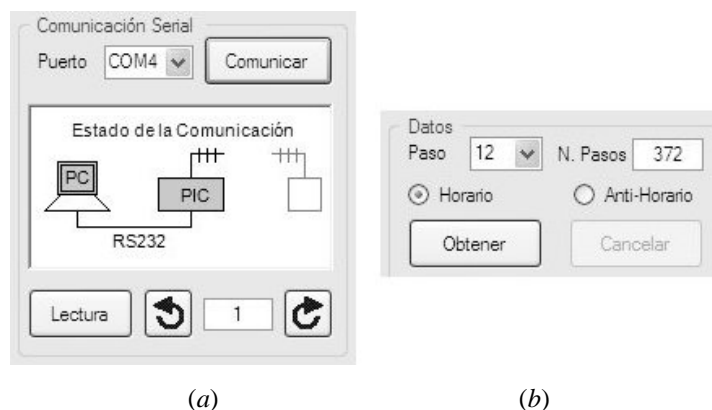


Figura 5.13. Panel de Comunicación de SADRAY.

Luego se selecciona el sentido de rotación de la antena bajo prueba, que puede ser horario o anti-horario. Se debe obtener el mismo diagrama de radiación en cualquiera de los dos sentidos de rotación, solo se da esta opción para controlar la disposición física del cable coaxial que conecta la antena con el sistema de recepción. Para iniciar la lectura se presiona el botón *Obtener* y aparece en la *Barra de Estado* las lecturas, de la forma:

$$\text{Lectura} = X.XXXv \text{ (paso/NTP)}$$

donde,

X.XXXXv = lectura en voltios realizada por el PIC,

Paso = número del paso, y

NTP = número total de pasos.

Si se desea cancelar el proceso de lectura, se puede presionar el botón *Cancelar* en el SADRAY o el botón de cancelar la comunicación **X** en el panel frontal del sistema de recepción.

Finalizado el proceso de lectura, los valores de los niveles de señal normalizados se mostraran en la *Tabla de Datos* del panel de *Datos*, como se muestra en la Fig.5.14(a). Si se desea ver los niveles de señal tal como los leyó el PIC, se deselecciona la opción *Normalizados* como se muestra en la Fig.5.14(b).

Tabla de Datos			
Paso	Exp	Trc	Diff
0	0	-	-
12	-0,5397	-	-
24	-1,8601	-	-
36	-8,2786	-	-
48	-32,361	-	-
60	-21,4796	-	-
72	-14,8597	-	-
84	-16,1027	-	-

Sólo Comunes Normalizados

Tabla de Datos			
Paso	Exp	Trc	Diff
0	0,4057	-	-
12	0,3812	-	-
24	0,3275	-	-
36	0,1564	-	-
48	0,0088	-	-
60	0,0342	-	-
72	0,0733	-	-
84	0,0635	-	-

Sólo Comunes Normalizados

(a)

(b)

Figura 5.14. Tabla de Datos del SADRAY.

Además, en el panel de Diagrama de Radiación se muestra el diagrama experimental obtenido. La Fig.5.15 muestra el diagrama de radiación experimental para la antena Yagi y el Dipolo de media onda diseñadas en este trabajo, con escala logarítmica.

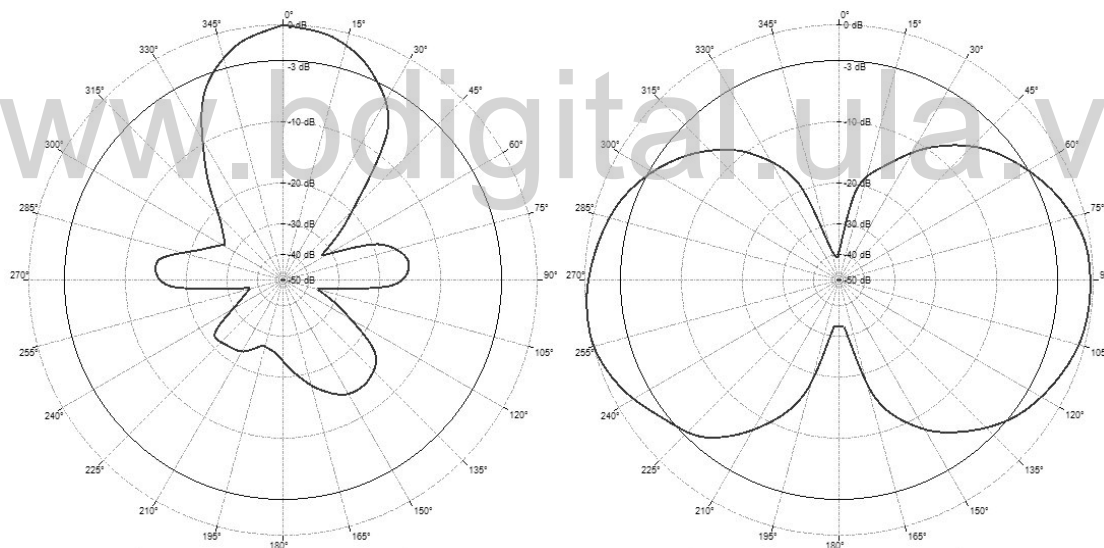


Figura 5.15. Diagrama de Radiación Experimental en escala Logarítmica.

5.3. COMPARACIÓN DE LOS DIAGRAMAS

Para realizar la comparación entre los diagramas de radiación obtenidos de forma teórica y experimental se proceden a abrir ambos diagramas de forma simultánea en SADRAY. Para tal fin existen en la interfaz gráfica de SADRAY un panel Experimental y un panel Teórico,

que permiten abrir tanto el diagrama experimental como el diagrama teórico. Al presionar el Abrir en el panel Teórico, se muestra una caja de dialogo que se muestra en la Fig.5.16. Podemos seleccionar en Tipo, en que formato se encuentra el diagrama de radiación teórico, o bien en MATLAB o MMANA-GAL.

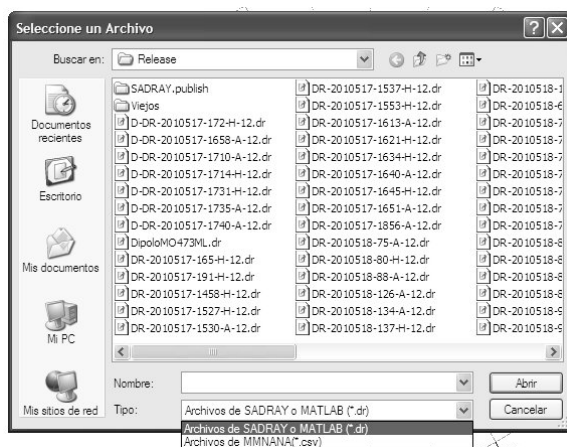


Figura 5.16. Abrir el diagrama de radiación teórico.

Luego de abierto se llena la *Tabla de Datos* del panel de *Datos* con los valores tanto del diagrama experimental como teórico, como se muestra en la Fig.5.17.

Tabla de Datos				Tabla de Datos				Tabla de Datos			
Paso	Exp	Trc	Diff	Paso	Exp	Trc	Diff	Paso	Exp	Trc	Diff
0	1,74486...	9,18332...	-	0	1,74486...	9,18332...	-	0	0	0	0
1	-	9,18332...	-	12	1,67155...	7,83429...	-	12	-1,0215...	-1,8619...	0,8404...
2	-	9,14113...	-	24	1,65200...	4,79733...	-	24	-1,2950...	-6,9323...	5,6372...
3	-	9,09913...	-	36	0,93352...	2,08449...	-	36	-12,108...	-13,872...	1,7644...
4	-	9,01571...	-	48	0,14173...	0,68865...	-	48	-32,288...	-21,034...	11,253...
5	-	8,93305...	-	60	0,00977...	0,21978...	-	60	-47,588...	-26,888...	20,699...
6	-	8,83079...	-	72	0,12707...	0,05807...	-	72	-33,108...	-32,449...	0,6585...
7	-	8,70963...	-	84	0,19550...	0,00432...	-	84	-29,723...	-40,878...	11,155...

Sólo Comunes
 Normalizados
 Sólo Comunes
 Normalizados
 Sólo Comunes
 Normalizados

Figura 5.17. Tabla de datos con valores experimentales y teóricos.

Si ambos diagramas fueron obtenidos con un distinto paso, es recomendable que este marcada la opción *Sólo Comunes*, para de esta forma mostrar solo los datos de radiación solo en el caso de pasos comunes. Estos valores están normalizados, y si se desea ver los datos en bruto, tal cual como fueron leídos por el PIC, se desmarca se la opción *Normalizados*. Finalmente se

obtiene en el panel de Diagrama de Radiación ambos diagramas. En la Fig.5.18 y se muestra la comparación de los diagramas de radiación experimental y teóricos de la antena Yagi.

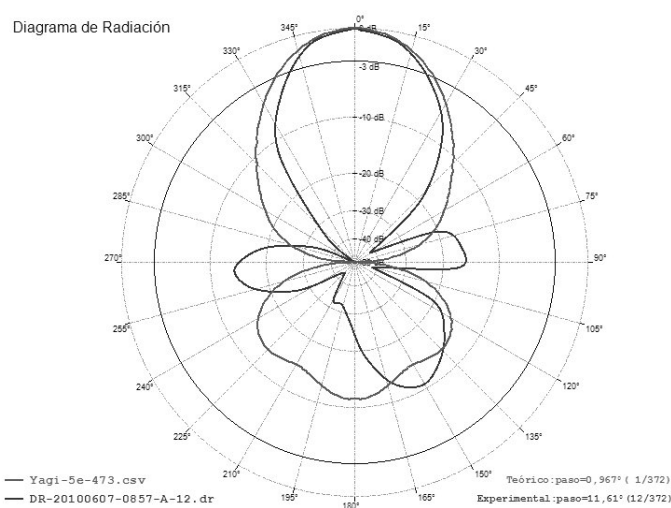


Figura 5.18. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi.

5.4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Las pruebas del sistema con las antenas diseñadas fueron en el patio que se encuentra en las adyacencias del edificio de laboratorios de la Facultad de Ingeniería en la avenida Don Tulio Febres Cordero, como se muestra en la Fig.5.19. Estas pruebas se realizaron bajo los criterios de medidas para el campo de prueba desarrollados en el Capítulo 4. Se debe considerar que los resultados de las pruebas son el producto de mediciones realizadas en un espacio libre y no en una instalación acondicionada para este tipo de medición, como lo sería realizarlas en una cámara anecoica, que permite hacer este tipo de mediciones de manera exacta y confiable. También se debe considerar que las antenas fueron diseñadas de forma artesanal.

5.4.1. Antena Yagi

En la Fig.5.21(a) se muestra el diagrama de radiación experimental obtenido para la antena Yagi. Tal diagrama corresponde a un diagrama típico de una antena Yagi, con un lóbulo principal en la dirección de máxima radiación y otros lóbulos menores. En la Fig.5.21(b) se

muestra el diagrama de radiación teórico para la antena. Se puede notar la similitudes del los diagramas, solo con una distorsión en los lóbulos menores.



Figura 5.19. Campo de Prueba.

Los diagramas de radiación de la Fig.5.21, están graficados en escala logarítmica, y en la Fig.5.22 se muestran los mismos diagramas graficados en escala lineal.

También se realizaron unas pruebas en el laboratorio de Microondas, pero debido a limitaciones de espacio las antenas están separadas una distancia de 3m, como se muestra en la Fig.5.20. Esta prueba se realizo para ver la diferencia con ambos campos de prueba.

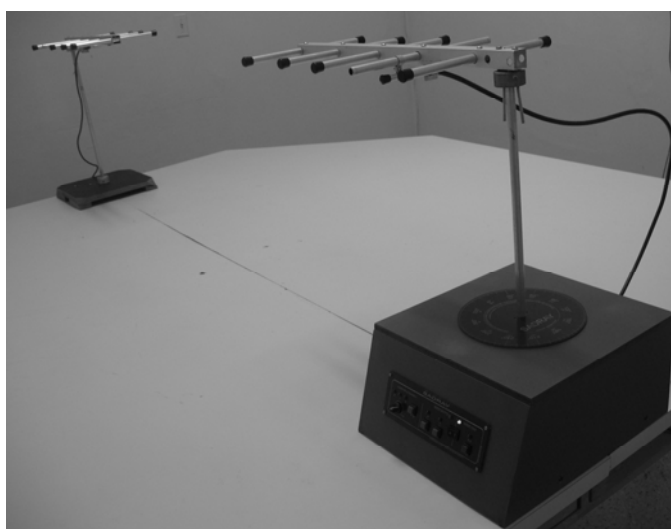


Figura 5.20. Campo de Prueba con la antena Yagi en el Laboratorio.

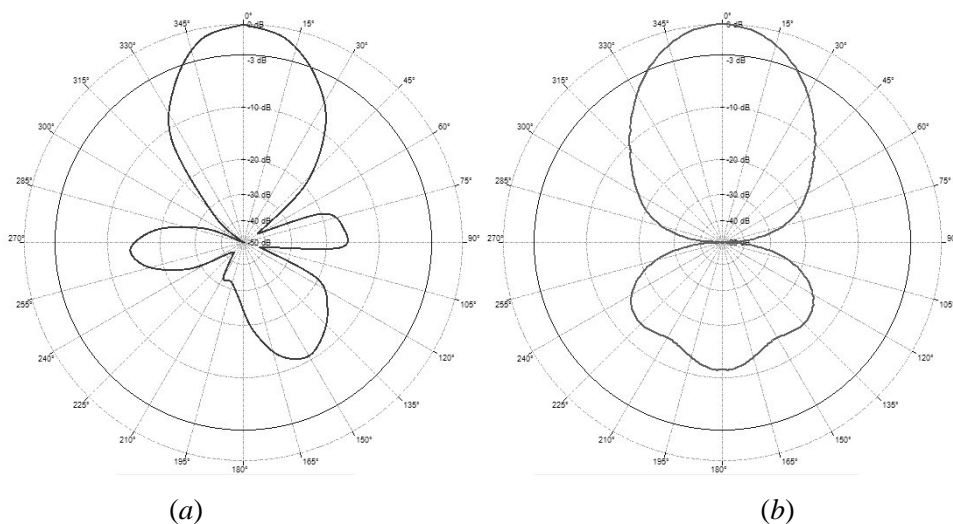


Figura 5.21. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala logarítmica.

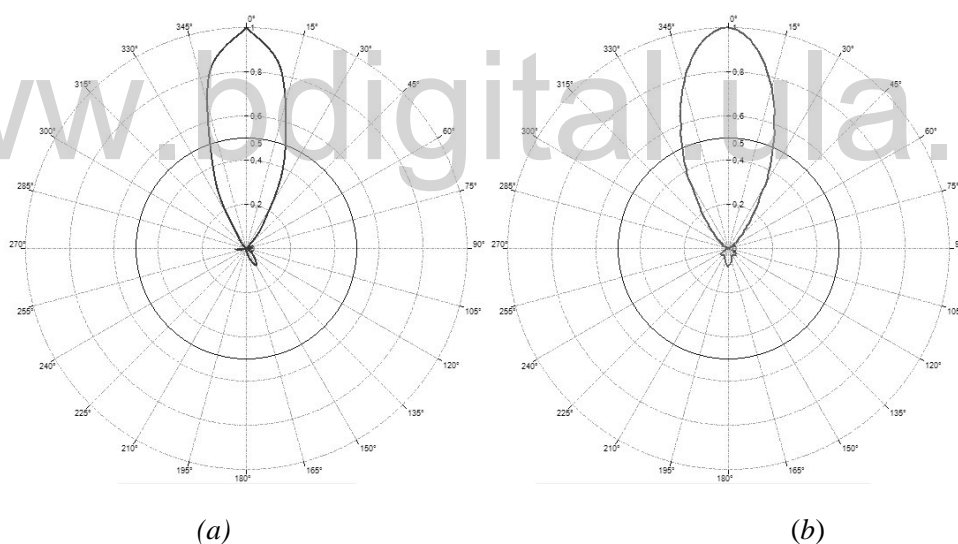


Figura 5.22. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala lineal.

En la Fig.5.23, se muestran los diagramas de radiación, en escala logarítmica, obtenidos de forma experimental en el patio (a) y en el laboratorio (b). Ambos diagramas presentan un lóbulo principal de máxima radiación, y algunos lóbulos menores. Debido a que la distancia de separación entre las antenas es menor en el laboratorio, a la antena le incide mayor potencia de radiación por lo que el nivel de menor radiación es de -35dB en comparación de los -50dB

que se obtuvieron en el patio. En la Fig.5.24 se muestran ambos diagramas en escala lineal. Los diagramas de radiación del laboratorio se obtuvieron en el generador de señal a mínima ganancia.

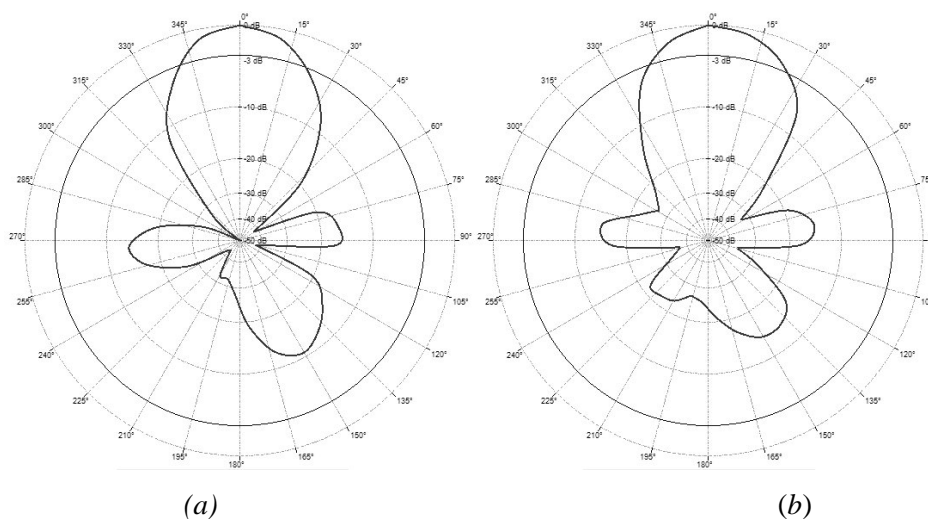


Figura 5.23. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala logarítmica.

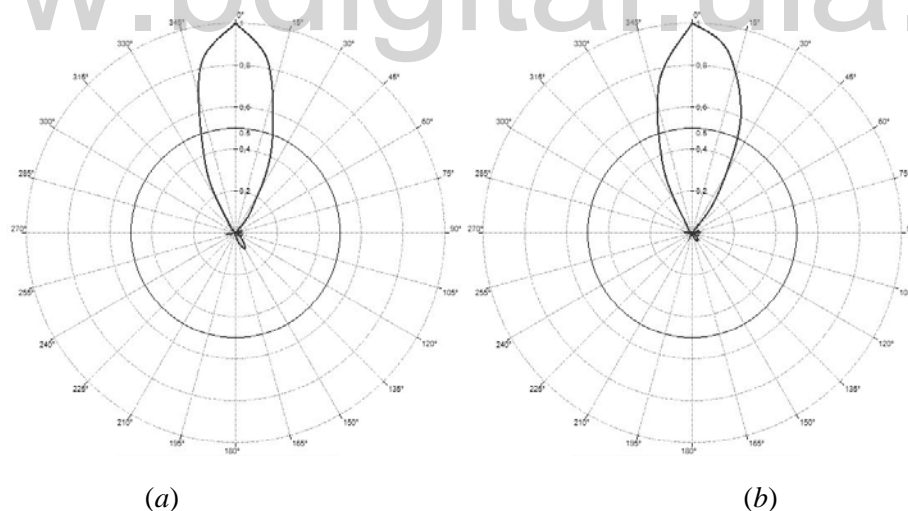


Figura 5.24. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala lineal.

5.4.2. Dipolo de Media Onda

En la Fig.5.25 se muestra el diagrama de radiación experimental obtenido en el patio (a) y el diagrama de radiación teórico (b) del dipolo de media onda. Ambos diagramas son similares y corresponden a un

diagrama de radiación típico para un dipolo de media onda. En los diagrama presentan dos lóbulos principales en la dirección de 90° y 270° y con nulos en la dirección de 0° y 180° .

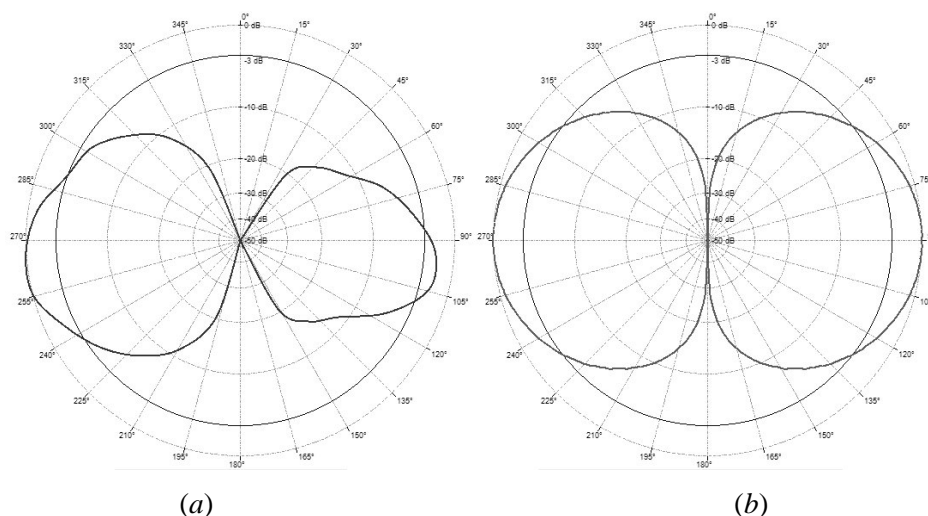


Figura 5.25. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala logarítmica.

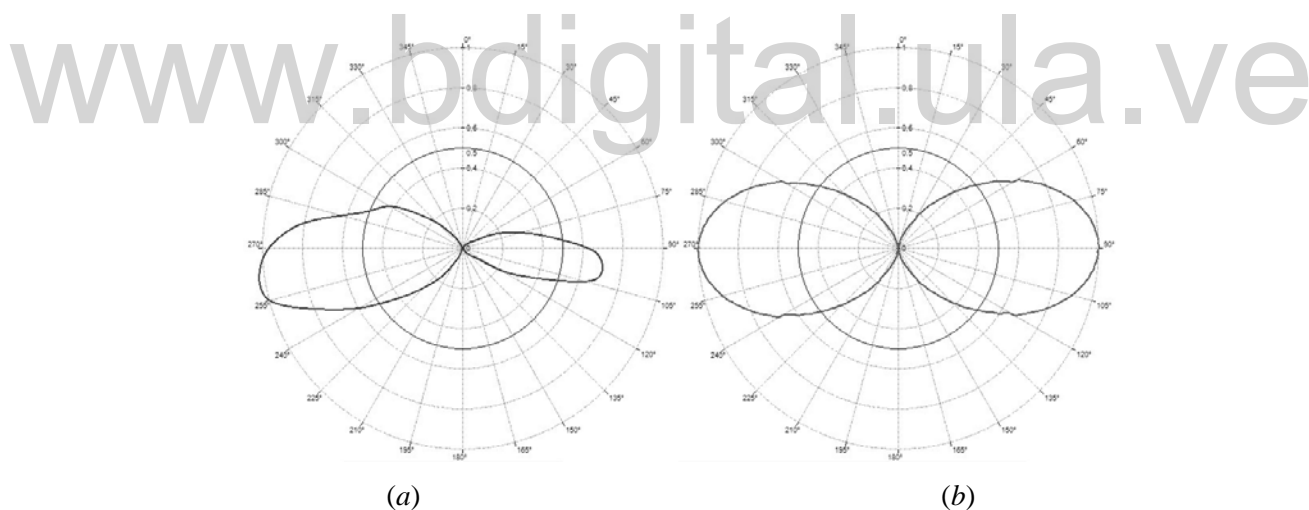


Figura 5.26. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y Teórico, en escala lineal.

Para el dipolo también se realizaron las pruebas en el laboratorio. En la Fig.5.27 se muestran los diagramas de radiación obtenidos en forma experimental del dipolo de media onda, en el patio (a) y el laboratorio (b). Ambos diagramas son similares, de la misma forma que con la antena Yagi. Para el diagrama obtenido en el laboratorio las mediciones tenían mayor potencia. Se observa en el diagrama obtenido en el patio (a), entre 345° y 15° la potencia leída

fue casi 0, a diferencia del diagrama de radiación obtenido en el laboratorio (b), en donde se continua obteniendo un nivel bajo de potencia en ese rango. Por esto suponemos que la potencia del transmisor es un poco baja para este experimento en el patio, el cual fue realizado con el generador en máxima potencia.

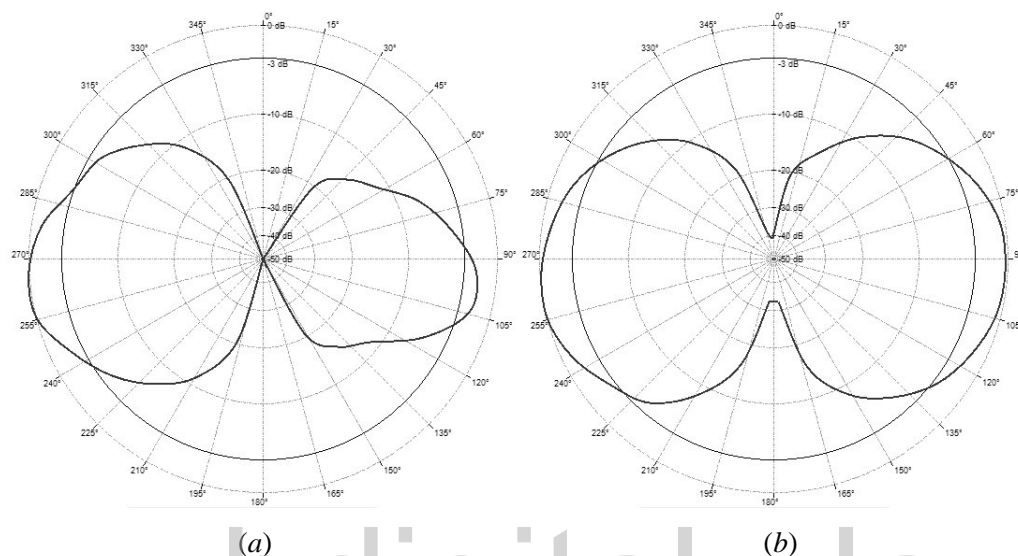


Figura 5.27. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala logarítmica.

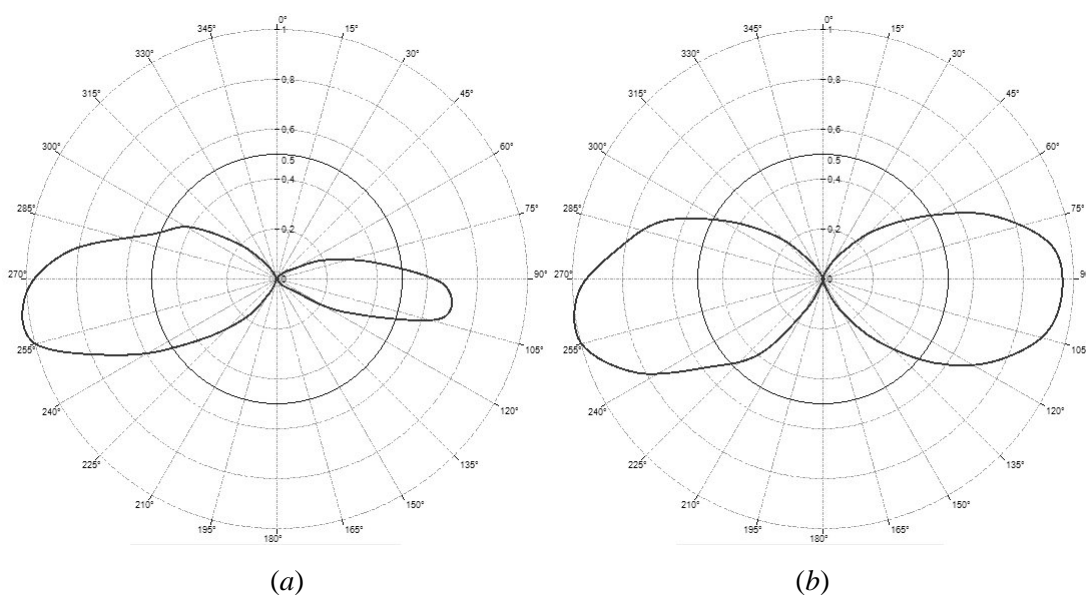


Figura 5.28. Comparación de los diagrama de radiación para el Dipolo de Media Onda, Experimental en espacio libre y laboratorio, en escala lineal.

5.4.3. Diagrama de Radiación en Modo Transmisión

Para validar experimentalmente el principio de reciprocidad, se obtuvo el diagrama de radiación de la antena Yagi en modo transmisión, o sea haciendo rotar la antena transmisora. Esto fue realizado en el laboratorio y en la Fig.5.29 se muestran los diagramas experimentales obtenidos en modo recepción (a) y en modo transmisión (b).

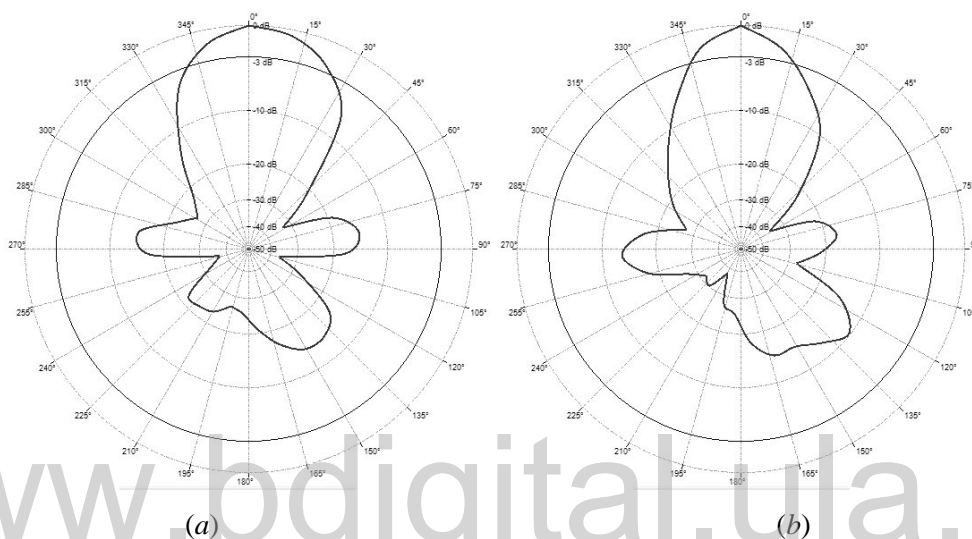


Figura 5.29. Comparación de los diagrama de radiación para la antena Yagi, en modo Recepción y Transmisión.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han logrado todos los objetivos planteados de forma satisfactoria, y se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

Es posible diseñar e implementar un sistema automatizado para obtener el diagrama de radiación de una antena, y en este trabajo se entrega una implementación cien por ciento funcional y totalmente comprobado su funcionamiento con un dipolo de media onda y una antena Yagi, ambos trabajando a una frecuencia de 473MHz. Aun cuando las pruebas se realizaron con tales antenas, el sistema funcionará con cualquier tipo de antena.

Aunque no se dispone de una cámara anecoica, se pudo obtener de forma muy aproximada el diagrama de radiación de una antena, utilizado el sistema diseñado para tal fin en este trabajo.

Se comprobó además que obtener el diagrama de radiación de una antena trabajando como transmisora es similar a obtenerlo cuando la antena trabaja como receptora, lo cual corrobora el principio de reciprocidad en forma experimental.

RECOMENDACIONES

El sistema producto final de este trabajo esta cien por ciento operativo y comprobado su correcto funcionamiento, aun así se pueden implementar mejoras y ampliar funcionalidades, entre las cuales están:

Usar una frecuencia de operación más elevada, por ejemplo 10GHz. Esto permitiría reducir las dimensiones tanto de las antenas utilizadas así como del campo de prueba. Contar con antenas mas pequeñas ayudaría a reducir las vibraciones producidas durante la rotación y contar con un campo de prueba mas pequeño permitiría realizar las pruebas en un ambiente de laboratorio.

Implementar la técnica de los micropasos para rotar la antena a través del motor de pasos. Esto permitiría también a reducir las vibraciones que se producen al rotar la antena.

La distancia máxima entre el sistema de recepción y el PC es de 15 metros, definidos por el protocolo de comunicación RS232. En caso de ser necesaria una distancia mayor, se puede implementar la comunicación a través del protocolo RS485, que permite una distancia hasta de 1.200 metros.

Controlar la ganancia del amplificador de instrumentación de forma automatizada bien sea desde el PIC o desde el PC, lo que permite reducir las interferencias causadas por el usuario del sistema al momento de establecer la ganancia del amplificador.

Implementar mecanismo que permita determinar la posición de la antena, para de esta forma establecer de forma automática la posición inicial de la antena antes de iniciar el proceso de medida.

REFERENCIAS

Albornoz, J. M. (1995). *Mediciones de Parámetros Característicos en Antenas*. Trabajo de Ascenso a la categoría de Profesor Asistente. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela.

Barboza, Z. (1991). *Antenas y Propagación*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela.

Balanis, C. A. (1997). *Antenna Theory Analysis and Design*. 2da. Edición. John Wiley & Sons. New York, USA.

Briceño, J. E. (2004). *Principios de las Comunicaciones*. 4ta. Edición. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela.

Cardama, A., Jofre, Ll., Rius, J. M., Romeu, J. y Blanch, S. (2000). *Antenas*. Alfa Omega Editor. México.

Esteves, L. (1980). *Antenas i Teoria Básica e Aplicações*. McGraw Hill do Brasil. São Paulo.

IEEE. (1979). *Standard Test Procedures for Antennas*. ANSI/IEEE Std.149-1979. Wiley-Interscience. USA.

Kraus, J. (1988). *Antennas*. McGraw-Hill. USA.

Lucas-Nülle Lehr- und Meßgeräte GMBH. (2008). *UniTrain-I de tecnología de alta frecuencia y de antenas*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

http://www.lucas-nuelle.de/929/Productos/Sistemas_de_formación/Tecnología_de_información_y_telecomunicaciones/tan.htm

Marteens, I. (2008). *Intuitive C#*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

http://www.marteens.com/pdfs/csharp_intsight.pdf

Maxim. (2006) *Low +5V-Powered, Multichannel RS-232Drivers/Receivers*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>

Microsoft. (2005). *MSDN. Microsof Visual Studio 2005*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

<http://www.microsoft.com/spanish/msdn/vs2005/default.aspx>

Microsoft. (2008). *MSDN. Conceptos del Lenguaje Visual C#*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

[http://msdn.microsoft.com/es-es/library/kx37x362\(VS.80\).aspx](http://msdn.microsoft.com/es-es/library/kx37x362(VS.80).aspx)

Mircrochip. (2003). *PIC16F87XA Data Sheet. 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>

Pietrosemoli, E. (1995). *Guía de Estudios de Comunicaciones*. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela.

The Code Project. (2008). *Your Development Resource*. Consultado en Septiembre de 2008, desde:

<http://www.codeproject.com>

Tomasi W. (1996). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. 2da. Edición. Prentice Hall. México

APÉNDICES

A. PROGRAMA DEL PIC

```
#include <htc.h>

//Definiciones
#define INT8          unsigned char
#define INT16         unsigned int

#define MODO_SWITCH  0
#define MODO_COM      1

#define NUM_LECT      20
#define RETARDO_LECT  50 //ms
#define RETARDO_PASO  100 //ms

#define CAL           4
#define DER           2
#define IZQ           1

#define OK            0
#define ERROR        1

#define MSG_STATUS    0x80 // 1000 0000 Bit Status
#define MSG_DIR       0x40 // 0100 0000 Bit Direccion
#define MSG_DATOS     0x3F // 0011 1111 Bit paso      (0-63)
#define MSG_OK        0xFF // 1111 1111

#define XTAL_FREQ     4000000
#define delay_us(x)   { INT8 _dcnt; _dcnt = (x)/((12000000)/(XTAL_FREQ))|1; \
                       while(--_dcnt != 0) continue; }

#define SPBRG_RS232   26 // Equivale a 9600bps

//Entradas
#define SW_MODO       RC4
#define BTN_CANCEL    RB6
#define BTN_DER       RB5
#define BTN_IZQ       RB4
#define BTN_CAL       RC5

//Salidas
#define LED_DER       RB0
#define LED_IZQ       RB1
#define LED_COM       RB2
#define LED_MOD_SW    RA1
#define LED_MOD_COM   RA2
#define LED_GMB       RA3
#define LED_GOK       RB7
#define LED_GMA       RA5

char MOTOR = 0x03;

//Funciones
void delay_ms(INT16);
void enviar_datos(INT16);
INT8 mover(INT8, INT16, INT8);
void rs232_putch(INT8);
INT8 rs232_getch(void);
```



```

// Programa Principal
void main(void)
{
    // Variables de Programa
    INT8 orden;
    INT8 resp_mover;
    INT8 dir;
    INT8 n_pasos;
    INT16 i;
    INT16 ResAD;

    // Inicializacion
    ADCON0 = 0x01;
    ADCON1 = 0x8E;

    TRISA = 0x01;
    TRISB = 0x70;
    TRISC = 0xB0;

    INTCON = 0;
    SPBRG = SPBRG_RS232;
    RCSTA = 0x90;
    TXSTA = 0x24;

    PORTC = MOTOR;
    LED_MOD_SW = 1; LED_MOD_COM = 1; LED_COM = 1; LED_DER = 1;
    LED_IZQ = 1; LED_GMB = 1; LED_GOK = 1; LED_GMA = 1;
    delay_ms(1000);
    LED_MOD_SW = 0; LED_MOD_COM = 0; LED_COM = 0; LED_DER = 0;
    LED_IZQ = 0; LED_GMB = 0; LED_GOK = 0; LED_GMA = 0;

    // Bucle Principal
    while (1)
    {
        if (SW_MODO==MODO_SWITCH)
        {
            LED_MOD_SW = 1; // Enciende el LED_MOD_SW
            LED_MOD_COM = 0; // Apaga el LED_MOD_COM
            SPEN = 0; // Desabilita el Puerto Serial
            // Lectura de los botones BTN_DER, BTN_IZQ y BTN_CAL
            do {
                orden = DER * !BTN_DER + IZQ * !BTN_IZQ + CAL * !BTN_CAL;
            } while((orden==0)&&(SW_MODO==MODO_SWITCH));
            if(SW_MODO==MODO_SWITCH) // Aun MODO_SWITCH
            {
                if(orden==DER) // Presionado BTN_DER
                {
                    LED_DER = 1; // Enciende el LED_DER
                    mover(DER,1,MODO_SWITCH); // Rota a la derecha 1 paso
                    delay_ms(RETARDO_PASO); // Retardo paso
                    LED_DER = 0; // Apaga el LED_DER
                }
                else if(orden==IZQ) // Presionado BTN_IZQ
                {
                    LED_IZQ = 1; // Enciende el LED_IZQ
                    mover(IZQ,1,MODO_SWITCH); // Rota a la izquierda 1 paso
                    delay_ms(RETARDO_PASO); // Retardo paso
                    LED_IZQ = 0; // Apaga el LED_IZQ
                }
                else // Presionado BTN_CAL
                {
                    // Enciende LED_GMB, LED_GOK, LED_GMA
                    LED_GMB = 1; LED_GOK = 1; LED_GMA = 1;
                    delay_ms(1000); // Espera 1s
                    // Apaga LED_GMB, LED_GOK, LED_GMA
                    LED_GMB = 0; LED_GOK = 0; LED_GMA = 0;
                    do
                    {
                        ResAD = 0;
                        // Lee NUM_LLECT veces la Ganancia
                        for(i = 0; i < NUM_LLECT/2; i++)
                        {
                            ADGO = 1; // Inicia la conersion A/D
                            while(ADGO); // Espera que termina la conversión
                            ResAD += ADRESH << 8 | ADRESL; // Aculuma las lecturas
                            delay_ms(RETARDO_LLECT); // Retardo entre lecturas
                        }
                        ResAD = ResAD / NUM_LLECT; // Promedia las lecturas
                        ResAD = ADRESH << 8 | ADRESL; // Lee Valor de conv A/D
                        if (ResAD > 900) // Valor > 90% Max ResAD
                        {
                            // Ganacia Muy Alta

```



```

INT8 mover(INT8 dir, INT16 pasos, INT8 modo)
{
    INT16 i;
    for(i=0;i<pasos;i++)
    {
        if(dir==DER)
        {
            switch(MOTOR)
            {
                case 0x03: MOTOR = 0x06; break;
                case 0x06: MOTOR = 0x0C; break;
                case 0x0C: MOTOR = 0x09; break;
                case 0x09: MOTOR = 0x03; break;
            }
        }
        else // (dir==IZQ)
        {
            switch(MOTOR)
            {
                case 0x03: MOTOR = 0x09; break;
                case 0x06: MOTOR = 0x03; break;
                case 0x0C: MOTOR = 0x06; break;
                case 0x09: MOTOR = 0x0C; break;
            }
        }
        if((SW_MODO==modo)&&(BTN_CANCEL!=OK))
        {
            PORTC = MOTOR;
            delay_ms(RETARDO_PASO);
        }
        else return ERROR;
    }
    return OK;
}

void enviar_datos(INT16 ResAD)
{
    if(ResAD>999)
    {
        rs232_putch('1'); ResAD = ResAD - 1000;
    }
    else
        rs232_putch('0');

    if(ResAD>99)
    {
        rs232_putch('0' + ResAD/100); ResAD = ResAD - ResAD/100 * 100;
    }
    else
        rs232_putch('0');

    if(ResAD>9)
    {
        rs232_putch('0' + ResAD/10); ResAD = ResAD - ResAD/10 * 10;
    }
    else
        rs232_putch('0');
    rs232_putch('0' + ResAD);
}

void rs232_putch(INT8 byte)
{
    while(!TXIF) continue;
    TXREG = byte;
}

INT8 rs232_getch(void)
{
    while(!RCIF)
        if (SW_MODO!=MODO_COM)return MSG_STATUS;
    return RCREG;
}

void delay_ms(INT16 cnt)
{
    INT8 i;
    do {
        i = 4;
        do { delay_us(250);
            } while(--i);
    } while(--cnt);
}

```