

**DESARROLLO DE PROTOTIPO PARA GENERAR DIAGRAMAS DE
RADIACIÓN DE UNA ANTENA YAGI A UNA FRECUENCIA DE 9.4 GHz**

Autor:

NELSON SOSA MACMAHON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2009

**DESARROLLO DE PROTOTIPO PARA GENERAR DIAGRAMAS DE
RADIACIÓN DE UNA ANTENA YAGI A UNA FRECUENCIA DE 9.4 GHz**

NELSON SOSA MACMAHON

Trabajo de grado

Director:

Ph.D. ARTURO PLATA GOMEZ

Codirector:

Ph.D. MARIA DEL CARMEN LASPRILLA

MsC. JOSE DE JESUS RUGELES URIBE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2009

Dedicado inmensamente a la persona que más respeto y admiro en la vida, mi mamá, Nidia Macmahon. Gracias por estar siempre en cada momento de dificultad y alegría, por su entrega incondicional en mi desarrollo integro con persona de bien en la sociedad, sus consejos y brindarme todas las garantías de estar en el lugar que me encuentro.

A mis hermanos Roldan, Ronald y Carlos Andrés por compartir y disfrutar juntos nuestros sueños en cada momento de nuestras vidas.

A todas las personas que me estuvieron acompañando en todo este tiempo de dedicación y empeño, motivándome para que día a día siga alcanzando mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ph.D Arturo Plata Gómez, por su calidez humana, su entrega como investigador, dedicación y atención sobre mi proceso de formación académica y desarrollo de la tesis. A Alexandra Plata Planidina por ser una gran fortaleza para mí en esta instancia de la vida, por su motivación, colaboración constante, y sus excelentes consejos siendo mi mayor fuente de inspiración.

A la Ph.D María Del Carmen, por ser mi codirectora, por brindarme de igual forma la disponibilidad de las herramientas necesarias para llevar a cabo el proyecto de principio a fin. Gracias a todos los integrantes del grupo de investigación GOTS en el cual estaba vinculado.

A los laboratorista Yebrail, Abelardo y Orlando por su atención y colaboración con el préstamo de los laboratorios avanzados de física de la escuela de física, durante largas jornadas de trabajo.

De igual manera a mis compañeros que permanecieron muy cercanos en este proceso y que me brindaron sus ideas, aportando significativamente a la obtención de muy buenos resultados.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	18
1.1 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	18
1.1.1 Características de las ondas electromagnéticas	18
1.1.2 Microondas	19
1.2 ANTENAS	20
1.2.1 Teoría de radiación	20
▪ Ecuación de onda	22
▪ Solución integral para los potenciales retardados	25
▪ Soluciones generales de los campos	28
▪ Aproximaciones a grandes distancia para los campos radiados	29
▪ Vector de radiación	32
<i>Interpretación como transformada de Fourier</i>	33
▪ Regiones de Fresnel y Fraunhofer	34
▪ Ante cilíndrica	36
<i>Dipolo $\lambda/2$</i>	39
<i>Dipolo corto</i>	39
1.2.2 Parámetros de las antenas	41
▪ Patrón de radiación	41
▪ Densidad de potencia radiada	42
▪ Directividad	42
▪ Ganancia	43
▪ Polarización	44
▪ Impedancia	45
▪ Adaptación	46

▪ Área y longitud efectivas	47
1.2.3 Alimentación de agrupaciones	47
1.2.4 Agrupaciones con elementos parásitos	49
<i>Antena YAGI</i>	50
2. SISTEMA DE ANTENAS EMISOR-RECEPTOR	52
2.1 <i>Descripción de las etapas implementadas</i>	52
2.1.1 Etapa de emisión	53
Fuente de alimentación GUNN	53
<i>Descripción</i>	56
Antena emisora	59
2.1.2 Etapa de recepción	61
Antena receptora	61
Descripción	63
<i>Motor paso a paso unipolar</i>	64
<i>Comunicación Serial</i>	66
▪ Tipos de comunicación serial	66
▪ Norma RS-32	67
2.1.3 Control software y hardware	68
<i>Controlador de posicionamiento de la antena YAGI</i>	69
<i>Control electrónico para el posicionamiento de la antena receptora</i>	69
<i>Especificaciones de los elementos del circuito</i>	72
▪ Microcontrolador PIC16F873A	72
▪ ULN2803A	73
▪ Manejador RS-232	74
<i>Descripción de la interfaz gráfica GUIDE en MATLAB</i>	75
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	78

4. RESULTADO EXPERIMENTAL	84
5. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	92
6. RECOMENDACIONES	94
7. BIBLIOGRAFÍA	95
8. ANEXOS A	97

Índice de figuras

Figura 1 .Comportamiento del campo electromagnético	18
Figura 2 .Representación del campo cercano y campo lejano de radiación de una antena.....	34
Figura 3 .Antena cilíndrica.....	37
Figura 4. Patrón de radiación E y H.....	41
Figura 5. Agrupaciones con un elemento activo y uno parásito	50
Figura 6. Elementos de la antena YAGI.....	52
Figura 7. Diagrama de bloques general.....	53
Figura 8 .Fuente de alimentación GUNN.....	54
Figura 9. Oscilador GUNN	56
Figura 10 .Componentes del oscilador Gunn.....	57
Figura 11. Circuito de c.c. del oscilador Gunn	58
Figura 12 .Tipos de Bocinas	60
Figura 13 .Configuraciones de la antena YAGI	62
Figura 14 .Soporte de la antena YAGI	63
Figura 15 .Circuito de conexión Motor Paso a Paso.....	65
Figura 16 .Configuración de pines del puerto serial.....	66
Figura 17. Esquemático del circuito.....	71
Figura 18. Configuración de pines del microcontrolador PIC16F873A.....	72
Figura 19 .Configuración de conexión de pines del integrado ULN2803A	73
Figura 20 .Configuración del transistor Darlington en el integrado ULN2803A.....	73
Figura 21. Configuración de pines de integrado MAX232	74
Figura 22 .Plano H.....	85
Figura 23 Plano E	86
Figura 24 .Patrón de energía tridimensional	86
Figura 25. Plano H.....	87
Figura 26. Plano E	88
Figura 27. Patrón de energía tridimensional	89
Figura 28 .Plano H.....	90
Figura 29. Plano E	91
Figura 30 Patrón de energía tridimensional	91

Índice de tablas

Tabla 1. Bandas de frecuencia en microondas.....	20
Tabla 2. Parámetros de dipolos de diferentes longitudes	40
Tabla 3. Datos técnicos de la fuente de alimentación GUNN	55
Tabla 4. Datos técnicos del oscilador Gunn.....	58
Tabla 5. Datos técnicos de la antena emisora.....	61
Tabla 6. Datos técnicos del soporte de la antena YAGI.....	64
Tabla 7. Especificaciones del motor.....	65

Índice de imágenes

Imagen 1. Antena emisora	59
Imagen 2 .Antena receptora.....	62
Imagen 3. Ventana de presentación de la interfaz grafica.....	76
Imagen 4 .Graficas de los patrones de radiación de los planos E, H y 3D.....	77
Imagen 5. Implementación de la base rotatoria.....	78
Imagen 6 .Cámara anecoica	79
Imagen 7. Montaje experimental.....	82
Imagen 8 . Montaje experimental.....	83

RESUMEN

Título:

DESARROLLO DE PROTOTIPO PARA GENERAR DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA YAGI A UNA FRECUENCIA DE 9.4 GHZ.

Autor:

Nelson Sosa Macmahon

Palabras claves:

Antena YAGI, patrón de radiación, frecuencias microondas.

Descripción:

El diagrama de radiación de una antena es la representación gráfica de las características de radiación en función de la dirección angular. Los diagramas de radiación se trabajan en el sistema de coordenadas esféricas, debido a su simplicidad matemática.

La antena Yagi, es una configuración de elementos parásitos con referencia a un elemento activo, el cual se encarga de transmitir y/o recibir intensidades de energía con respecto a la posición espacial de su elemento activo. Este tipo de antenas se caracterizan por ser muy directivas, teniendo en cuenta la distribución de energía que se puede concentrar con respecto a sus elementos.

Partiendo de esta característica fundamental de las antenas, como lo es el patrón de radiación. Se implementó un sistema automático que permite determinar los diagramas de radiación de energía que se encuentran en los planos eléctrico y magnético de una antena Yagi que trabaja en la frecuencia de microondas de 9.4GHz. Esto se describe por medio de una interfaz gráfica desarrollada en MatlaB, obteniendo dos graficas, donde cada una de estas representan los patrones de radiación en tiempo real en los diferentes planos y de igual forma determinar el patrón de radiación tridimensional de cada una de las configuraciones que se forman con la antena Yagi.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Arturo Plata Gómez.

Codirectores: María Del Carmen LASprilla y José De Jesús Rugeles.

ABSTRACT

Title:

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE TO GENERATE RADIATION PATTERNS OF AN ANTENNA YAGI OPERATING AT FREQUENCY OF 9.4 GHz.

Author:

Nelson Sosa Macmahon

Key words:

Antenna YAGI, radiation pattern, microwaves frequency.

Description:

The radiation pattern of an antenna is the graphical representation of the characteristics of radiation based on the angular direction. The radiation pattern works in the spherical coordinate system, due to their mathematical simplicity. The antenna Yagi is a configuration of parasitic elements in reference to an active element, which is in charge to transmit and/or to receive intensities of energy with respect to the space position of its active element. This type of antenna is characterized for being very directive, considering the distribution of energy that can be concentrated with respect to its elements.

Starting off of this fundamental characteristic of the antennas, as it is the radiation pattern, an automatic system was implemented that allows to determine the radiation patterns of energy which are in the electrical and magnetic planes of an antenna Yagi that operates at microwaves frequency of 9.4GHz. This is described by means of a graphical interface developed in MatlaB, obtaining two graphics, where each one of these represents the radiation patterns in real time in the different planes and similarly to determine the three-dimensional radiation pattern of each one of the configurations that form with the antenna Yagi.

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineerings. Department of Electrical, Electronic Engineerings and of Telecommunications. Supervisor: Arturo Plata Gómez.
Co-supervisor: María Del Carmen LASprilla y José De Jesús Rugeles.

INTRODUCCIÓN

La teoría de las antenas, formulada por James Clerk Maxwell, revolucionó los sistemas de comunicación siendo las antenas en la actualidad un medio masivo para la transmisión y recepción de señales de información. Físicamente, una antena es un tipo de circuito que consiste en uno o varios conductores que transmiten o captan energía electromagnética. Las antenas pueden tomar formas diferentes: existen antenas de hilos, como los monopolos y dipolos, antenas conectadas a guías de ondas como las bocinas, y antenas más complejas formadas por reflectores parabólicos [1].

El desarrollo que han tenido las antenas de comunicación hoy día, ha sido de gran importancia para nuevas aplicaciones en el campo de la ingeniería y física.

El estudio de la ingeniería de telecomunicaciones, ingeniería electrónica y otras carreras afines, hacen posible que en la actualidad diversos grupos de investigación estén implementando una serie de trabajos que busquen aprovechar las características de estos medios de transmisión y recepción de información, teniendo en cuenta una serie de parámetros que influyen en su funcionamiento. Una manera para determinar los parámetros básicos de una antena, es a través del análisis de su patrón de radiación.

El diagrama de radiación de una antena es la representación gráfica de las características de radiación en función de la dirección angular. Los diagramas de radiación se trabajan en el sistema de coordenadas esféricas, debido a su simplicidad matemática. Los estudios de estos diagramas son de gran interés y utilidad en todos los sistemas de comunicaciones inalámbricas, cuando se analizan los efectos de las ondas electromagnéticas sobre los seres vivos y sobre otros dispositivos electrónicos [2].

Actualmente los laboratorios avanzados de la Escuela de Física de la UIS, cuentan con un sistema de control manual para generar diagramas de radiación de una antena Yagi. La adquisición de instrumentos que trabajan en la frecuencia de microondas para los laboratorios avanzados de la escuela de Física requiere de un sistema automático de control del diagrama de radiación de un kit de antena Yagi. Conociendo esta necesidad se procedió a desarrollar el control por medio de software y hardware como prototipo para generar patrones de radiación en la frecuencia de microondas de 9.4 GHz para una antena tipo Yagi.

Este trabajo muestra la implementación, y montaje de un sistema para la adquisición de patrones de radiación de una antena Yagi. El sistema permite registrar los patrones de radiación en los planos E y H, y visualizar los patrones de intensidad de radiación en un espacio tridimensional (3D).

El presente trabajo se organiza de la siguiente forma:

- El primer capítulo presenta la fundamentación teórica que corresponde a los parámetros que especifican las antenas y los modelos que las describen.
- El segundo capítulo menciona las etapas implementadas para el diseño de la interfaz gráfica para visualizar el patrón de radiación de la antena Yagi en tiempo real, y la electrónica que soporta todo el hardware. Las etapas son:
 - Elaboración del sistema de control con motor de rotación paso a paso para el posicionamiento de la antena Yagi.
 - Desarrollo de la etapa de conversión análogo-digital de la señal de la fuente de radiación y su respectiva adquisición.
 - Diseño la interfaz grafica para visualizar el patrón de radiación de la antena Yagi en tiempo real.

- El tercer capítulo muestra la metodología utilizada para la toma de datos con el diseño implementado y la interfaz gráfica realizada.
- El cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos de los diagramas de radiación con sus respectivos análisis.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 ONDAS ELECTROMAGNETICAS

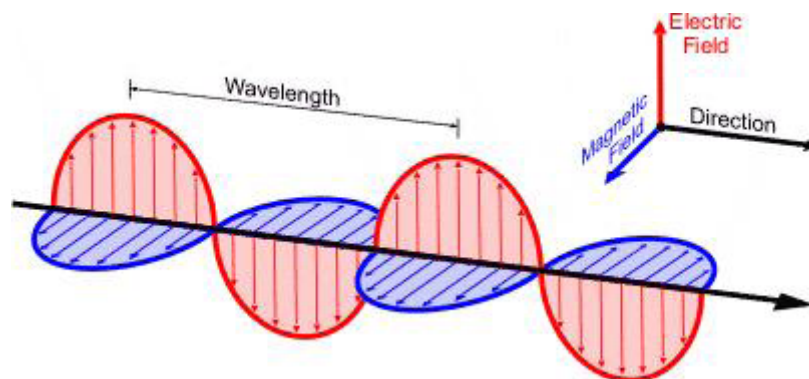
1.1.1 Características de las ondas electromagnéticas

Las ondas producidas por un campo electromagnético viajan a la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) en el vacío y se caracterizan por su longitud de onda. La longitud de onda (λ) se define físicamente por la siguiente ecuación [3,4]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [m] \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de propagación de la luz en el medio recorrido y f es la frecuencia de la onda (Ver figura 1).

Figura 1 .Comportamiento del campo electromagnético



Fuente: [5]

Las ondas electromagnéticas (EM) se componen como su nombre lo indica de un campo eléctrico y un campo magnético. Una onda EM puede ser polarizada de manera lineal, circular, elíptica o aleatoria. Una onda polarizada linealmente tiene un campo eléctrico cuya orientación es constante en todo su recorrido.

En casi el 100% de los casos, una onda EM puede estudiarse como una onda plana que se propaga perpendicularmente al plano formado por los dos vectores de campo (\vec{E} y \vec{H}). Igualmente, se caracteriza porque \vec{E} y \vec{H} son variables en el tiempo, perpendiculares a la dirección de propagación. Estos campos varían en una proporción de $\frac{1}{r}$, donde r es la distancia a la fuente. La energía transportada por una onda EM se calcula a través de la densidad de potencia en un punto, realizando el producto vectorial de la intensidad del campo eléctrico y magnético [4]:

$$\vec{\phi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

Donde $\vec{\phi}$ es llamado el vector de Poynting (Energía emitida por unidad de tiempo, por unidad de área), el cual representa la densidad de potencia y la dirección de propagación de la energía. $\vec{\phi}$ varía en una proporción de $\frac{1}{r^2}$ donde r es la distancia a la fuente.

1.1.2 Microondas

Las señales electromagnéticas transmitidas y recibidas por las antenas de comunicaciones, están en el rango de frecuencias de radio y frecuencias de microondas del espectro electromagnético. Las ondas dentro del espectro electromagnético se clasifican en bandas y las bandas de frecuencias se realizan por décadas. Las respectivas bandas de frecuencias que se encuentran en el espectro electromagnético son: Frecuencia extremadamente baja (*ELF*, por sus siglas en inglés *Extreme Low Frequency*), Frecuencia muy bajas (*VLF*, *Very Low Frequency*), Frecuencia baja (*LF*, *Low Frequency*), Frecuencia Media (*MF*, *Medium Frequency*), Frecuencia Alta (*HF*, *High Frequency*), Frecuencia muy alta (*VHF*, *Very High Frequency*), Frecuencia ultra alta (*UHF* *Ultra High Frequency*),

Frecuencia súper alta (SHF, *Super High Frequency*), Frecuencia extremadamente alta (EHF *Extreme High Frequency*), submilimétrica, IR (Infrarrojo), V (Visible), UV (Ultravioleta) y a frecuencias superiores a estas encontramos los Rayos X y los Rayos Gamma. Esta serie de bandas recorren el rango de frecuencias desde frecuencias menores a 1 KHz hasta frecuencias superiores a 10000 THz [1].

El concepto de microonda no está definido a un margen de frecuencia con un límite universalmente aceptado y suele utilizarse para identificar señales en cuya generación, propagación y procesado se utilizan un conjunto de técnicas muy específicas que no se emplean ni en la electrónica de baja frecuencia ni en la óptica. Según éste criterio puede considerarse que las microondas son todas aquellas ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas entre unos 300 MHz y unos 300 GHz [6].

Tabla 1. Bandas de frecuencia en microondas

<i>Banda</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Longitud de onda</i>
L	1-2 GHz	30-15 cm
S	2-4 GHz	15-7.5 cm
C	4-8 GHz	7.5-3.75 cm
X	8-12.4 GHz	3.75-2.42 cm
Ku	12.4-18 GHz	2.42-1.66 cm
K	18-26.5GHz	1.66-1.11 cm
Ka	26.5-40 GHz	11.1-7.5 mm
Mm	40-300 GHz	7.5-1 mm

Fuente: [4]

Para las bandas más utilizadas en radiocomunicaciones (2 MHz -2 GHz) también es habitual llamarlas “señales de radiofrecuencia (RF)”. Por lo tanto el estudio de las microondas y de las señales de radiofrecuencia no sólo comparte bandas de frecuencia de interés sino también muchas aplicaciones importantes [6].

1.2 ANTENAS

Una antena es un dispositivo cuya función es radiar y/o interceptar energía electromagnética. En otras palabras, la antena es una estructura transaccional para transportar energía electromagnética entre el espacio libre y un dispositivo guiado [1]. La energía electromagnética se encuentra asociada a las ondas electromagnéticas, el conocimiento de la teoría electromagnética es la principal herramienta para la comprensión de este tipo de fenómenos, sobre los cuales funcionan los dispositivos eléctricos, electrónicos, etc. Esto constituye, la base física del desarrollo de nuevas tecnologías en las áreas de la física, las comunicaciones e ingeniería.

A continuación, se describen los modelos teóricos que permiten predecir las características de radiación de la antena, definiendo por una parte las ecuaciones que la rigen y los parámetros básicos que se utilizan para especificar dicha radiación.

1.2.1 Teoría de radiación

En 1888 Hertz probó que era posible emitir y recibir ondas electromagnéticas, dando la razón a James C. Maxwell quien predijo la existencia de este efecto por medio de las llamadas ecuaciones de Maxwell. Estas relacionan los campos magnéticos y eléctricos con las corrientes y cargas que los crean. La solución general de las ecuaciones, en el caso variable en el tiempo, es en forma de ondas, que pueden estar ligadas a una estructura como es el caso de una línea de transmisión, una guía de ondas. Pueden estar en el espacio, como ocurre cuando se producen por las antenas [1].

En términos generales, para el análisis de las características de radiación de una antena se realizan tres pasos:

- El primero consiste en determinar los potenciales electromagnéticos en función de las cargas o corrientes,
 - encontrar la intensidad de campo magnético \vec{H} a partir de los potenciales y; Hallar la intensidad de campo eléctrico \vec{E} a partir de \vec{H} .
- Conociendo \vec{E} y \vec{H} se pueden determinar las demás características de radiación de la antena.

▪ **Ecuación de onda**

Las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial, variable en el tiempo (para valores escalares constantes de ε y μ) son [7]:

$$\nabla \times \dot{\vec{H}} = \varepsilon \dot{\vec{E}} + \vec{J} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \dot{\vec{H}} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (6)$$

J y ρ son la densidad de corriente generadora y la densidad de carga también generadora, respectivamente, estando relacionadas por la ecuación de continuidad [7]:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\dot{\rho} \quad (7)$$

La ecuación (6) se satisface si se representa a \vec{H} como rotacional de algún vector [7]. Esto se deduce a la definición del *potencial vectorial* \vec{A}

$$\mu \vec{H} = \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

Llevando (8) a (4) resulta

$$\nabla \times (\vec{E} + \dot{\vec{A}}) = 0 \quad (9)$$

La ecuación (9) se satisface si $(\vec{E} + \dot{\vec{A}})$ es representada por el gradiente de un escalar [7]. Haciendo $(\vec{E} + \dot{\vec{A}})$ igual a $-\nabla\bar{\Phi}$ se define el *potencial escalar* $\bar{\Phi}$. Así, la intensidad del campo eléctrico puede expresarse como [7]:

$$\vec{E} = -\nabla\bar{\Phi} - \dot{\vec{A}} \quad (10)$$

Las ecuaciones (8) y (10) muestran cómo pueden expresarse las cantidades \vec{E} y \vec{H} en función del potencial vectorial \vec{A} y del potencial escalar $\bar{\Phi}$. Las expresiones (8) y (10) de \vec{H} y \vec{E} satisfacen las ecuaciones (3) y (4). Las restantes ecuaciones de Maxwell deben emplearse para obtener ecuaciones diferenciales de las funciones de potencial. La sustitución de (8) y (10) en (3) da [7]:

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\varepsilon \nabla \dot{\bar{\Phi}} - \varepsilon \ddot{\vec{A}} + \vec{J}$$

La identidad $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \nabla \cdot \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$ permite escribir lo anterior así:

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \varepsilon \ddot{\vec{A}} = -\mu \vec{J} + \mu \varepsilon \nabla \dot{\bar{\Phi}} + \nabla \nabla \cdot \vec{A} \quad (11)$$

Esta es una de las ecuaciones necesitadas; la segunda se obtiene sustituyendo (10) en (5), así:

$$\nabla^2 \vec{\Phi} + \nabla \cdot \dot{\vec{A}} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) se complican por el hecho de que están “acopladas”, es decir, las ecuaciones contienen simultáneamente \vec{A} y $\vec{\Phi}$. Una nueva complicación nace del hecho de que (11) y (12) no dan una solución única para los campos pospotenciales. La verdad de lo dicho, puede inferirse del *teorema de Helmholtz*: “*Todo campo vectorial debido a una fuente finita está especificado de un modo único si se especifican tanto el rotacional como la divergencia del campo*”. El rotacional de \vec{A} está dado en (8), pero su divergencia queda sin especificar. Es más, de la relación de definición (9) es evidente que hay cierta arbitrariedad también sobre el potencial escalar. El examen de las ecuaciones (11) y (12) muestra que la divergencia de \vec{A} se ha hecho igual a $-\mu\varepsilon\dot{\Phi}$; estas ecuaciones se independizan entre sí y se reducen a las ecuaciones de ondas normales con la inclusión de términos debido a sus fuentes, es decir [7],

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\varepsilon\ddot{\vec{A}} = -\mu\vec{J} \quad (13)$$

$$\nabla^2 \vec{\Phi} - \mu\varepsilon\ddot{\vec{\Phi}} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (14)$$

La selección particular que se acaba de establecer es:

$$\nabla \cdot \vec{A} = -\mu\varepsilon\dot{\Phi} \quad (15)$$

Esta se conoce como *condición de Lorentz*. Son posibles también, otras de estas condiciones, pero es necesario que las soluciones de \vec{A} y $\vec{\Phi}$ representen potenciales electromagnéticos retardados. Puede demostrarse que (15) debe ser satisfecha, siempre que las distribuciones de las cargas y corrientes generadoras estén relacionadas por la ecuación de continuidad [7].

- **Solución integral para los potenciales retardados**

Los campos electromagnéticos, y los potenciales están relacionados mediante la ecuación de onda vectorial inhomogénea. La ecuación de onda escalar homogénea, (en ausencia de fuentes) se puede escribir como [1]:

$$\nabla^2 \Omega + K^2 \Omega = 0 \quad (16)$$

Donde Ω es el potencial vectorial \vec{A} o el potencial escalar $\vec{\Phi}$.

La ecuación de onda se puede resolver de forma analítica en diversos sistemas de coordenadas (cartesianas, cilíndricas, esféricas, etc.). Para este caso, se desarrolla utilizando el sistema de coordenadas esféricas ya que la fuente es puntual.

Se tiene que la ecuación de onda para el potencial escalar es:

$$\nabla^2 \Phi + K^2 \Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

Donde $k^2 = -\mu\varepsilon$

En coordenadas esféricas, siempre que haya simetría en el origen, sin variación respecto a las variables angulares, la solución de la ecuación de onda con la condición de no variación en las direcciones θ, ϕ es [1]:

$$\nabla^2 \Omega + k^2 \Omega = 0$$

Con $\frac{\partial \Omega}{\partial \phi} = 0$, $\frac{\partial \Omega}{\partial \theta} = 0$, y $\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + k^2 \Omega = 0$, es $\Omega = A \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} + B \frac{e^{jkr}}{4\pi r}$

La solución se puede resolver, teniendo en cuenta la combinatoria de dos ondas esféricas, progresiva (desde el origen a infinito) y regresiva, en sentido contrario. Se obtiene la función de Green:

$$\begin{aligned}\nabla^2 G + k^2 G &= -\delta(r) \\ \nabla \cdot \nabla G + k^2 G &= -\delta(r) \\ G &= A \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}\end{aligned}$$

Para determinar el valor de la constante A, se puede integrar en una esfera que encierre el origen de coordenadas, teniendo en cuenta que la superficie de la esfera es proporcional a r^2 , mientras que el volumen de la superficie de la esfera es proporcional a r^3 . Calculando la divergencia de la solución e integrando se obtiene $A=1$ [6].

$$\iiint_s \nabla G \cdot \hat{r} r^2 \sin(\theta) d\theta d\phi + k^2 \iiint_v G dv = -1$$

$$\iiint_s G dv \rightarrow -0$$

$$G(r) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$$

Si las fuentes están situadas en un punto distinto del origen, definido por el vector \vec{r}' , la solución es la misma que en el caso anterior, con un cambio en el sistema de referencia [1].

$$G(r, r') = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \quad (17)$$

Una vez obtenida la solución de la ecuación de onda para una fuente puntual, se halla la solución general aplicando el principio de superposición, integrando el conjunto de todas las fuentes. La solución para el potencial se puede obtener

como la convolución de la respuesta impulsional (función de Green) con las fuentes (distribución volumétrica de cargas) [8].

$$\Phi = \frac{1}{\varepsilon} \iiint_{v'} G(\vec{r}, \vec{r}') \rho(\vec{r}') dv'$$

$$\Phi = \frac{1}{\varepsilon} \iiint_{v'} \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \rho(\vec{r}') dv' \quad (18)$$

y análogamente se obtiene el vector potencial

$$\vec{A} = \mu \iiint_{v'} G(\vec{r}, \vec{r}') J(\vec{r}') dv'$$

$$\vec{A} = \mu \iiint_{v'} \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} J(\vec{r}') dv' \quad (19)$$

- **Soluciones generales de los campos**

Los campos \vec{E} y \vec{H} se pueden obtener a partir de los potenciales mediante las expresiones (8) y (6). Para calcular los campos es necesario calcular los gradientes y rotacionales de los potenciales [8].

$$\begin{aligned}\nabla\Phi(\vec{r}) &= \frac{1}{\varepsilon} \iiint_{v'} \nabla G(\vec{r}, \vec{r}') \rho(\vec{r}') dv' \\ \nabla G(\vec{r}, \vec{r}') &= \nabla\left(\frac{e^{-jkR}}{4\pi r}\right) = \frac{dG(R)}{dR} \hat{R} \\ \nabla G(\vec{r}, \vec{r}') &= \left(-jk - \frac{1}{R}\right) \left(\frac{e^{-jkR}}{4\pi r}\right) \hat{R} \\ \nabla \times \vec{A} &= \mu \nabla \times \iiint_{v'} G(\vec{r}, \vec{r}') J(\vec{r}') dv' = \mu \iiint_{v'} \nabla G(\vec{r}, \vec{r}') \times J(\vec{r}') dv'\end{aligned}$$

Finalmente, simplificando las anteriores expresiones se obtiene el campo eléctrico, válido en todos los puntos del espacio.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \iiint_{v'} \hat{R} \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R^2} dv' + \frac{jk}{4\pi\varepsilon} \iiint_{v'} \left(\rho(\vec{r}') \hat{R} - \frac{\omega\varepsilon}{k} \vec{J}(\vec{r}')\right) \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (20)$$

Y el campo magnético se obtiene de igual forma que la anterior expresión [3]:

$$\vec{H} = -\frac{1}{4\pi} \iiint_{v'} \hat{R} \times \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R^2} dv' - \frac{jk}{4\pi} \iiint_{v'} (\hat{R} \times \vec{J}(\vec{r}')) \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (21)$$

Ambas son expresiones generales y exactas de los campos; se puede apreciar en estas ecuaciones dependencias de tipo $1/R$ y $1/R^2$, que permiten escribirlos como suma de dos términos, denominados *campo próximo o inducido* y *campo lejano o radiado*: $\vec{E} = \vec{E}^i + \vec{E}^r$, $\vec{H} = \vec{H}^i + \vec{H}^r$, que toman la forma general [8]

- Campos inducidos

$$\vec{E}^i = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int_{v'} \hat{R} \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R^2} dv' \quad (22)$$

$$\vec{H}^i = -\frac{1}{4\pi} \int_{v'} [\hat{R} \times \vec{J}(\vec{r}')] \frac{e^{-jkR}}{R^2} dv' \quad (23)$$

- Campos radiados

$$\vec{E}^r = \frac{jk}{4\pi\epsilon} \int_{v'} \left[\rho(\vec{r}') \hat{R} - \sqrt{\mu\epsilon} \vec{J}(\vec{r}') \right] \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (24)$$

$$\vec{H}^r = -\frac{jk}{4\pi} \int_{v'} \left[\hat{R} \times \vec{J}(\vec{r}') \right] \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (25)$$

Si $KR \ll 1$ tenemos $\frac{K}{R} \ll \frac{1}{R^2}$ y dominan los campo inducidos, lo que corresponde a puntos próximos a la distribución.

La ecuación (22) para \vec{E} es la ley de Coulomb con el factor retardado e^{-jkR} en el integrando. La ecuación (24) es la ley de Biot-Savart, también con el mismo factor de retardo.

- **Aproximaciones a grandes distancia para los campos radiados**

Los campos radiados se pueden calcular a partir de las expresiones generales de los campos, realizando las correspondientes integrales. Si está a una distancia suficientemente grande de la antena, se hacen una serie de aproximaciones que simplificarán los cálculos.

Se puede considerar que todas las ondas originadas en la antena siguen trayectorias paralelas hasta el punto de campo, es decir: Al ser las trayectorias de los rayos paralelas, la diferencia de caminos recorridos por las diferentes ondas se puede calcular como [8]:

$$R \approx r - \hat{r} \cdot \vec{r}'$$

Las ondas producidas en cada punto se pueden aproximar por una onda centrada en el origen de coordenadas con un desfase adicional equivalente a la diferencia

de caminos. El potencial vectorial eléctrico a grandes distancias se puede calcular a partir de la función de Green aproximada a grandes distancias [8]:

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \approx \frac{e^{-jkr}}{4\pi R} e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}'} \quad (26)$$

Luego el potencial vector queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \mu \iiint_{v'} G(\vec{r}, \vec{r}') \vec{J}(\vec{r}') dv' \\ \vec{A} &= \mu \iiint_{v'} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \vec{J}(\vec{r}') dv' = \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \iiint_{v'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}'} dv' \end{aligned} \quad (27)$$

Y por consiguiente el campo magnético radiado es:

$$\begin{aligned} \vec{H} &= -\frac{jk}{4\pi} \iiint_{v'} (\hat{R} \times \vec{J}(\vec{r}')) \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \\ \vec{H} &= -\frac{jk}{4\pi} \iiint_{v'} (\hat{r} \times \vec{J}(\vec{r}')) \frac{e^{-jkR}}{R} e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}'} dv' \\ \vec{H} &= -\frac{jk}{\mu} \hat{r} \times \vec{A} \end{aligned} \quad (28)$$

El campo magnético es perpendicular a la dirección radial y al potencial vector.

El campo eléctrico radiado se puede calcular a partir de los potenciales y la condición de Lorentz

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \nabla\Omega = -j\omega\vec{A} - \frac{j}{\omega\mu\epsilon} \nabla\nabla \cdot \vec{A} \quad (29)$$

La divergencia en coordenadas esféricas es:

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 A_r + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\theta \sin\theta) + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi}$$

Se puede observar que todos los términos de la divergencia son proporcionales a la distancia, excepto el primero, la divergencia se puede aproximar por:

$$\nabla \cdot \vec{A} \approx \frac{\partial A_r}{\partial r}$$

Tomando el gradiente de la divergencia se llega a:

$$\nabla \nabla \cdot \vec{A} = \hat{r} \frac{\partial^2 A_r}{\partial r^2} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 A_r}{\partial r \partial \theta} + \hat{\phi} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 A_r}{\partial r \partial \phi}$$

Efectuando las operaciones indicadas, el sumando que decrece menos con las distancia es el debido a la componente radial

$$\nabla \nabla \cdot \vec{A} \approx \hat{r} \frac{\partial^2 A_r}{\partial r^2} = -k^2 (\hat{r} \cdot \vec{A}) \hat{r}$$

Finalmente nos queda una expresión muy simple para el campo eléctrico radiado a grandes distancias

$$\vec{E} = -j\omega(\vec{A} - (\hat{r} \cdot \vec{A})\hat{r}) = -j\omega(\hat{r} \times (\hat{r} \times \vec{A})) \quad (30)$$

El campo eléctrico es perpendicular a la dirección radial; sólo tiene componentes tangenciales.

Los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares entre sí y sólo tienen componentes tangenciales. La relación entre sus módulos es la impedancia característica del medio, que no debe confundirse con la eficiencia [8]:

$$\begin{aligned}
\vec{H} &= -\frac{jk}{\mu} \hat{r} \times \vec{A} \\
\vec{E} &= j\omega(\vec{A} - \hat{r} \cdot \vec{A}) = j\omega(\hat{r} \times (\hat{r} \times \vec{A})) \\
\vec{E} &= \eta(\vec{H} \times \hat{r})
\end{aligned} \tag{31}$$

Desarrollando los productos vectoriales, se pueden obtener las componentes de los campos radiados:

$$\begin{aligned}
E_r &= 0 & H_r &= 0 \\
E_\theta &= -j\omega A_\theta & H_\theta &= -\frac{E_\phi}{\eta} \\
E_\phi &= -j\omega A_\phi & H_\phi &= \frac{E_\theta}{\eta}
\end{aligned} \tag{32}$$

- **Vector de radiación**

Es habitual escribir el potencial vectorial en función del vector de radiación, definido mediante la expresión [6]:

$$\begin{aligned}
\vec{A} &= \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \iiint_{v'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} \\
\vec{A} &= \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{N} \\
\vec{N} &= \iiint_{v'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} dv'
\end{aligned} \tag{33}$$

El vector de radiación se puede considerar como la suma vectorial de todas las corrientes, multiplicadas por un término que representa la diferencia de fase entre la onda que produce y la que tendría si la onda estuviera situada en el origen de coordenadas [1].

Después de hallar el vector de radiación los campos y el vector de Poynting resultan [1]:

$$\begin{aligned} E_{\phi} &= -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_{\phi} & H_{\theta} &= jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_{\phi} \\ E_{\theta} &= -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_{\theta} & H_{\phi} &= -jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_{\theta} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\vec{\phi} = \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] = \hat{r} \frac{\eta}{4\lambda^2 r^2} \left[|N_{\theta}|^2 + |N_{\phi}|^2 \right]$$

La potencia total radiada es:

$$P_r = \iint_{4\pi} \vec{\phi} \cdot \hat{r} ds = \frac{\eta}{4\lambda^2} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left[|N_{\theta}|^2 + |N_{\phi}|^2 \right] \sin\theta d\theta d\phi \quad (35)$$

Interpretación como transformada de Fourier

El término de fase depende de la dirección del espacio que se esté considerando y de la distancia al origen. Descomponiendo el vector distancia en sus tres componentes:

$$\begin{aligned} k\hat{r} &= \vec{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z} \\ \vec{r}' &= x' \hat{x} + y' \hat{y} + z' \hat{z} \end{aligned} \quad (36)$$

El vector de radiación se puede interpretar como una integral tridimensional [1].

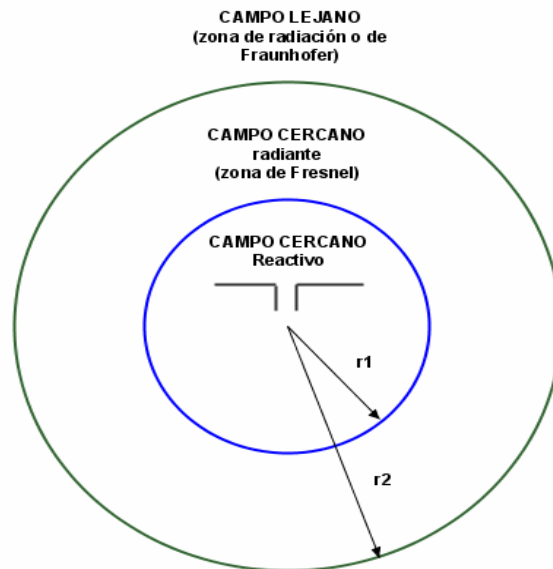
$$\vec{N} = \iiint_{v'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} dv' = \iiint_{v'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} e^{jk_z z'} dv' \quad (37)$$

Esa función representa la solución matemática de la transformada de Fourier.

- **Regiones de Fresnel y Fraunhofer**

Anteriormente se determinó la existencia de dos regiones, la de campos inducidos y la de campos de radiación. Sin embargo, no se estableció una zona límite entre las dos regiones. Para establecerla se considerará una distribución lineal de corriente de dimensión D (que corresponde al diámetro de la esfera menor que circunscribe la antena), se supone grande en términos de la longitud de onda, como se indica en la figura 2 [8].

Figura 2 .Representación del campo cercano y campo lejano de radiación de una antena



Fuente: Autor del proyecto

Anteriormente se calculó el potencial vector $\vec{A}(\vec{r})$ para puntos alejados con la aproximación $R \approx r - z' \cos \theta$, pero el valor exacto de R viene dado por [8]:

$$R = (r^2 - 2rz' \cos \theta + z'^2)^{1/2} = r \left(1 - 2 \frac{z'}{r} \cos \theta + \frac{z'^2}{r^2} \right)^{1/2} \quad (38)$$

Que puede ser desarrollado en serie binómica:

$$(1+x)^{1/2} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} + \dots$$

Y obtenerse:

$$R = r - z' \cos \theta + \frac{z'^2}{2r} \text{sen}^2 \theta + \frac{z'^3}{2r^2} \cos \theta \text{sen}^2 \theta + \dots \quad (39)$$

Sustituyendo esta serie en la ecuación (27) se tiene [1]:

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-D/2}^{D/2} \hat{z} I(z') \frac{e^{-jkR}}{R} dz' = \frac{\mu}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{-D/2}^{D/2} \hat{z} I(z') e^{-jkz' \cos \theta} e^{-jk \frac{z'^2}{2r} \text{sen}^2 \theta} e^{-jk \frac{z'^3}{2r^2} \cos \theta \text{sen}^2 \theta} \dots dz' \quad (40)$$

Si se acerca hacia la antena desde $r \rightarrow \infty$, los términos exponenciales del integrando salvo el primero, que es independiente de r , pasarán progresivamente de ser despreciables a tomar valores apreciables. La región desde $r \rightarrow \infty$ hasta la distancia en que $\exp\left(-jk \frac{z'^2}{2r} \text{sen}^2 \theta\right)$ aporta una fase de $\pi/8$ se conoce como la región de Fraunhofer o la región de campo lejano [8].

La situación más desfavorable del término de fase es para $z' = D/2$ y $\theta = \pi/2$, con el resultado [8]:

$$k \frac{(D/2)^2}{2r} = \frac{\pi}{8}, \quad r = 2 \frac{D_{\max}^2}{\lambda_{\min}} \quad (41)$$

Y la región de Fraunhofer queda definida mediante

$$\frac{2D^2}{\lambda} \leq r < \infty \quad (42)$$

Si $\frac{2D^2}{\lambda} > r$ habrá que considerar en la ecuación (38) en el término de fase z'^2 y se estará en la región de Fresnel o de campo cercano, que se extiende desde

$r_2 = 2 \frac{D^2_{\max}}{\lambda_{\min}}$ hasta la distancia en que el término de fase z^3 adquiere valores iguales a $\pi/8$ [8]:

$$k \frac{(D/2)^3 \cos \theta \sin^2 \theta}{2r^2} = \frac{\pi}{8} \quad (43)$$

Que resulta en:

$$r = 0,62 \sqrt{\frac{D^3_{\max}}{\lambda_{\min}}} \quad (44)$$

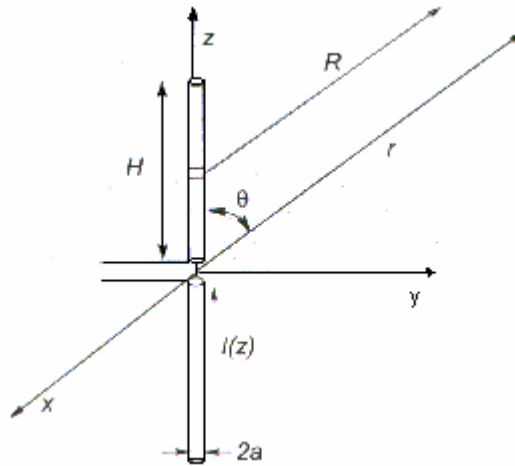
Y la región de Fresnel queda definida como:

$$0.6(D^3 / \lambda) \leq r \leq 2D^2 / \lambda \quad (45)$$

- **Antena cilíndrica**

El modelo de antena más sencillo es el denominado de antena cilíndrica, que consiste de un hilo fino recto conductor, de dimensión $2H$ y radio $a(a \ll \lambda)$ alimentado con un generador en su centro, como se indica en la figura 3:

Figura 3 .Antena cilíndrica



Fuente: [8]

Experimentalmente se ha visto una distribución de corriente sinusoidal en este tipo de antena, con un cero de corriente en los extremos [8]:

$$\vec{J}(r') = \hat{z}I(z')\delta(x')\delta(y') \quad (46)$$

Donde

$$I(z') = I_m \text{sen}(k(H - |z'|)) = \begin{cases} I_m \text{sen}(k(H - z')) & 0 \leq z' \leq H \\ I_m \text{sen}(k(H + z')) & -H \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (47)$$

Siendo $k = 2\pi / \lambda$ e I_m es el valor máximo de la distribución de corriente, que no coincide necesariamente con el valor de la corriente en la entrada de la antena o bornes del generador que es [8]:

$$I(0) = I_m \text{sen}(kH) \quad (48)$$

Una vez conocida la distribución de corriente se halla el vector de radiación a partir de la ecuación (34) y a partir de éste los campos radiados:

$$\vec{N} = \hat{z} 2I_m \frac{\cos(kH \cos \theta) - \cos(kH)}{k \sin^2 \theta} \quad (49)$$

Y de ahí los campos radiados [1]:

$$\begin{aligned} E_\theta &= J \frac{\eta}{2\pi r} e^{-jkr} I_m \frac{\cos(kH \cos \theta) - \cos(kH)}{\sin \theta} & E_\phi &= 0 \\ H_\theta &= 0 & H_\phi &= \frac{E_\theta}{\eta} \end{aligned} \quad (50)$$

La densidad de potencia radiada será [1]:

$$\wp = \text{Re}[E_\theta H_\phi^*] = \frac{\eta I_m^2}{4\pi^2 r^2} \left(\frac{\cos(kH \cos \theta) - \cos(kH)}{\sin \theta} \right)^2 \quad (51)$$

A partir de la expresión anterior, integrando sobre una superficie esférica cerrada se obtiene la potencia radiada [8]

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \wp r^2 \sin \theta d\phi d\theta = I_m^2 \frac{\eta}{2\pi} \int_0^\pi \frac{(\cos(kH \cos \theta) - \cos(kH))^2}{\sin \theta} d\theta \quad (52)$$

Esta integral no tiene una solución analítica, aunque puede escribirse en función de senos y cosenos integrales por lo que se suele resolver numéricamente para cada valor de H. A partir de la potencia radiada se pueden obtener la directividad y la resistencia de radiación, esta última referida a la corriente máxima [8].

$$D = \frac{\wp_{MAX} 4\pi R^2}{P_R}, \quad R_r = \frac{P_r}{I_m^2} \quad (53)$$

A continuación se particularizará las expresiones anteriores para unos casos concretos.

Dipolo $\lambda/2$

El caso particular de $H = \lambda/4$ es uno de los más habituales recibiendo también el nombre de dipolo media onda. Para este valor concreto de longitud del dipolo las expresiones anteriores quedan de la siguiente forma [8]:

$$\vec{N} = \hat{z} I_m 2 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{k \operatorname{sen}^2 \theta} \quad (54)$$

$$E_\theta = j60 \frac{e^{-jkr}}{r} I_m \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\operatorname{sen} \theta} \quad (56)$$

$$E_\theta = \frac{30 I_m^2}{\pi^2 r^2} I_m \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\operatorname{sen} \theta} \quad (57)$$

$$D = 1,64, \quad R_r = 73\Omega \quad (58)$$

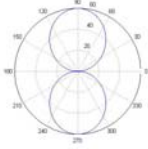
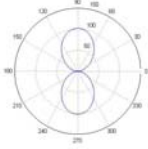
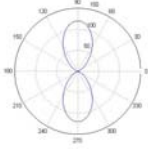
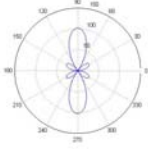
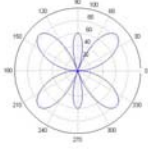
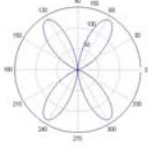
Dipolo corto

Si las dimensiones del dipolo son reducidas en términos de λ y no existe elementos acumuladores de carga en los extremos, la distribución de corriente no será uniforme sino sinusoidal. En este caso se le denomina al dipolo como corto para diferenciarlo del elemental. Cuando $H < 0,1\lambda$ la distribución se puede aproximar por una distribución triangular [8].

$$I(z') = I_0 \left(1 + \frac{|z'|}{H} \right) \quad (59)$$

En la siguiente tabla se puede ver un resumen de los diferentes parámetros para diferentes longitudes de dipolos.

Tabla 2. Parámetros de dipolos de diferentes longitudes

Longitud de dipolo	Diagrama de Radiación	Valor de H	Resistencia de radiación referida al máximo de corriente R_{rm} (Ω)	Resistencia de radiación referida a la entrada R_{re} (Ω)	Directividad
$\lambda/2$		$\lambda/4$	73	73	1,64
$3\lambda/4$		$3\lambda/8$	180	360	1,94
λ		$\lambda/2$	199	∞	2,41
$5\lambda/4$		$5\lambda/8$	105	210	3,33
$3\lambda/2$		$3\lambda/4$	99,5	99,5	2,17
2λ		λ	260	∞	2,52

Fuente: Autor y [8]

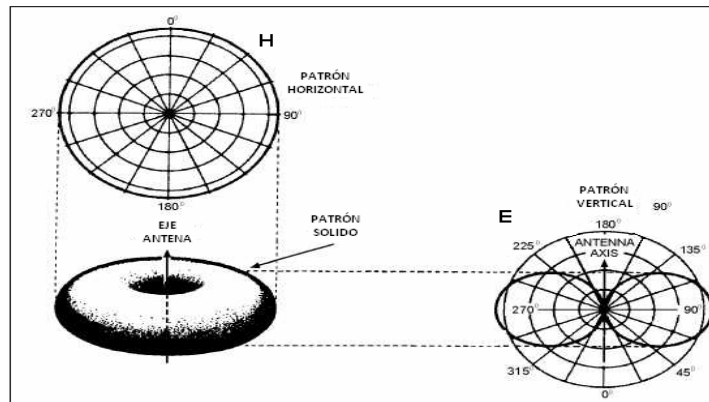
1.2.2 Parámetros de las antenas

- **Patrón de radiación**

La antena como dispositivo transmisor/receptor de energía electromagnética tiene un patrón de radiación que indica el comportamiento de los campos eléctrico y magnético a su alrededor, dependiendo totalmente de la geometría de la antena.

El patrón de radiación de la antena se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación es determinado en la región de campo lejano y es representado como una función de las coordenadas direccionales. En el cual se miden las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena. El patrón de radiación puede ser representado en forma tridimensional. En la mayoría de los casos resulta suficiente tomar cortes en el origen de los planos principales (Ver Figura 4). A su vez, los cortes que representan el patrón de radiación horizontal o el patrón vertical, pueden representarse en coordenadas polares, o en coordenadas cartesianas [1].

Figura 4. Patrón de radiación E y H



Fuente: [9]

En resumen, se puede afirmar que teniendo la información del comportamiento de los campos eléctrico y magnético y aplicando el concepto del vector de Poynting, es posible generar patrones de radiación tridimensionales.

- **Densidad de potencia radiada**

Las ondas electromagnéticas son usadas para transportar información a través de un medio o una estructura guiada, desde un punto a otro. Es natural asumir que potencia y energía son asociadas con campos electromagnéticos. La expresión matemática usada para describir la potencia asociada con una onda electromagnética es el vector Poynting definido como [10]:

$$\vec{\phi} = \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (60)$$

- **Directividad**

Es una medida absoluta de la capacidad de la antena para concentrar la radiación en una dirección determinada con respecto a las demás. La directividad está expresada como el cociente entre la densidad superficial de potencia radiada en una dirección dada y la que radiaría una antena isotrópica con la misma potencia total radiada. Se entiende por *antena isotrópica*, como la antena que radia la misma densidad de potencia en todas las direcciones [1].

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (61)$$

Como se puede apreciar en la ecuación 61, la directividad está en función de los ángulos de dirección que toma la misma forma que el diagrama de potencia.

Comúnmente al valor máximo de la función directividad se le conoce como la “*directividad de una antena*”.

Cuando no se especifica la dirección angular, entonces la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$D = \frac{P_{\max}}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (62)$$

P_{\max} , es la máxima densidad de potencia radiada y $\frac{P_r}{(4\pi r^2)}$ es la densidad de potencia de una antena isotrópica [1].

- **Ganancia**

La ganancia de una antena es un parámetro similar a la directividad. En este caso la potencia de normalización no es la potencia radiada, sino la potencia entregada a la antena en sus terminales [6]. La ganancia de potencia de una antena con respecto a una fuente isotrópica, se define como la razón de su intensidad de radiación máxima a la intensidad de radiación de una fuente isotrópica sin pérdidas con la misma potencia de entrada [6].

La diferencia entre ambas potencias es la potencia disipada por la antena, debida a pérdidas óhmicas. Esto implica que la potencia radiada es inferior a la potencia total de entrada:

$$P_i = P_r + P_l \quad (63)$$

Donde, P_i : Potencia de entrada

P_r : Potencia radiada

P_i : Potencia de pérdidas

Por lo tanto la ganancia de potencia de la antena, es entonces:

$$G = 4\pi * \frac{P_{\max}}{P_i} \quad (64)$$

La razón entre la ganancia y la directividad de una antena se denomina eficiencia de radiación [10]. También, puede definirse como la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma. La eficiencia es un número comprendido entre 0 y 1 [11].

$$\eta = G/D = P_r/P_i \quad (65)$$

Si una antena no tiene pérdidas óhmicas, la directividad y la ganancia son iguales.

▪ Polarización

La radiación electromagnética se compone por el campo eléctrico y el campo magnético formando entre si un ángulo de 90°. Donde el campo eléctrico en la mayoría de los casos es quien determina la dirección de polarización de la onda. Por lo tanto, en una antena polarizada verticalmente, sus líneas de fuerza del campo eléctrico están en una dirección vertical y en una antena con polarización horizontal, las líneas de fuerza del campo eléctrico están en dirección horizontal.

Se produce una *polarización lineal* cuando las fases de dos componentes ortogonales del campo eléctrico difieren un múltiplo entero de π radianes o cuando dichas componentes ortogonales están en fase entre si. Se produce *polarización circular* cuando las líneas de fuerzas del campo eléctrico rotan 360° con cada ciclo, además las amplitudes de sus componentes son iguales y la

diferencia de fase entre las componentes es $\pi/2$ o $3\pi/2$. La *polarización elíptica* se presenta en los demás casos [10].

- **Impedancia**

Al conectar un generador o transmisor a una antena, deberá radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas. Debe hacerse una adaptación entre la antena y el transmisor para una máxima transferencia de potencia, que se hace por medio de una línea de transmisión o una guía de ondas. Esta línea influirá en la adaptación, considerando su impedancia característica, atenuación y longitud [6].

La relación entre la tensión y la corriente en sus terminales de entrada permite modelar la antena como una impedancia. Dicha impedancia es en general compleja [12]. La parte real se denomina resistencia de antena y la parte imaginaria, reactancia de antena, dependientes de la frecuencia [6].

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a \quad [\Omega] \quad (66)$$

La resistencia de la antena se puede descomponer en dos resistencias, la resistencia de radiación (R_r) y la resistencia de pérdidas (R_Ω). Se define la resistencia de radiación como la relación entre la potencia total radiada por una antena y el valor eficaz de la corriente en sus terminales de entrada, elevada al cuadrado. Se define la resistencia óhmica de una antena como la relación entre la potencia disipada por efecto de pérdidas resistivas y la corriente en sus terminales al cuadrado.

Por lo tanto, la resistencia de antena se considera como la suma de la resistencia de radiación y la resistencia óhmica [6].

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a \quad [\Omega] \quad (67)$$

La eficiencia de una antena se puede obtener a partir de las resistencias de radiación y óhmicas, teniendo en cuenta que es la relación entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena [6].

$$\eta = \frac{W_t}{W_e} = \frac{W_t}{W_t + W_\Omega} = \frac{I^2 R_r}{I^2 (R_r + R_\Omega)} = \frac{R_r}{(R_r + R_\Omega)} \quad (68)$$

▪ Adaptación

Las antenas receptoras tienen un circuito equivalente de Thévenin, con una impedancia de antena y un generador de tensión. La transferencia de potencia entre la antena y la carga es máxima cuando ambas impedancias son complejas conjugadas [6]:

$$W_r^m = \frac{|V_a|^2}{4R_a} \quad [W] \quad (69)$$

Se define el coeficiente de adaptación como la relación entre la potencia recibida y la potencia que se recibiría en el caso de máxima transferencia de potencia. Toma valores entre 0 y 1 [6].

$$C_a = \frac{W_r}{W_r^m} = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2} \quad (70)$$

Donde, R_a : Resistencia de antena

R_L : Resistencia de carga

X_a : Inductancia de antena

X_L : Inductancia de carga

- **Área y longitud efectivas**

El área efectiva se define como la relación entre la potencia recibida y la densidad de potencia incidente en una antena:

$$A_{ef} = \frac{W_r}{P_i} \quad [m^2] \quad (71)$$

La antena debe estar adaptada a la carga, de forma que la potencia transferida sea la máxima. La onda recibida debe estar adaptada en polarización a la antena [11].

La longitud efectiva de una antena linealmente polarizada se define como la relación entre la tensión inducida en una antena en circuito abierto y el campo incidente en la misma [6].

$$l_{ef} = \frac{V_a}{E_i} \quad [m] \quad (72)$$

1.2.3 Alimentación de agrupaciones

Los elementos de la agrupación se consideran que están alimentados por fuente de corriente. Si se quiere alimentar la agrupación con fuente de tensión, para calcular la tensión de entrada a partir de la corriente debe tenerse en cuenta que la impedancia de entrada de cada elemento no es la de una antena aislada, sino que depende de las impedancias mutuas con las demás impedancias de la agrupación [8].

La interacción entre los elementos de una agrupación es importante y afecta particularmente a la fase de las corrientes de cada elemento cuando se alimenta con fuentes de tensión sin tener en cuenta las impedancias mutuas. Esto puede producir modificaciones significativas en el diagrama de radiación respecto a lo obtenido alimentando con fuentes de corriente [8].

La interacción entre elementos, y por lo tanto la variación en las corrientes, depende mucho de la geometría de la agrupación y la posición relativa de los elementos: es máxima cuando el eje de la agrupación coincide con un máximo de radiación de la antena básica y mínima cuando lo hace con un nulo. Las tensiones de alimentación de cada elemento deben calcularse a partir de la matriz de impedancias mutuas [8]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (73)$$

Donde $Z_{ii} = \left(\frac{V_i}{I_i} \right) \Big|_{I_j = 0 \forall j \neq i}$, es la autoimpedancia del elemento i-ésimo que coincide con su impedancia de entrada cuando se encuentra aislado en el espacio libre y $Z_{ij} = \left(\frac{V_i}{I_j} \right) \Big|_{I_i = 0 \forall i \neq j}$ es la impedancia mutua entre los elementos i-ésimo y j-ésimo.

La impedancia mutua proporciona la tensión en circuito abierto que aparece en el elemento i-ésimo inducida por la corriente que circula por el elemento j-ésimo, si ambos están aislados en el espacio libre [8].

1.2.4 Agrupaciones con elementos parásitos

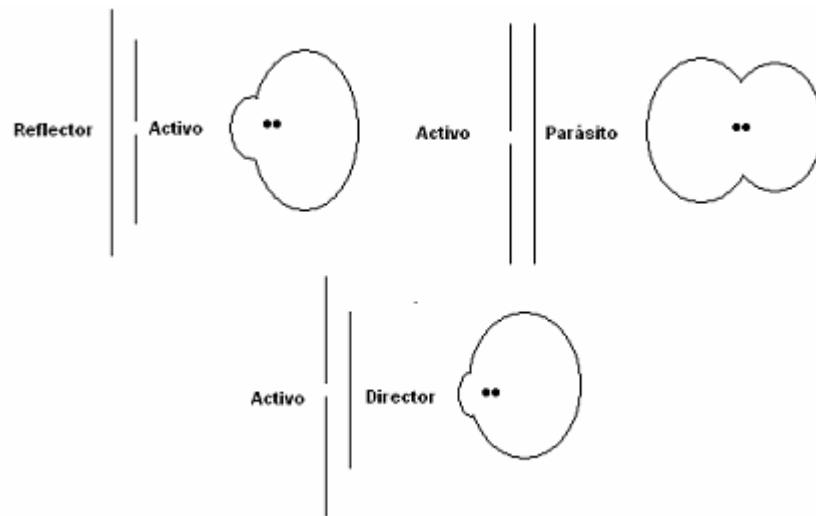
Según la teoría de alimentación de agrupaciones se deduce que es posible alimentar solo algunos elementos de la agrupación, dejando los demás en cortocircuito [8].

A los elementos con alimentación se le llama “activos”, mientras que los elementos cortocircuitados reciben el nombre de “parásitos”. La agrupación de elementos parásitos se analiza despejando la matriz de impedancia (Ver ecuación 73) dejando el vector de corrientes de los elementos en función del vector de tensiones en el que algunos elementos son nulos. En general, la corriente que circula por los elementos parásitos es diferente de cero. Esta corriente es inducida por la interacción con los demás elementos, a través de las impedancias mutuas [8].

Haciendo un diseño adecuado de los elementos parásitos, pueden conseguirse diagramas de radiación de tipo longitudinal bastantes directivos, de los que son un ejemplo clásico las Antenas Yagi-Uda. El caso más simple de agrupación con elementos parásitos es el formado por un dipolo activo y uno parásito. Si el dipolo activo es de media onda ($\lambda/2$), pueden obtenerse tres tipos de diagrama de la agrupación según sea la longitud del dipolo parásito ligeramente superior, igual o ligeramente inferior a la del activo [8].

En la figura 5 se muestran los diagramas de campo en el plano \vec{H} para las tres situaciones mencionadas anteriormente

Figura 5. Agrupaciones con un elemento activo y uno parásito



Fuente: [8], Autor del proyecto

Cuando la longitud de ambos elementos es igual el diagrama es casi simétrico. Sin embargo, un elemento parásito de longitud ligeramente superior a la del activo produce un máximo en la dirección del activo, por lo que recibe el nombre de reflector. Un elemento parásito de longitud ligeramente inferior produce un máximo en la dirección del parásito por lo que ejerce la función de director.

Este cambio de comportamiento con la longitud es debido a que el parásito de tamaño inferior al dipolo resonante es de carácter capacitivo, mientras que el de tamaño superior es inductivo. Este cambio de signo en la fase de la autoimpedancia del parásito cambia también el signo en la fase de la corriente lo cual cambia el signo en la fase progresiva de la agrupación y por tanto, el sentido del máximo de radiación [8].

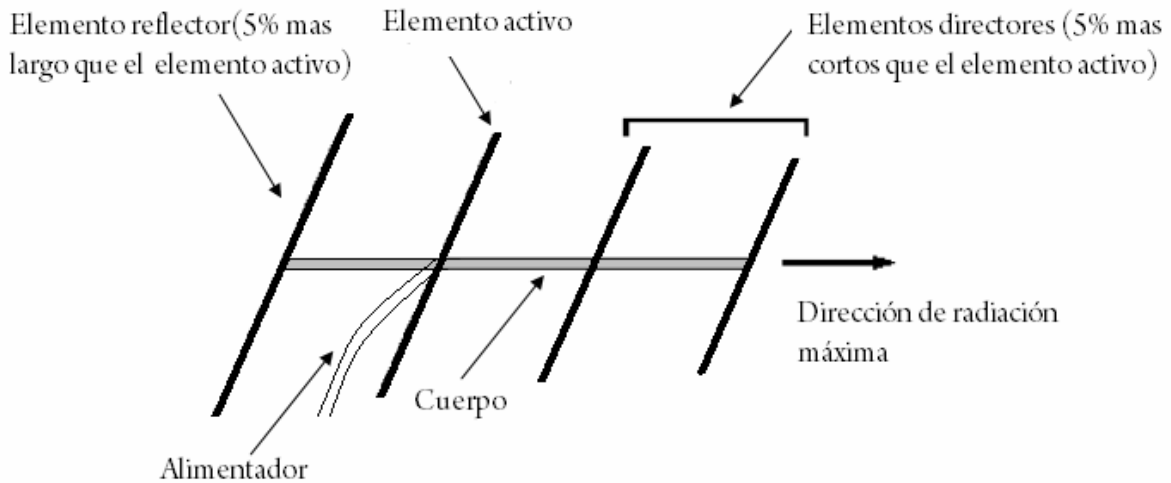
Antena YAGI

Las antenas Yagi, conocidas también como Yagi-Uda, nombrada así gracias a su inventor el Dr. Hidetsugu Yagi y su ayudante, el Dr. Shintaro, han sido muy utilizadas en aplicaciones tales como recepción de señales de TV en las bandas de VHF y UHF, y en repetidores en las bandas de telefonía celular. Estas antenas son estructuras fabricadas con múltiples elementos, donde cada elemento tiene su propia distribución de corriente [14].

Las antenas Yagi se pueden encontrar de diversos tipos, estas están constituidas como mínimo de dos a tres elementos. Estos elementos con lo que están compuestas las antenas Yagi son filamentos de alambre, llamados dipolos, entre los cuales hay un elemento activo que va en el medio, un dipolo reflector que está detrás del radiador y un dipolo director frente del dipolo activo [11]. Sus elementos se caracterizan y se diferencian entre ellos, siendo el elemento director más corto que el elemento radiador, mientras que el elemento reflector es más largo. La forma en la que se encuentran organizados estos elementos hace que la energía que irradia la antena se concentre en una sola dirección. El elemento activo o excitador es el elemento que se encuentra conectado a la red de alimentación y los parásitos reciben energía a través de este, como se muestra en la figura 6.

El elemento parásito ubicado detrás del reflector, ubicado detrás del elemento activo, es un elemento que refleja la potencia que este último irradia hacia atrás. En principio puede haber más de uno de estos elementos reflectores ubicados del mismo lado del excitador, con iguales longitudes y espacios entre ellos. Los otros elementos parásitos, los elementos directores, los cuales se encuentran montados del otro lado del elemento activo (adelante), tienden a concentrar la potencia radiada en la dirección de estos, y de aquí esta su nombre [14].

Figura 6. Elementos de la antena YAGI



Fuente: Autor del proyecto

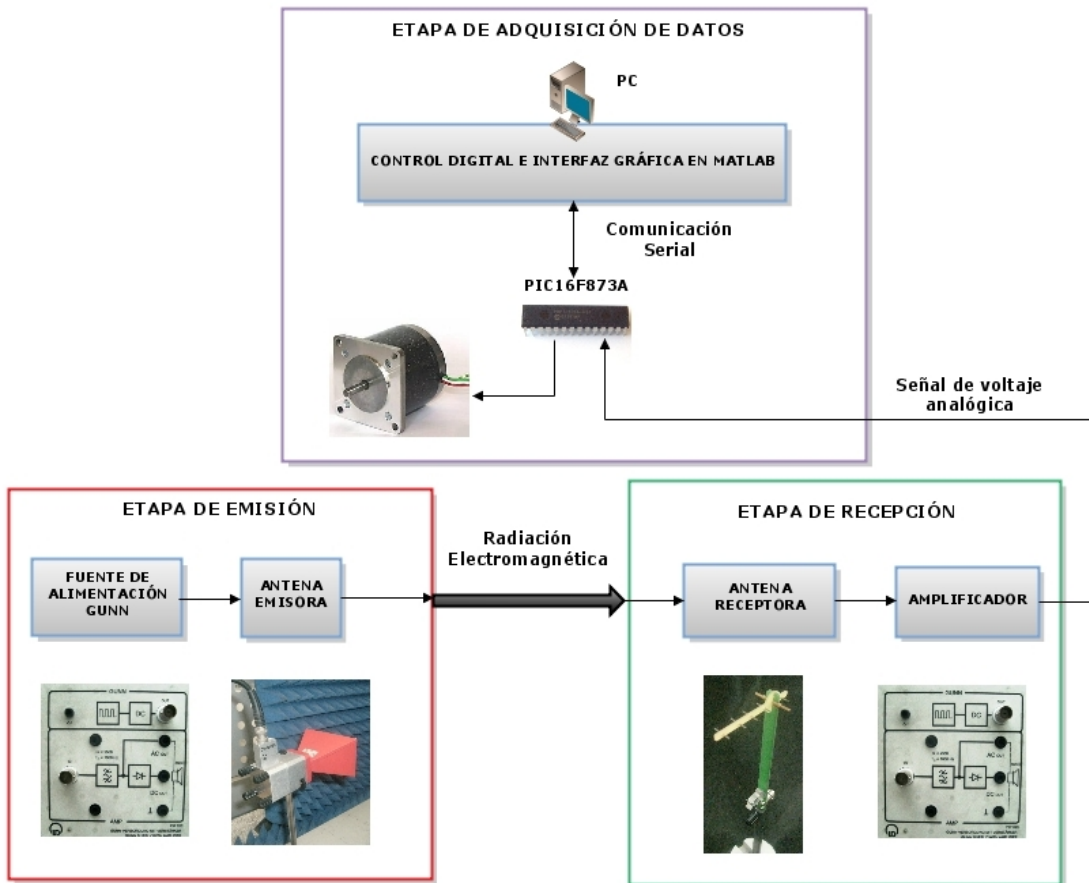
2. SISTEMA DE ANTENAS EMISOR/RECEPTOR

El sistema implementado para la generación de los diagramas de radiación de la antena YAGI a la frecuencia de 9.4 GHz , se dividió en tres etapas: emisión, recepción y adquisición. Se busca a partir del funcionamiento de dicho sistema, obtener los diagramas de radiación en los planos H , E y a su vez generar el patrón de radiación tridimensional de la antena YAGI.

2.1 Descripción de las etapas implementadas

A continuación se presentará un diagrama de bloques para comprender el funcionamiento del prototipo a desarrollar (ver figura 7). Luego se describirán cada una de las etapas que lo constituyen.

Figura 7. Diagrama de bloques general



Fuente: Autor del proyecto

2.1.1 Etapa de emisión

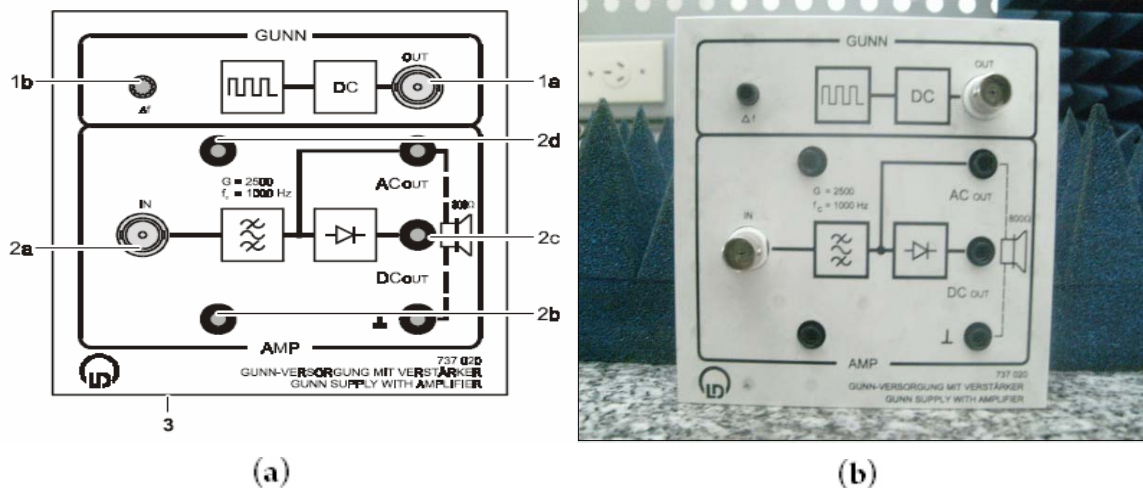
Por medio de esta etapa serán transmitidas señales electromagnéticas a partir de una antena tipo bocina y una fuente de alimentación Gunn, oscilador Gunn.

Fuente de alimentación GUNN

La fuente de alimentación Gunn (Ver figura 8) con amplificador está compuesta de dos módulos:

- La fuente de alimentación Gunn (GUNN) sirve para alimentar con tensión al oscilador Gunn (Ver Figura 9). Aquí se superpone, a una tensión continua de alimentación, una pequeña tensión alterna con frecuencia regulable. De este modo las microondas radiadas por el oscilador Gunn sufren una modulación de amplitud.
- En el amplificador (AMP) se realiza una amplificación de tensión alterna de banda estrecha de las señales de recepción, provenientes de la antena receptora, a un nivel de fácil y a pesar que con frecuencia las señales de recepción son débiles, también se pueda realizar ensayos con microondas en campo abierto. La salida AC permite la reproducción acústica de la señal de recepción amplificada a través de un altavoz externo. La salida DC permite la conexión de un voltímetro externo para ensayos cuantitativos. Una fuente de corriente integrada suministra la corriente de polarización requerida por el diodo detector de la sonda de campo eléctrico.

Figura 8 .Fuente de alimentación GUNN



Fuente: LD-Didactic

Fuente: Autor del proyecto

1. **Fuente de alimentación Gunn (GUNN):** Conexión para el oscilador Gunn (1a), Ajustador de frecuencia para la señal de modulación (1b); **2. Amplificador (AMP):** Conexión para la sonda de campo eléctrico (2a), hembra para conexión a tierra (2b), salida DC del amplificador (2c), salida AC del amplificador (2d); **3. Conexión para el adaptador de alimentación.**

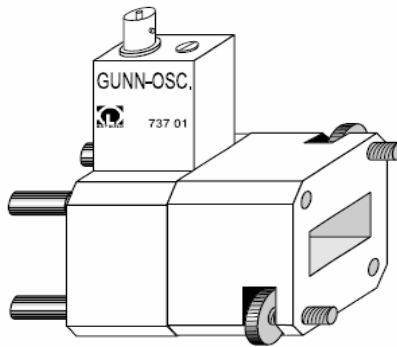
En la tabla se especifican los parámetros de la fuente de alimentación Gunn.

Tabla 3. Datos técnicos de la fuente de alimentación GUNN

DATOS TÉCNICOS					
GUNN		AMPLIFICADOR		DATOS GENERALES	
PARAMETRO O ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	PARAMETRO O ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	PARAMETRO O ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Tensión de salida	-9 V	Ganancia	2500	Tensión de servicio	12 V AC, 48 a 62 Hz (del adaptador de alimentación)
Corriente de salida	> 200 mA con componente de c.a. sobrepuesta, a prueba de cortocircuito	Frecuencia media	aprox. 1000 Hz	Consumo de potencia	aprox. 2 W.
Modulación	interna AM, frecuencia regulable aprox. de 0,7 a 3 kHz	Suministro corriente polarización	10 μ A	Dimensiones	115 mm \times 115 mm \times 55 mm
		Entrada	hembrilla BNC	Peso	Aproximadamente. 150 g.
Salida	hembrilla BNC	Salidas	hembrillas de 4 mm		

Fuente: LD-Didactic

Figura 9. Oscilador GUNN



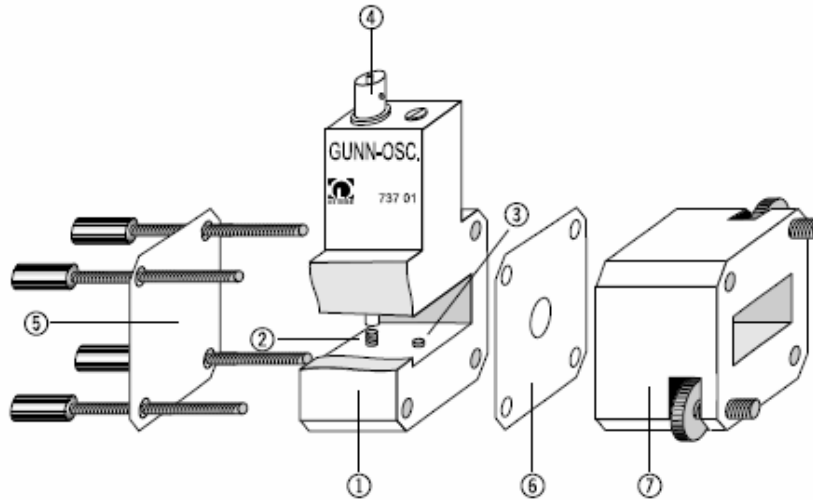
Fuente: LD-Didactic

Descripción

Para el experimento a realizar, el oscilador Gunn es el encargado de generar señales en microondas para la frecuencia fija de 9.40 GHz .

El oscilador puede ser desmontado por el usuario en cuatro partes, de tal manera que se puedan realizar modificaciones parciales con otros fines experimentales. Las cuatro partes componentes, enlazadas mediante elementos de conexión rápidos, son las siguientes: módulo diodo Gunn, la pared posterior, un diafragma con abertura y un adaptador (ver figura 10).

Figura 10 .Componentes del oscilador Gunn



Fuente: LD-Didactic

1. Modulo de diodo Gunn con: 2. Espigas metálicas (incluyen el diodo Gunn); 3. Tornillo de sintonía dieléctrica; 4. Conector hembra BNC; 5. Pared posterior de la carcasa; 6. Diafragma perforado; 7. Adaptador.

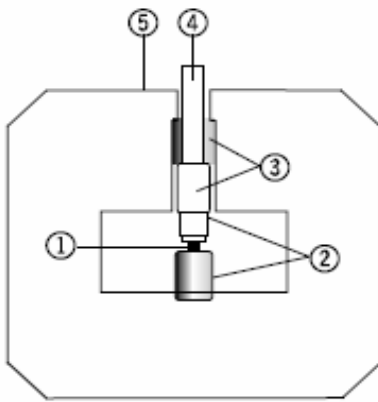
El circuito de c.c. (ver Figura 11) recorre el interior del conductor (polo negativo) del conector coaxial BNC hembra, el interior del conductor del filtro de paso bajo coaxial y la parte superior de la barra metálica hacia el diodo Gunn, y desde allí a través de la parte inferior de la barra metálica hacia la estructura de la cavidad. La disipación de calor del diodo Gunn se lleva a cabo mediante la parte inferior de la barra metálica hacia la carcasa.

La estructura del filtro de paso bajo se puede observar en la Figura 11. Este filtro impide que una parte de la potencia de microondas generada en el diodo Gunn fluya a través del circuito de c.c. Está compuesto de dos segmentos de línea en cascada, las cuales poseen impedancias características de línea muy diferentes y son aproximadamente iguales a $1/4$ de la frecuencia de operación de 9,40 GHz.

De este modo se consigue que la señal de microondas en la juntura entre la línea coaxial y la guía de ondas casi se cortocircuite.

Antes de que el oscilador sea suministrado se ha sintonizado la frecuencia con precisión mediante el ajuste de la profundidad de inmersión del tornillo de sintonía dieléctrico. Por lo tanto, el usuario no está autorizado para ajustar posteriormente la profundidad de inmersión.

Figura 11. Circuito de c.c. del oscilador Gunn



1. Diodo Gunn; 2. Parte inferior y superior de la espiga metálica; 3. Pasabaja; 4. Conductor interior del conector hembra BNC; 5. conductor exterior del conector hembra BNC.

Fuente: Hoja de datos del fabricante

Tabla 4. Datos técnicos del oscilador Gunn

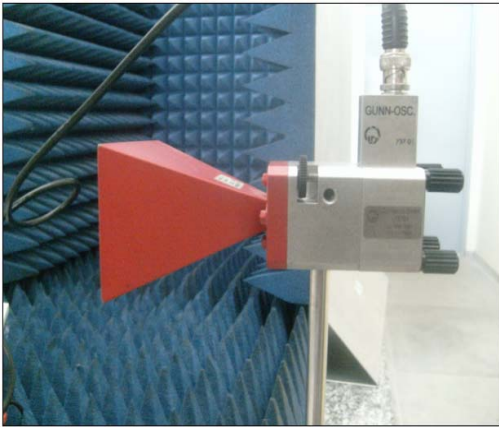
DATOS TÉCNICOS	
PARAMETRO O ELEMENTO	PARAMETRO O ELEMENTO
Tensión de c.c de operación del diodo Gunn	8 hasta 10 V
Corriente continua de operación	115 hasta 150 mA
Frecuencia de la señal de microondas	9.40(+, - 0.002) GHz
Potencia de microondas	6dBm
Supresión de las señales armónicas	30dBm
Supresión de las señales no armónicas	50dBm
Eficiencia del oscilador	Aprox. 1%
Perdidas de potencia	Aprox. 1W

Fuente: LD-didactic

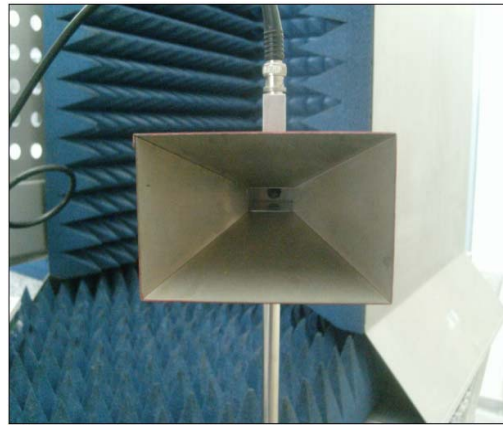
Antena emisora

El elemento emisor que se utilizó para enviar las señales electromagnéticas a través del espacio libre es una antena de bocina grande piramidal (ver imagen 1).

Imagen 1. Antena emisora



(a)



(b)

Fuente: Autor del proyecto

Aunque existen antenas de bocinas muy grandes, también se encuentran bocinas de tamaños muy diferentes, desde pequeñas bocinas de apenas una longitud de onda en su apertura hasta centenares de longitudes de onda. La bocina es una extensión natural de la guía de onda. La mayoría de las bocinas se les da la forma simplemente por un ensanchamiento graduable de las dimensiones de las guías de onda, manteniendo las características de campo del modo principal de la guía [1].

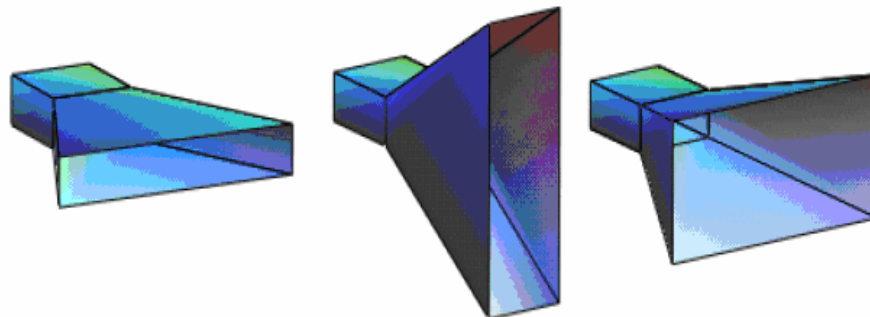
Una bocina electromagnética es una antena que se utiliza de forma generalizada a frecuencias de microondas, por sus características de gran ancho de banda y por su facilidad de construcción y diseño [2].

También se utiliza como antena individual, en forma de agrupaciones, o como alimentador primario de reflectores o lentes.

Una bocina se alimenta a partir de una guía de onda que propaga uno o varios modos. Las dimensiones van aumentando progresivamente hasta que la apertura equivalente tenga unas dimensiones suficientes para conseguir la directividad deseada [2].

La bocina piramidal y la bocina cónica son las más utilizadas, la primera se conecta a una guía rectangular y la segunda a una guía circular. Las guías de onda rectangulares que propagan el modo fundamental TE (Transversal Electromagnético), se pueden abrir en el plano horizontal dando lugar a las denominadas bocinas de plano \vec{H} (Ver Figura 12a); en el plano vertical, formando las bocinas de plano \vec{E} (Ver Figura 12b); o bien en ambos planos simultáneamente dando lugar a las bocinas piramidales (Ver Figura 12c). La directividad de las bocinas dependen de que tan abierta esta su boca [1].

Figura 12 .Tipos de Bocinas



a. Bocina de plano H

b. Bocina de plano E

c. Bocina Piramidal

Fuente: [2]

Tabla 5. Datos técnicos de la antena emisora

DATOS TÉCNICOS	
PARAMETRO O ELEMENTO	PARAMETRO O ELEMENTO
Rango de frecuencia	8-12 GHz
Tipo de guía de onda	R 100
Ganancia a 9.4 GHz	15 dB
Dimensiones	98mm x 58mm x 77mm

Fuente: LD-Didactic

2.1.2 Etapa de recepción

Esta etapa se implementó a partir de una antena receptora tipo YAGI diseñada para trabajar en la frecuencia de 9.4 GHz, el microcontrolador PIC16F8736A y la interfaz gráfica implementada en Guide de MatlaB.

Antena receptora

La señal electromagnética transmitida por la antena tipo bocina , es recibida de manera simultanea por una antena tipo YAGI a una frecuencia de 9.4 GHz(ver imagen 2).

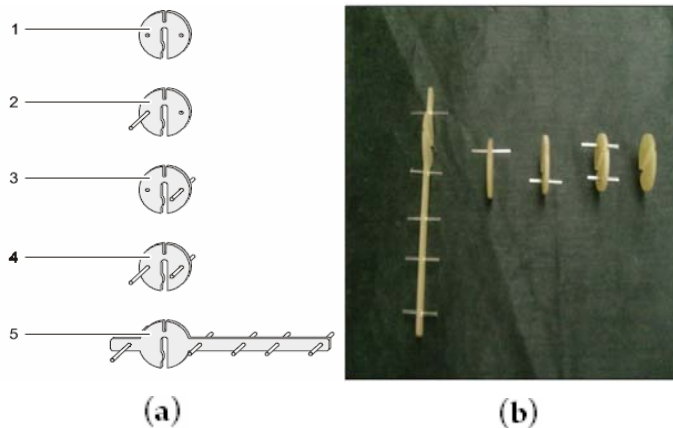
Imagen 2 .Antena receptora



Fuente: Autor del proyecto

Conociendo con anterioridad que la antena YAGI se divide principalmente en tres elementos: activo, director y reflector (Ver Ítem 2.1.4), se pueden realizar diferentes pruebas con la antena YAGI, variando el número de elementos reflectores y directores (Ver figura 13).

Figura 13 .Configuraciones de la antena YAGI

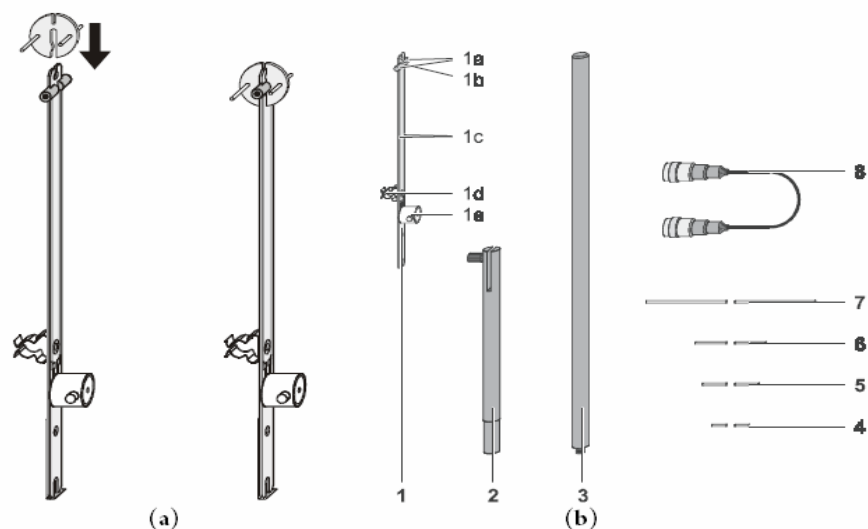


1. Retenedor vacío; 2. Retenedor con reflector; 3. Retenedor con director; 4. Retenedor con 1 reflector y 1 director; 5. Retenedor con 1 reflector y 4 directores

Fuente: LD-Didactic

Fuente: Autor del proyecto

Figura 14 .Soporte de la antena YAGI



(a) ensamblaje de la antena en el soporte

(b) elementos del soporte:

1. Varilla de antena con dipolo $\lambda/2$ y diodo detector dipolo $\lambda/2$ (1a), diodo detector (1b), bandas de grafito (1c), pinza (1d), hembrilla BNC (1e) ;2 .Soporte de antena para diagramas horizontales;3. Soporte de antena para diagramas verticales; 4. Extensión para dipolo 1λ ; 5. Extensión para dipolo $3/2\lambda$; 6. Extensión para dipolo 2λ ; 7. Extensión para dipolo 4λ ; 8. Cable HF, 0,25 m

Fuente: LD-Didactic

Descripción

El juego de antenas de dipolo es un kit de antenas modular para construir antenas de dipolo de diferente longitud ($\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, 2λ , 4λ). Las longitudes reales de los dipolos consideran el efecto de acortamiento de las antenas gruesas y por ello son más cortas que lo que corresponde a un múltiplo de la mitad de longitud de onda en el espacio libre.

La tensión de salida de la antena de dipolo es proporcional al cuadrado del valor absoluto de la intensidad del campo eléctrico en los campos de microondas de densidad de potencia, tal como se genera al emplear el oscilador Gunn. Con el

diodo detector, se demodulan las oscilaciones de alta frecuencia de las microondas en la señal de recepción.

Debido al diodo detector integrado, la antena trabaja exclusivamente en el modo de recepción y no puede ser utilizada como antena emisora.

En la siguiente tabla encontraremos las características generales de la respectiva antena(Ver tabla 6).

Tabla 6. Datos técnicos del soporte de la antena YAGI.

DATOS TÉCNICOS	
PARAMETRO O ELEMENTO	DESCRIPCION
Frecuencia	9,40 GHz
Diodo detector	Silicon Low Barrier Schottky
Consumo de corriente de polarización	10 mA

Fuente: LD-Didactic

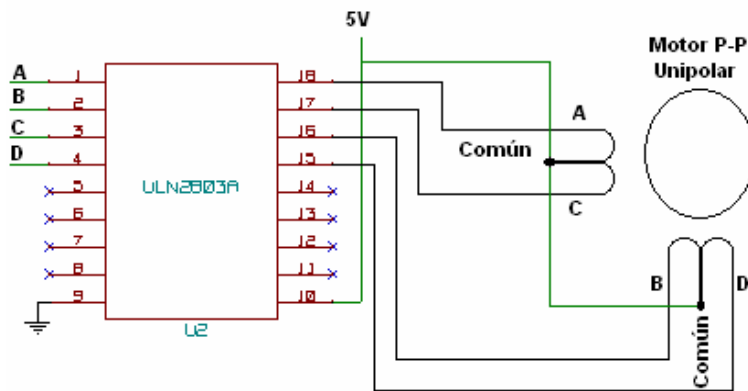
Motor paso a paso Unipolar

Los motores paso a paso son usualmente utilizados para construir mecanismos que requieren movimientos muy precisos. Se caracterizan principalmente por realizar un paso a la vez por cada pulso aplicado. Este paso puede variar desde 90° hasta 1.8°, es decir, que se necesitarán 4 pasos para 90° y 200 para 1.8°, para completar un giro completo de 360°.

Estos motores tienen la habilidad de quedar enclavados en una posición o estar totalmente libres. Esto depende si una o más de sus bobinas están energizadas o por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

El motor unipolar suele tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su tipo de conexión interna. En la figura 15 se aprecia la conexión utilizada para controlar el motor paso a paso unipolar mediante el uso de un integrado (ULN2803A). Las entradas de activación (A, B, C y D) pueden ser directamente activadas por un microcontrolador (PIC16F873A).

Figura 15 .Circuito de conexión Motor Paso a Paso



Fuente: Autor del proyecto

El motor paso a paso empleado para el posicionamiento de la antena es un motor unipolar de 6 cables. Las especificaciones se presentan a continuación:

Tabla 7. Especificaciones del motor

Descripción del modelo:	stepper
Título:	Astrosyn Miniangle Stepper Motor
Descripción:	3.5 V/PHASE, 1.4 A/PHASE, 1.8 DEG/STEP, 23LM-K303-02 ASTROSYN Miniangle Stepper Motor.
Nombre del proveedor:	MINEBEA CO., LTD
Número de pieza del proveedor:	23LM-K303-02

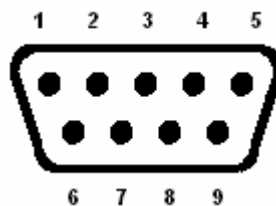
Fuente: Hoja de datos del fabricante

Comunicación Serial

El puerto serial (Ver figura 16) de las computadoras es conocido como puerto RS-232, la ventaja de este puerto es que muchas computadoras traen al menos un puerto serial. Este permite la comunicación entre otros dispositivos tales como otra computadora, el mouse, impresora y microcontroladores.

A pesar de estar cayendo en desuso, este puerto sigue siendo muy utilizado en las comunicaciones de las cajas registradoras, visores, impresoras de tickets y unidades lectoras/grabadoras de EPROM y en general para las conexiones de configuración de numerosos dispositivos. Existen también adaptadores de COM 9 a COM 25 [15].

Figura 16 .Configuración de pines del puerto serial



1. Detección de portadora (Señal de entrada), 2. Recibir datos (Señal de entrada), 3. Transmitir datos (Señal de salida), 4. Terminal de datos listo (Señal de salida), 5. Tierra (Referencias para señales), 6. Equipo de datos listo (Señal de entrada), 7. Solicitud de envío (Señal de salida), 8. Libre para envío (Señal de entrada), 9. Indicador de llamada (Señal de entrada)

Fuente: Autor del proyecto

▪ **Tipos de Comunicación Serial**

Existen dos tipos de comunicación serial: la síncrona y asíncrona.

La comunicación serial síncrona además de una línea sobre la cual se transmitirán los datos se necesita de una línea la cual contendrá los pulsos de reloj que indicaran cuando un dato es válido [15].

En la comunicación serial asíncrona, no son necesarios los pulsos de reloj. La duración de cada bit esta determinada por la velocidad con la cual se realiza la transferencia de datos [15].

Para que una comunicación serial se lleve a cabo, el transmisor y el receptor deberán tener los mismos parámetros de velocidad, paridad, número de bits del dato transmitido y de BIT de parada [15].

En circuitos digitales, cuando se hace comunicación a distancias cortas, se pueden hacer transmisiones en niveles lógicos TTL (0-5V). Pero cuando las distancias aumentan, estas señales tienden a distorsionarse debido al efecto capacitivo de los conductores y su resistencia eléctrica. El efecto se incrementa a medida que se incrementa la velocidad de la transmisión [15].

Todo esto origina que los datos recibidos nos sean igual a los datos transmitidos, por lo que no se puede permitir la transferencia de datos.

Una de las soluciones más lógica es aumentar los márgenes de voltaje con que se transmiten los datos, de tal manera que las perturbaciones a causa de la línea se pueda corregir [15].

- **Norma RS-232**

Debido a la amplia variedad de equipos, sistemas y protocolos existentes surgió la necesidad de un acuerdo que permitiera a los equipos de varios fabricantes comunicarse entre sí. *Electronics Industry Association* elaboró la norma RS-232, la cual define la interfase mecánica, los pines, las señales y los protocolos que debe cumplir la comunicación serial. Todas las normas RS-232 cumplen con los siguientes niveles de voltaje [15]:

- Un 1 lógico es un voltaje comprendido entre $-5v$ y $-15v$ en el transmisor y entre $-3v$ y $-25v$ en el receptor.
- Un 0 lógico es un voltaje comprendido entre $+5v$ y $+15v$ en el trasmisor y entre $+3v$ y $+25 v$ en el receptor.

El envío de niveles lógicos (bits) a través de cables o líneas de transmisión necesita la conversión a voltajes apropiados. En los microcontroladores para representar un 0 lógico se trabaja con voltajes inferiores a $0.8v$, y para un 1 lógico con voltajes mayores a $2.0V$. En general cuando se trabaja con familias TTL y CMOS se asume que un 0 lógico es igual a cero Volts y un 1 lógico es igual a cinco Volts [15].

La importancia de conocer esta norma, radica en los niveles de voltaje que maneja el puerto serial del ordenador, ya que son diferentes a los que utilizan los microcontroladores y los demás circuitos integrados. Por lo tanto se necesita de una interfase que haga posible la conversión de niveles de voltaje a los estándares manejados por los CI TTL [15].

2.1.3 Control software y hardware

La etapa de adquisición de datos está conformada por la interfaz de comunicación serial entre el microcontrolador *PIC16F873A* y el puerto *RS232* del computador. Las señales de voltaje que se generan en los terminales de la antena YAGI, son los valores que determinan el diagrama de radiación con respecto a la posiciones angulares, sean para el plano *E* o *H*. Estas señales son recibidas por la etapa de conversión analógica/digital del microcontrolador, en el tiempo transcurrido entre paso y paso del movimiento angular.

A partir de MatlaB, se implementó una interfaz gráfica en la herramienta GUIDE, para adquirir los datos binarios que se transmiten desde el microcontrolador al puerto *RS232*. Para así, graficar en tiempo real los diagramas de radiación generados para los planos *E* y *H* de la antena.

Controlador de posicionamiento de la antena YAGI

A partir de un juego reductor de engranajes se logró obtener un paso mínimo del movimiento angular de la antena, aproximadamente, la cuarta parte de la resolución mínima del paso del motor, 1.8° .

El microcontrolador *PIC16F873A* fue programado en lenguaje ensamblador para realizar la secuencia del movimiento angular del motor. Se programó una opción para el cambio de velocidad del motor entre pasos, también la opción para girar a la derecha o izquierda el eje del motor para posicionar la antena Yagi de tal forma que quede alineada con la antena transmisora.

Desde la interfaz gráfica se controla el inicio del movimiento angular del motor y la toma de datos. Al activar esta instrucción automáticamente comienza a graficarse el patrón de radiación en el plano deseado, sea los planos *E* o *H*.

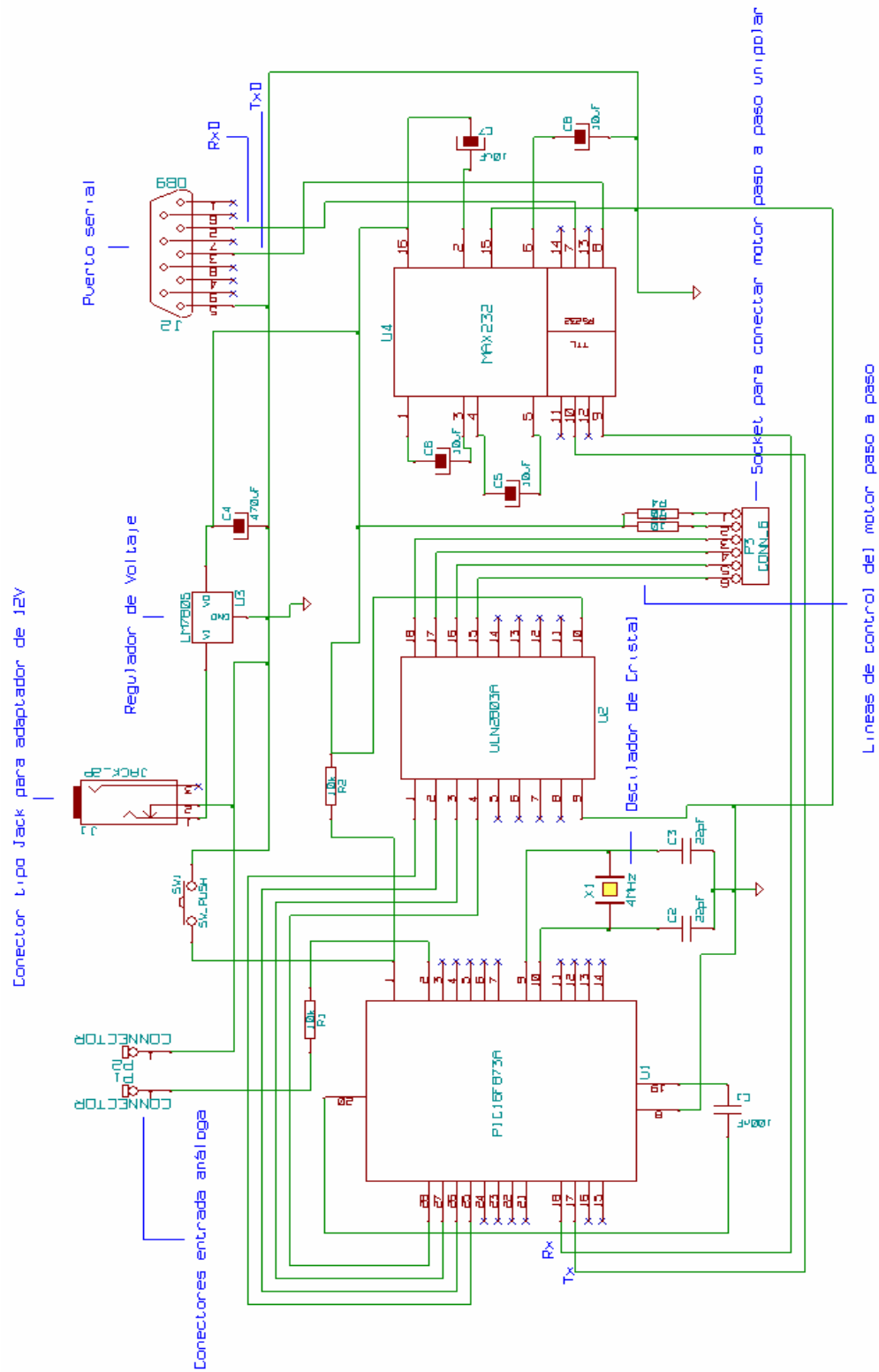
Control electrónico para el posicionamiento de la antena receptora

La electrónica implementada para controlar el posicionamiento del motor paso a paso y realizar la respectiva adquisición de datos desde el computador, se llevó a cabo de la siguiente forma: El circuito final o PCB, se ajustó por medio de una serie de elementos integrados, tales como un *PIC16F873A*, un *ULN2803A* y un *MAX232*, entre los demás elementos encontramos condensadores electrolíticos y cerámicos, resistencias, un regulador de voltaje *L7805* y un oscilador de cristal de 4 MHz (Ver figura 17).

Para controlar el motor paso a paso y la transmisión y recepción de datos con el computador se especificaron los pines externos que interconectan el microcontrolador con el ULN2803A y el MAX232. Los cuatro pines externos del microcontrolador (25,26,27,28), los cuales fueron programados como pines de salida de datos , se interconectan físicamente con el integrado ULN2803A que actúa como buffer de corriente entre el microcontrolador y el motor paso a paso, igualmente necesario para la compatibilidad de voltajes.

Los pines externos 17 y 18 del microcontrolador, se habilitaron para la transmisión y recepción de datos serial. Estos fueron conectados físicamente con los pines 10 y 9 del integrado MAX232. Los pines externos 7 y 8 del circuito integrado MAX232, están conectados directamente a los pines 2 y 3 del puerto serial para la transmisión y recepción de datos entre el microcontrolador y el computador.

Figura 17. Esquemático del circuito



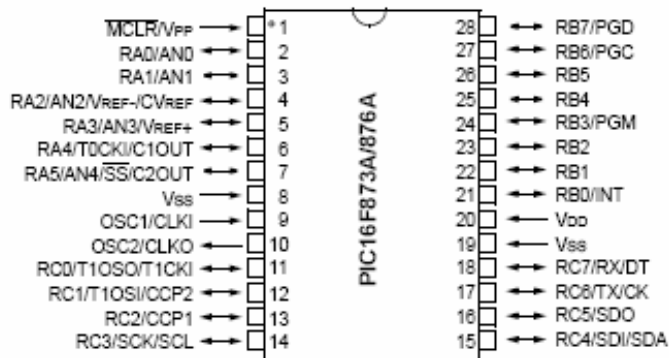
Fuente: Autor del proyecto

Especificaciones de los elementos del circuito

- **Microcontrolador PIC16F873A**

El microcontrolador PIC16F873A (ver figura 18) de Microchip cuenta con un conjunto de 35 instrucciones de 16 bits. Este microcontrolador es catalogado como dispositivo de gamma media con respecto a la arquitectura RISC.

Figura 18. Configuración de pines del microcontrolador PIC16F873A



Fuente: Microchip

Tabla 8. Características del microcontrolador PIC16F873A

CARACTERISTICAS	VALOR
Frecuencia de operación	DC – 20 MHz
Memoria de programa FLASH	4K
Memoria de datos(Bytes)	192
Memoria EEPROM(Bytes)	128
Fuentes de interrupción	14
Puertos de entrada/salida	A,B,C
Instrucciones	35
Temporizadores	3
Módulos de PWM	2
Comunicaciones seriales	MSSP, USART
Canales de conversión Analógica-Digital	5 canales de 10 bits

Fuente: Microchip

- **ULN2803A**

El integrado ULN2803A es un arreglo de 8 transistores tipo Darlington con emisores común y diodos de supresión integral para cargas inductivas.

Cada transistor tipo Darlington soporta picos de corriente 600 mA (500mA continua) y puede soportar hasta 50V en estado apagado. Las salidas pueden estar en paralelo para mayor capacidad de corriente.

El ULN2803A tiene una resistencia de entrada de 27K para 5V TTL y CMOS (Ver figura 21).

Figura 19 .Configuración de conexión de pines del integrado ULN2803A

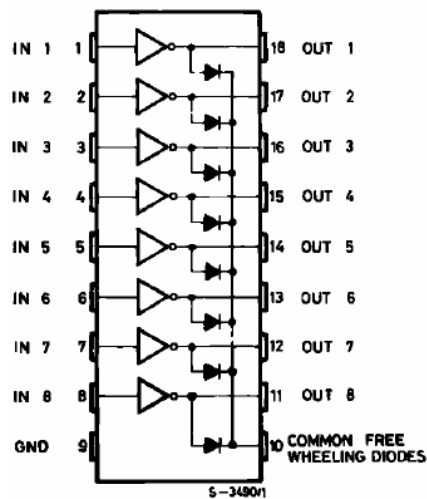
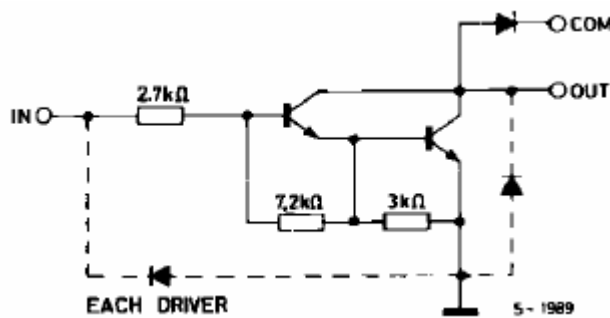


Figura 20 .Configuración del transistor Darlington en el integrado ULN2803A



Fuente: Hoja de datos del fabricante

- **Manejador RS-232**

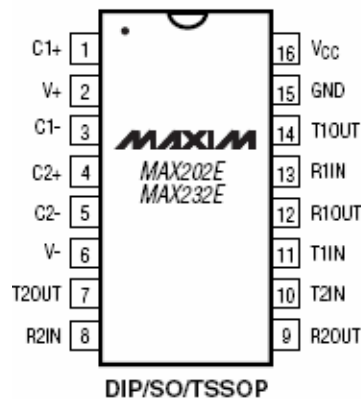
Para comunicar la interfaz gráfica, desde la cual se realizan las mediciones de la antena y el control de la aplicación mecánica, se utilizó transmisión serial de datos mediante código ASCII. Por tal razón, se escogió el estándar de comunicación RS-232.

Para garantizar la compatibilidad entre los niveles de voltaje con que operan el sistema con el computador, se utilizó un manejador de dicho estándar como lo determina el circuito estándar integrado MAX232 que se conectó directamente a los terminales de comunicación serial (USART) del microcontrolador.

Este circuito integrado soluciona los problemas de niveles de voltaje cuando se requiere enviar unas señales digitales sobre una línea RS-232.

Este chip se utiliza en aquellas aplicaciones donde no se dispone de fuentes dobles de +12 y -12 Volts. El MAX 232 necesita solamente una fuente de +5V para su operación, internamente tiene un elevador de voltaje que convierte el voltaje de +5V al de doble polaridad de +12V y -12V. Cabe mencionar que existen una gran variedad de CI que cumplen con la norma RS-232 como lo son: MAX220, DS14C232, MAX233, LT1180A.

Figura 21. Configuración de pines de integrado MAX232



Fuente: Hoja de datos del fabricante

Tabla 9. Descripción de pines del circuito del integrado MAX232

PIN	NOMBRE	FUNCIÓN
DIP/SO/TSSOP		
1,3	C1+,C1-	Terminales para cargas positivas
2	V+	+2Vcc Voltaje generado por la carga
4,5	C2+,C2-	Terminales para cargas negativas
6	V-	+2Vcc Voltaje generado por la carga
7,14	T_OUT	Dispositivo de Salida del RS-232
8,13	R_IN	Entrada receptora del RS-232
9,12	R_OUT	Salida receptora del RS-232
10,11	T_IN	Dispositivo de entrada del RS-232
15	GND	Tierra
16	Vcc	+4.5V a +5.5V Voltaje de entrada

Fuente: Hoja de datos del fabricante

Descripción de la interfaz gráfica GUIDE en MATLAB

MatlaB es una excelente herramienta de programación, siendo de esta forma útil para la adquisición de datos y la indicada para la realización de la interfaz gráfica en la cual se representaron los patrones de radiación de los planos *E*, *H* y el patrón 3D de la antena YAGI.

La interfaz gráfica desarrollada para la generación de dichos patrones de radiación, se llevó a cabo por un paquete de programación gráfica que incluye MatlaB en sus librerías con el nombre de GUIDE, el cual por medio de diferentes elementos se le dio forma a la interfaz gráfica, siendo aplicada para conocer en tiempo real los resultados del patrón de radiación en cada uno de los planos nombrados anteriormente.

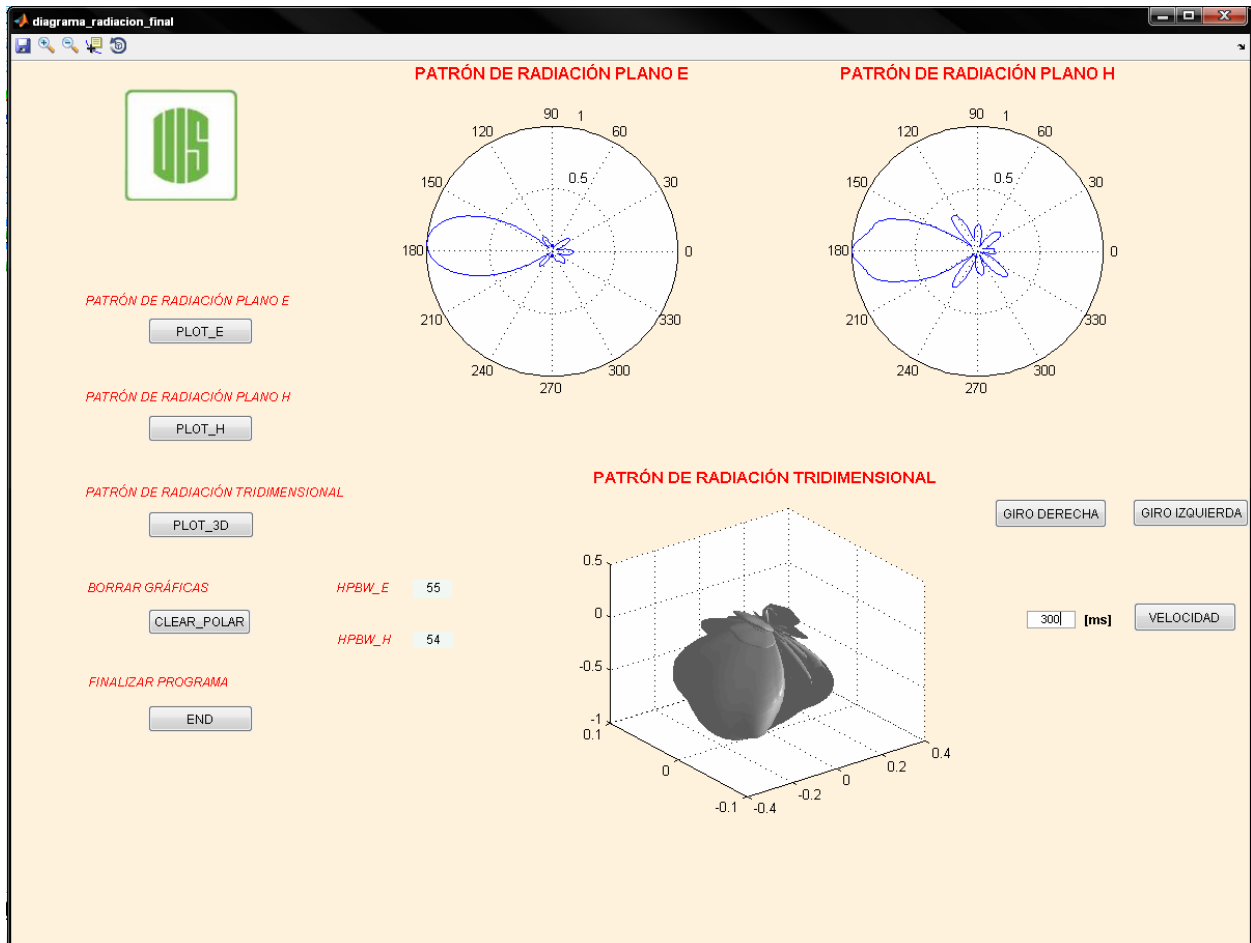
La interfaz grafica desarrollada se observa a continuación en las imágenes 3 y 4.

Imagen 3. Ventana de presentación de la interfaz grafica



Fuente: Autor del proyecto

Imagen 4 .Graficas de los patrones de radiación de los planos E, H y 3D



Fuente: Autor del proyecto

Esta interfaz gráfica se compone principalmente de tres axes gráficos (graficar planos E, H y hacer un superficie del patrón de energía), un *pushbutton* (Plano_E) para dar la orden al programa de graficar el plano E, un *pushbutton* (Plano_H) para dar la orden al programa de graficar el plano H y un *pushbutton* (Plot_3D) para dar la orden de hacer la superficie del patrón de energía (una vez graficados los planos E y H).

En los axes para el plano E y el plano H se observa como se gráfica dichos patrones en tiempo real.

Para el cambio de velocidad del motor entre pasos, también se adicionó un *push button* (Velocidad) , el cual se encarga de enviar el valor digitado dentro de un *text edit* , dicho valor representa la velocidad entre pasos del motor y a su vez el tiempo de conversión análogo-digital de señal entrada.

Para alinear la antena emisora con la antena receptora, se realizaron dos instrucciones, ya sea para girar la antena hacia la derecha con el push button (Derecha) o girar la antena hacia la izquierda con el push button (Izquierda).

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para realizar el montaje experimental del sistema de antenas, se requirió de una implementación de una base rotatoria que consta de un juego de engranes adaptado al motor paso a paso, el cual le brinda un movimiento angular a un eje tubular que sostiene la antena y adicionalmente un soporte sobre dicho eje que permite colocar la antena Yagi en dos posiciones diferentes (Horizontal y vertical) (Ver Imagen 5).

Imagen 5. Implementación de la base rotatoria



Fuente: Autor del proyecto

Teniendo constituida la base rotatoria con todos sus elementos, se ubicó la antena Yagi para realizar la toma de datos. La toma de datos se dividió en dos partes:

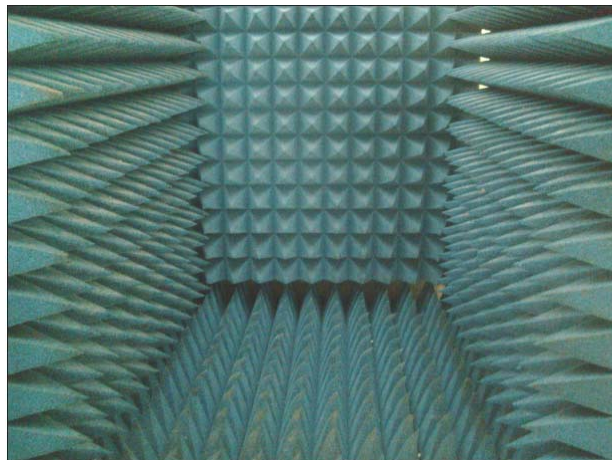
- Medidas del patrón de radiación con la antena bocina vertical y la antena Yagi horizontal.
- Medidas del patrón de radiación con la antena bocina horizontal y la antena Yagi Vertical.

Para la toma de medidas se tuvieron en cuenta los siguientes pasos:

1. Adecuación del ambiente

En la mayoría de los casos se desarrollan las pruebas en condiciones controladas, para este caso se utiliza una cámara anecoica o un juego de absorbedores de noppen, para evitar que la señal electromagnética se refleje en cualquier superficie cercana a la antena y señales electromagnéticas provenientes de otras fuentes (Ver Imagen 6). La cámara anecoica se conforma de 6 Placas absorbedoras de aproximadamente 500x500x100 (mm), 3 placas de éstas con portadoras metálicas.

Imagen 6 .Cámara anecoica



Fuente: Autor del proyecto

Se realizó el montaje sobre un mesón, en el cual se ubicó la cámara anecoica y dentro de ésta se instaló la base giratoria con la respectiva antena receptora.

2. Al finalizar el acondicionamiento del entorno de trabajo para realizar el montaje en condiciones óptimas, se hizo el conexionado de cada uno de los instrumentos entre sí y ubicando las antenas a distancias adecuadas para quedar alineadas y garantizar la toma de medidas en distancias para el campo lejano.

Los instrumentos o elementos necesarios para llevar a cabo el montaje son:

- 2 fuentes de alimentación Gunn (ver ítem 2.1.1).

Para hacer las pruebas la distancia de separación mínima a la cual se deben ubicar la antena emisora y la antena receptora es de $0.84[m]$, teniendo en cuenta que esta separación es para un dipolo $\lambda/2$. Debido a que los cables BNC tienen una longitud máxima de $2[m]$ y cada vez aumenta la separación entre las antenas para hacer las respectivas medidas de los patrones de radiación en el campo cercano, se utiliza una fuente de alimentación Gunn para generar la señales de alimentación al oscilador Gunn, mientras que la otra fuente de alimentación se utiliza para conectar la salida de la antena receptora y así, hacer las respectivas mediciones.

- Antena de bocina grande (ver ítem 2.1.1)
- Kit de antena Yagi (ver ítem 2.1.2)
- Cables BNC
- Soportes para antena bocina

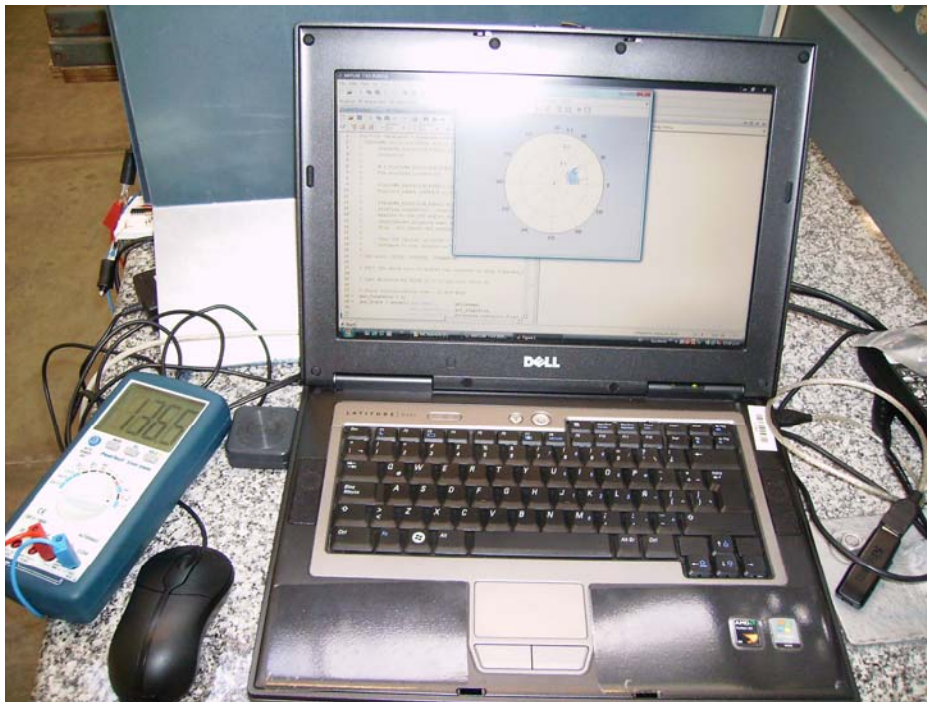
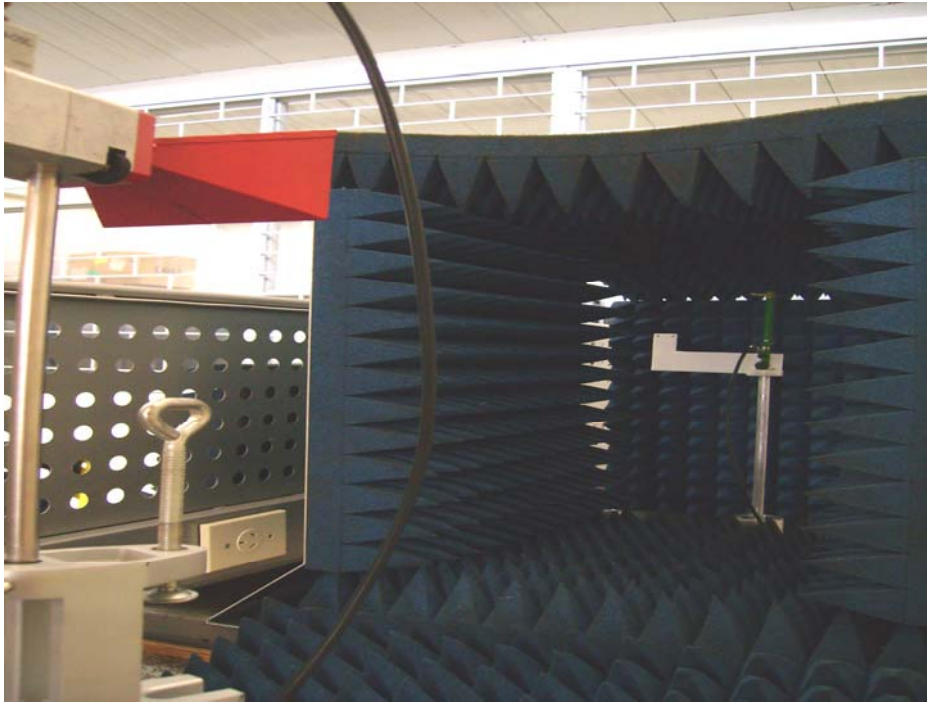
3. Se realizó la conexión desde los pines 2,3 y 5(GND) del puerto serial del computador a los pines 7 y 8 del circuito integrado MAX232 para la transmisión y

recepción de valores digitales. De esta forma, se garantizó el funcionamiento del motor paso a paso y la obtención de las señales provenientes del convertidor análogo-digital del microcontrolador que contenían los valores de los patrones de radiación.

4. Con la herramienta de programación gráfica GUIDE de MatlaB y la interfaz gráfica realizada se ejecutó el programa, graficando en tiempo real tanto el patrón de radiación del plano E y plano H. Una vez se obtuvo estos dos patrones graficados, se generó el patrón de Intensidad de potencia en 3D.

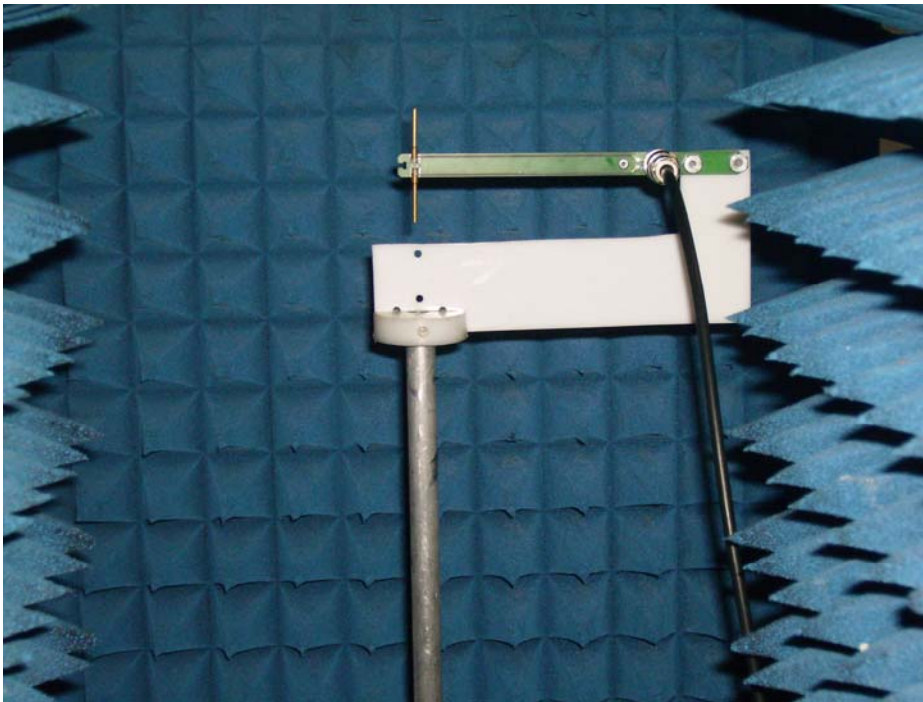
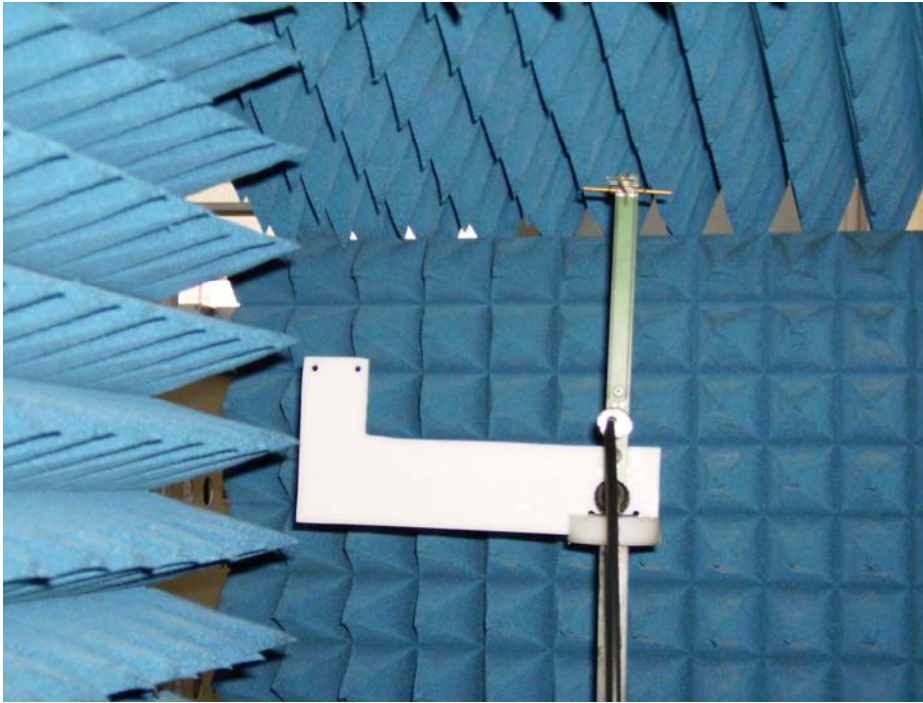
Una vez terminado el montaje experimental (Ver imagen 7) se procedió a la realización de toma de medidas ubicando la antena de forma horizontal y forma vertical (Ver imagen 8).

Imagen 7. Montaje experimental



Fuente: Autor del proyecto

Imagen 8 . Montaje experimental



Fuente: Autor del proyecto

4. RESULTADO EXPERIMENTAL

Determinación de los patrones de radiación de los planos E, planos H y Tridimensional, para diferentes configuraciones de la antena receptora.

Se realizó el montaje de la antena Yagi, utilizando elementos parásitos para realizar diferentes configuraciones, las cuales se lograron cambiando el número de elementos directores y reflectores, con un dipolo como elemento activo de longitud $\lambda/2$, donde también la longitud del dipolo activo se puede variar para diferentes longitudes múltiplos del dipolo $\lambda/2$.

El centro de la antena emisora se ubicó frontalmente al centro del dipolo activo de la antena Yagi, con el fin de partir la medición desde un punto de referencia y obtener mejores medidas desde el punto de vista de radiación.

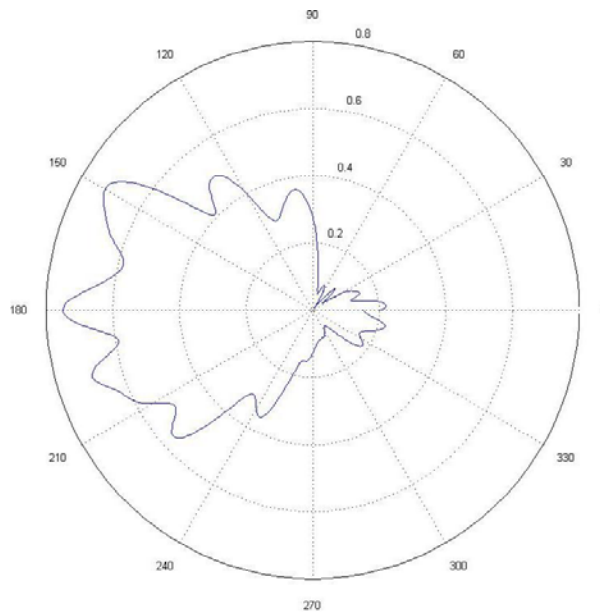
Con el cambio de la configuración de la antena Yagi y a partir del barrido angular tomando la radiación electromagnética para los planos E, planos H y haciendo un suavizado de las mismas, se obtuvieron las siguientes graficas:

Dipolo $\lambda/2$ (antena Yagi con un director)

Cuando se realizó la configuración de la antena Yagi, con su elemento básico activo de longitud $\lambda/2$ y un elemento director, se ajustó dicha configuración de la antena sobre la base giratoria, para luego realizar el patrón de radiación del plano H de la antena Yagi (ver figura 22). El diagrama de radiación nos mostró que no hay directividad sobre dicho plano, debido a que el lóbulo que contiene el punto de mayor concentración de energía no sobresale con respecto a los lóbulos secundarios. Pero el elemento parásito, ubicado delante del elemento activo, muestra cierta proporción de energía sobre su orientación. Según la geometría

del diagrama de radiación la energía incidente sobre la antena Yagi no es uniforme.

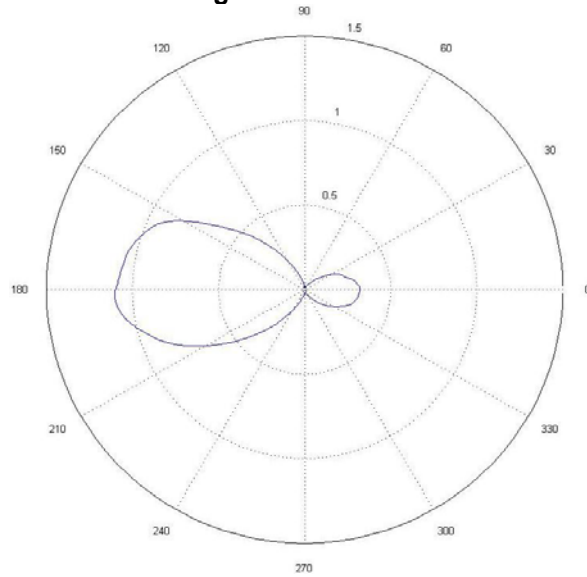
Figura 22 .Plano H



Fuente: Autor del proyecto

El patrón de radiación presentado en el plano E (ver figura 23), muestra como hay mayor concentración de energía con respecto a la orientación del elemento parasito, de igual forma hay gran directividad y ganancia de energía. La forma como influye el aumento de elementos directores sobre el diagrama de radiación de la antena, está directamente relacionada con el mejoramiento de la directividad de la antena con respecto a la directividad de la antena emisora. Explícitamente, para que estas características en los diagramas de radiación se hagan más notorias, se deben cumplir ciertas condiciones físicas con respecto a las distancias a las que se ubican cada uno de los elementos parásitos con respecto al elemento activo. Con los datos experimentales obtenidos en el diagrama de radiación del plano E, se determinó que el valor del Ancho de haz de potencia media (HPBW *Half-power bandwidth*) horizontal es 76.0974° (grados).

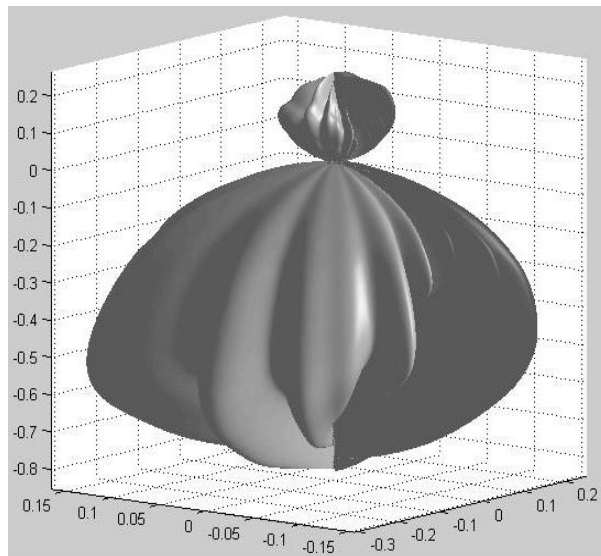
Figura 23 Plano E



Fuente: Autor del proyecto

El patrón de radiación tridimensional es la representación de intensidad de energía con respecto a las posiciones angulares (θ, ϕ) . A partir de los planos E y H de la antena, se realiza el sólido de revolución obteniendo el diagrama tridimensional (ver figura 24).

Figura 24 .Patrón de energía tridimensional

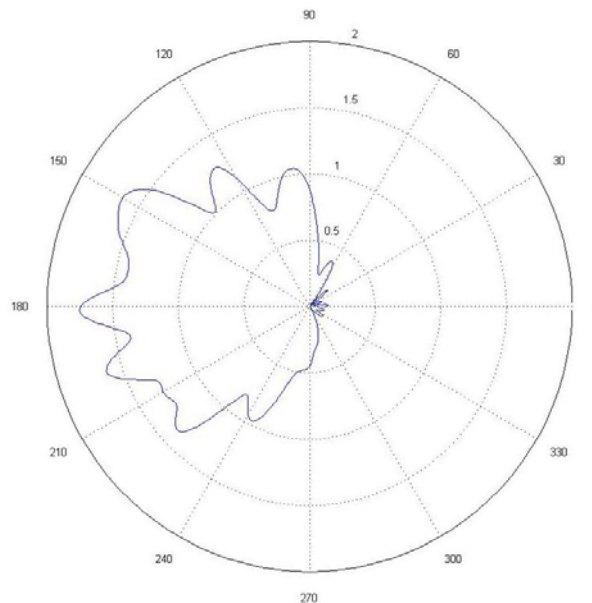


Fuente: Autor del proyecto

Dipolo λ (antena Yagi con un director)

Observando el diagrama de radiación que se obtuvo en el plano H para esta configuración (ver figura 25), se encontró gran similitud con el diagrama de radiación del plano H de la configuración de la antena Yagi con un elemento activo de longitud $\lambda/2$ y un director como elemento parasito. La diferencia es que la energía recibida con esta configuración es mayor con respecto a la configuración anterior. También, los diagramas de radiación de las dos configuraciones aquí nombradas, no cuentan con un lóbulo principal que defina la directividad de energía en este plano.

Figura 25. Plano H

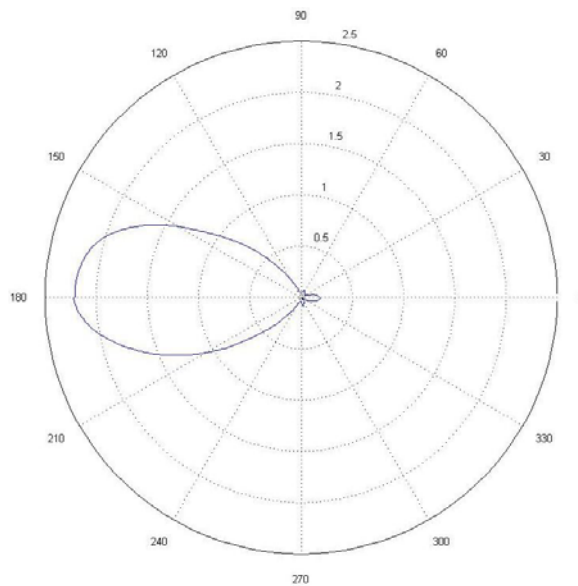


Fuente: Autor del proyecto

El diagrama de radiación obtenido para plano E (ver figura 26), muestra un diagrama de radiación con su lóbulo principal y sus lóbulos secundarios mejor definidos. La mayor cantidad de energía para esta configuración se presenta en la orientación del dipolo director. Esto implica que la longitud del dipolo activo y sus

elementos parásitos son de vital importancia para darle orientación a la radiación que incide sobre la antena, de igual forma define la cantidad de energía que se puede hacer concentrar sobre la misma. Con los datos experimentales obtenidos en el diagrama de radiación del plano E, se determinó que el valor del Ancho de haz de potencia media horizontal es 64.8237° (grados).

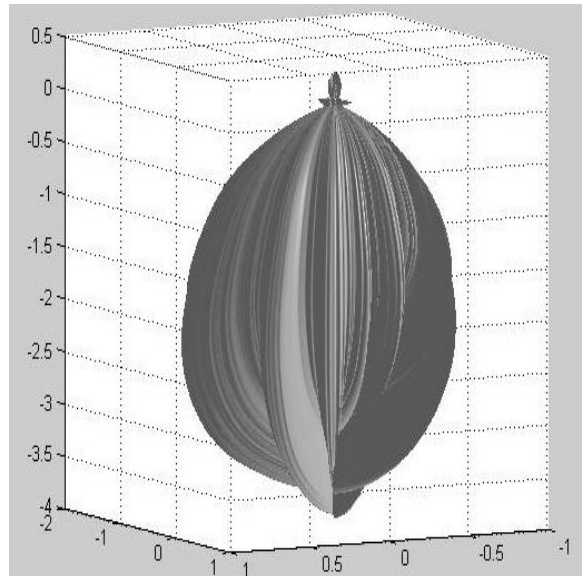
Figura 26. Plano E



Fuente: Autor del proyecto

El diagrama tridimensional de energía (ver figura 27) muestra dicha forma por la distribución de energía que presentan los patrones de radiación en los planos E y H con respecto a las posiciones angulares (θ, ϕ) de la respectiva configuración de la antena Yagi. Para el diagrama tridimensional de dicha configuración se tienden a observar cierta directividad del diagrama, pero este es opacado por el componente de radiación del plano H.

Figura 27. Patrón de energía tridimensional

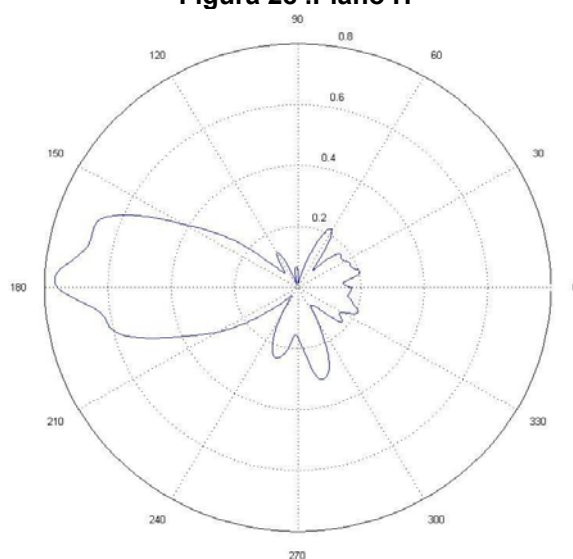


Fuente: Autor del proyecto

Dipolo 2λ (antena Yagi con 4 directores y un reflector)

Para la configuración de la antena receptora, teniendo un dipolo activo con longitud de 2λ , cuatro elementos directores y un elemento reflector, se observó que la mayor cantidad de energía sobre la antena receptora se presentó aproximadamente sobre el punto en el cual los cuatro elementos directores se alinearon con la antena emisora. Algunos de los lóbulos secundarios no se generaron de forma simétrica (ver figura 24), este fenómeno habitualmente se presenta por reflexiones parasitas sobre los elementos o el dipolo activo de la antena. El entorno en el cual la antena estaba siendo probada fue recubierto por almohadillas antirreflejos o comúnmente llamadas cámaras anecoicas. Se determinó que el valor del Ancho de haz de potencia media vertical es 55.1605° (grados).

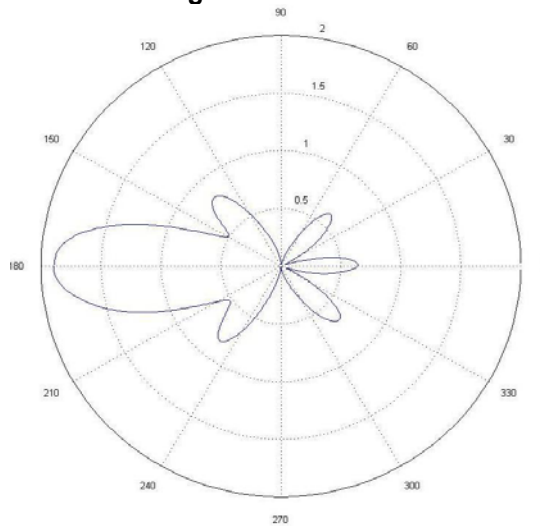
Figura 28 .Plano H



Fuente: Autor del proyecto

El diagrama de radiación en el plano E para una longitud del dipolo de 2λ , cuatro elementos directores y un elemento reflectores (ver figura 25), muestra como el lóbulo principal presenta a una mejor directiva y ganancia con respecto al diagrama de radiación del plano E para una configuración de la antena Yagi con una longitud de elemento activo de $\lambda/2$ y un elemento director. Esto demuestra la importancia de los elementos directores sobre el mejoramiento de la directividad del lóbulo principal del diagrama de radiación. Esto hace que la señal recibida de la fuente de radiación sea precisa y evitar interferencias electromagnéticas sobre el diagrama de radiación. Para los datos obtenidos en la medición del diagrama de radiación se obtuvo que el valor del Ancho de haz de potencia media horizontal es 41.8737° (grados).

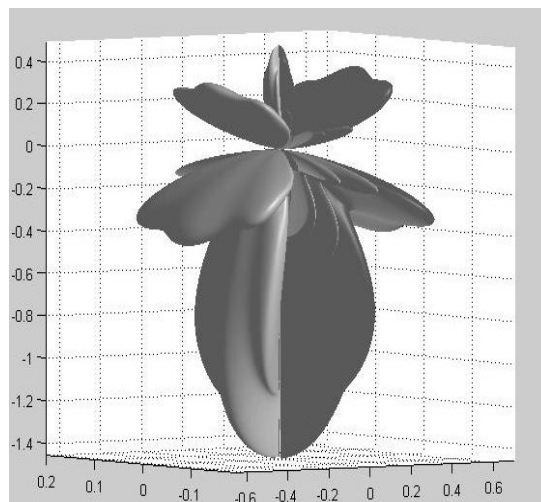
Figura 29. Plano E



Fuente: Autor del proyecto

Como ultima gráfica se determinó el patrón de energía tridimensional de la antena Yagi, con un dipolo activo de longitud 2λ , cuatro elementos directores y un elemento reflector. Esta reconstrucción tridimensional del patrón de energía de la antena se obtuvo tomando los cortes o planos E y H, haciendo un sólido de revolución entre ambos planos (ver figura 26), en este caso se puede reconocer mejor la directividad que presenta esta configuración.

Figura 30 Patrón de energía tridimensional



Fuente: Autor del proyecto

5. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Este trabajo resultó de la idea de aprovechar los materiales sobre antenas en el rango de microondas, en especial el kit de antenas Yagi, que se encuentran en los laboratorios avanzados de física, con el fin de realizar material didáctico para las prácticas de laboratorios en telecomunicaciones.

- Se implementó un sistema portátil capaz de adquirir, almacenar, visualizar en tiempo real, los patrones de radiación de la antena Yagi en los planos E y H, de igual forma se obtuvo el patrón tridimensional de radiación de intensidad de potencia.
- Se implementó una base rotatoria para el movimiento angular de la antena receptora tipo Yagi. Esta antena trabaja exclusivamente en la frecuencia de 9.4GHz.
- Cuando se graficaron los diagramas de radiación para las diferentes longitudes de dipolos, se comprobó que para un misma longitud del dipolo al alejar la antena de recepción de la antena de emisión el ancho del haz del lóbulo primario y por supuesto de los lóbulos subsecuentes de cada patrón de radiación en el plano E y plano H se volvían más angostos. Por tal razón en el patrón de radiación de intensidad en 3D era mucho más notorio ésta característica.
- Cuando se hicieron diferentes configuraciones con el kit de la antena Yagi cambiando las longitudes físicas de los dipolos, dichos patrones de radiación para cada uno de los casos, presentaban cambios en la posición angular donde se encontraban sus lóbulos principales y respectivamente, las formas de dichos patrones cambiaban considerablemente en sus formas.

- Se comprobaron tres características fundamentales en los diagramas de radiación con respecto a la longitud del dipolo activo y los dipolos parásitos, como también del número de estos que conforman la configuración:

- 1) Cuando la longitud de un elemento parasito y el elemento activo son iguales, el diagrama de radiación es casi simétrico.
- 2) Cuando un elemento parasito es de longitud ligeramente superior a la del elemento activo produce un máximo en la dirección del activo, por lo tanto dicho elemento se le da el nombre de reflector.
- 3) Cuando un elemento parásito es de longitud ligeramente inferior a la longitud del elemento activo, se produce un máximo en la dirección del elemento parásito por lo que este ejerce la función del elemento director.

- La velocidad del motor paso a paso y el ángulo de paso del motor fueron parámetros indispensables para realizar un barrido angular lo suficientemente satisfactorio para obtener la mayor cantidad de valores posibles de la fuente receptora y así obtener graficas continuas y claras de los patrones de radiación.

- El conector metálico BNC que sirve de acople por medio de un cable coaxial entre la etapa de recepción de la fuente de alimentación Gunn y la etapa electrónica de la antena Yagi que soporta la recepción de la señal microondas proveniente de la antena tipo bocina, se encuentra muy cercano a la antena receptora. Esto influyó en reflexiones parasitas sobre la misma antena haciendo que la distribución de energía sobre ciertas regiones del patrón de radiación sean desproporcionales con respecto a otras áreas, en tales casos la energía se debió distribuir en iguales proporciones.

- La realización de este trabajo como proyecto de grado permitirá que estudiantes de Física e ingenierías aborden este tipo de temas para desarrollo de futuros

proyectos y sea material didáctico que ayude a proyectar sus conocimientos en investigación relacionada a las telecomunicaciones.

6. RECOMENDACIONES

- Estudiar e investigar ampliamente en el área de las telecomunicaciones las aplicaciones que se pueden desarrollar en el rango de las frecuencias microondas desde el ámbito universitario.
- Cuando se ejecute las instrucciones para graficar los diagramas de radiación desde la interfaz gráfica, lo más favorable es permitir que el barrido de la antena se desarrolle completamente sobre los 360°. Debido a que al forzar el programa a detener dicha operación, genera conflicto entre el puerto serial y la aplicación, por lo tanto se está forzado a cerrar MatlaB, para que al iniciar nuevamente la aplicación no exista conflicto alguno en el protocolo de comunicación.
- Al momento de realizar pruebas de transmisión y recepción de señales a niveles de frecuencias microondas, hay que garantizar el control del ambiente en el cual se van a realizar las medidas con las antenas, para evitar interferencias electromagnéticas provenientes de otras fuentes, como también evitar reflexiones con objetos estáticos y objetos en movimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

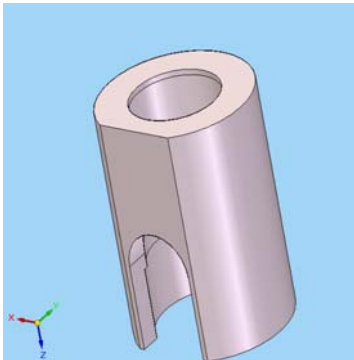
1. M. Ferrando, Alejandro Valero, "Antenas", CDROM Dep. Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia. Ediciones UPV, 2001.
2. O. Ledezma, A. Patiño, H. Peña, "Patrones de radiación de antenas de bocina", Universidad de Pamplona, Grupo de Óptica Moderna, Universidad de Pamplona, Revista Colombiana de tecnología de Avanzada, ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 - Número 10 - Año 2007
3. IRPA9, International Radiation Protection Association, "RF and Microwave Measurement", Ninth International Congress of the International Radiation Protection Association, Vienna, Austria, April 17, R-07, 1996.
4. Proyecto de marco regulatorio sobre límites de la exposición humana a campos electromagnéticos en servicios de telecomunicaciones. Comisión de regulación de telecomunicaciones – CRT
5. Federal Communications Commission (FCC). Questions and Answers about Biological Effects and Potential Hazards of Radiofrequency Electromagnetic Fields. OET Bulletin 56. Agosto 1999.
6. J. M. Miranda, J. Margineda y otros, "Ingeniería de Microondas. Técnicas Experimentales". Prentice Hall (2002).
7. E. Jordan, K. Balman, "Ondas electromagnéticas y sistema radiantes", Segunda edición, Parafino, Madrid, 1978.
8. A. Cardama, L.I. Jofre, J. Romeu, S. Blanch, M. Ferrando, "Antenas", Ediciones UPC, 2ª Edición, 2002.

9. <http://www.guw.cl/sitio/images/stories/articulos/image5.jpg>
10. D.K. Cheng, "Fundamentos de electromagnetismo para Ingeniería", Addison-Wesley Iberoamérica, Wilmington, Delaware, 1997.
11. José de Rúgeles "Radioenlaces", Especialización en telecomunicaciones, Escuela de Ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, UIS, 2007.
12. José Miguel Miranda, José Luis Sebastian, Manuel Sierra, José Margineda, "Ingeniería de Microondas – Técnicas Experimentales"
13. Constantine A. Balanis, Antenna Theory – Analysis And Design ,Third Edition
14. Daniel José Martínez Agudelo , simulación, implementación y puesta a punto de una antena Yagi de 4 elementos a 1.2GHz: el método de los momentos (MoM), trabajo de grado UIS, 2007
15. Eric, López Pérez, "Tutorial Protocolo RS-232", Teoría y Aplicaciones, 2008.
16. Radiation Protection Bureau of Health Canada " Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz," Safety Code 6, 1999.

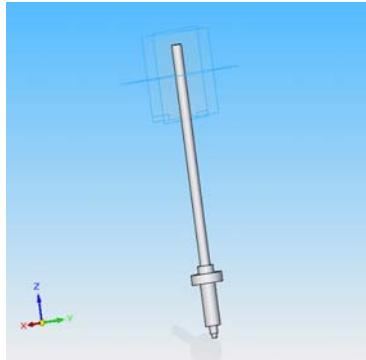
8. ANEXO A

Piezas de la base rotatoria

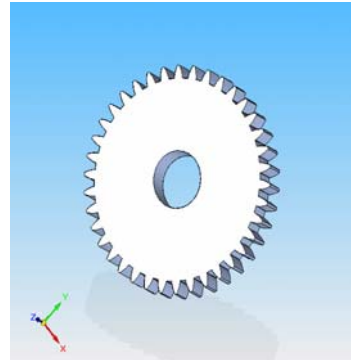
Soporte del eje central



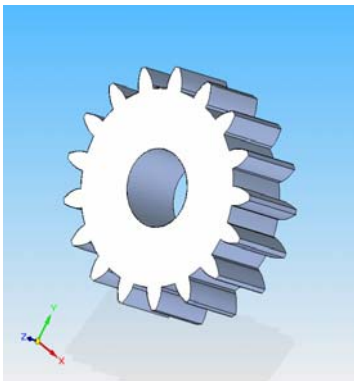
Eje central rotatorio



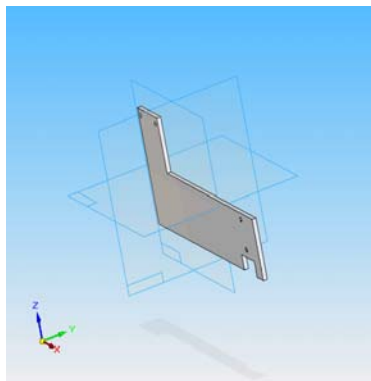
Engranaje central



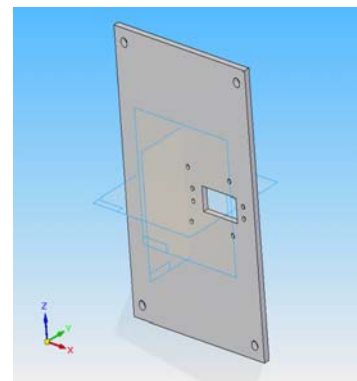
Engranaje reductor



Soporte de la antena



Soporte principal



Base del soporte de la antena

