

**DISEÑO ANTENA HELICOIDAL RECEPTORA DE VIDEO DE AERONAVE NO
TRIPULADA (UAV) EN LA ENAP**

EDIER AUGUSTO TELLO APONTE

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
2011**

**DISEÑO ANTENA DIRECCIONAL RECEPTORA DE VIDEO DE AERONAVE NO
TRIPULADA (UAV) EN LA ENAP**

EDIER AUGUSTO TELLO APONTE

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director:

WILLIAM CUADRADO CANO
Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
2011**

Cartagena de Indias, D. T y C. Diciembre 2011

Señores

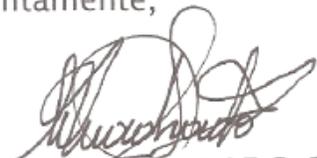
**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÈCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÒNICA
Cartagena**

Cordial saludo.

Por medio de la presente me permito someter a su consideración el Informe final del proyecto de tesis titulado “**DISEÑO DE ANTENA HELICOIDAL RECEPTORA DE VIDEO DE AERONAVE NO TRIPULADA (UAV) EN LA ENAP**”, desarrollado por el estudiante Edier Augusto Tello Aponte, como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico, en la cual me desempeño cumpliendo la función de Director.

Atentamente,

Atentamente,



WILLIAM CUADRADO CANO
Ingeniero Electricista (UTB)
MSc. Ciencias Computacionales

Cartagena de Indias, D. T y C. . Diciembre de 2011

Señores

COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
Cartagena.

Cordial saludo.

Por medio de la presente estamos haciéndoles entrega del Anteproyecto titulado **“DISEÑO DE ANTENA HELICOIDAL RECEPTORA DE VIDEO DE AERONAVE NO TRIPULADA (UAV) EN LA ENAP.”**, como requisito reglamentario para elaborar trabajo de grado y optar al título de Ingeniero Electrónico.

Atentamente,



EDIER AUGUSTO TELLO APONTE

Código: 200304014

CC. 73214054

Cartagena de Indias, D. T y C. diciembre de 2011

Señores

COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Cartagena.

Cordial saludo.

Nos permitimos comunicarles que el estudiante **EDIER AUGUSTO TELLO APONTE**, realizó en esta institución su trabajo de grado titulado **“DISEÑO DE ANTENA HELICOIDAL RECEPTORA DE VIDEO DE AERONAVE NO TRIPULADA (UAV) EN LA ENAP.”**, requisito exigido por la universidad para otorgarle su título profesional.

La Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla ENAP le proporcionó al estudiante toda la colaboración necesaria para dar cumplimiento hasta el final a su proyecto de grado.



Capitán de Fragata GERMAN GARCIA CASTELLANOS
Decano Facultad Ingeniería Naval



Carta cesión de derechos patrimoniales

Cartagena de Indias, D.T.y C. 2011

Yo, **EDIER AUGUSTO TELLO APONTE**, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado **“DISEÑO DE ANTENA HELICOIDAL RECEPTORA DE VIDEO DE AERONAVE NO TRIPULADA (UAV)** producto de mi actividad académica para optar el título de **INGENIERO ELECTRÓNICO** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En consecuencia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

EDIER AUGUSTO TELLO APONTE

Código: 200304014

CC. 73214054

Campus de Manga: Calle del Bouquet Cra. 21 No. 25-92 PBX (5) 660 6041 Fax: (5) 6604317
Campus de ternera: Parque Industrial y Tecnológico Carlos Vélez Pombo
PBX: (5) 6535200 Fax: 6619240

ARTICULO 23

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en los trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral, y porque las tesis no contengan ataques personales contra nadie, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y justicia”

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C. _____

Este trabajo producto de mi esfuerzo lo dedico:

A Dios, pues está presente en todo

A mi madre quien se ha esmerado por sacar a sus hijos adelante y ha servido como inspiración de mi humanidad.

A mi querido hermano quien ha estado apoyándome y sirviéndome de ejemplo digno de ser seguido.

A mi amada pues su paciencia y apoyo fueron vitales.

A ellos, mi familia, pues en ellos lo tengo todo.

EDIER AUGUSTO TELLO APONTE

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

El señor Luis Armando Galvis Aponte, quien me orientó en el manejo de datos estadísticos.

El señor William Cuadrado Cano, quien gracias a su experiencia en el campo de las comunicaciones me asesoró en el desarrollo del presente trabajo de grado

El señor Ricardo Javier Arjona quien aportó una perspectiva complementaria para el desarrollo del proyecto presente

El señor Edgar Ortiz, profesor de la Universidad del Cauca, me asesoró en la fundamentación teórica del presente trabajo de grado

Ellos y a quienes de alguna forma hicieron su aporte durante el desarrollo del proyecto de tesis, Mil gracias, su apoyo fue valioso.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN EJECUTIVO	
INTRODUCCIÓN	
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.3 JUSTIFICACIÓN	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo general	24
1.4.2 Objetivos específicos	24
1.5 DISEÑO METODOLÓGICO	24
2 MARCO REFERENCIAL	26
2.1 ANTECEDENTES	26
2.2 MARCO TEÓRICO	26
2.2.1 Clasificación clásica de las antenas	28
2.2.2 Clasificación funcional de las antenas	34
2.3 MARCO CONCEPTUAL	40
2.3.1 Diagrama de radiación o patrón de radiación	40
2.3.2 Ancho de banda	42
2.3.3 Directividad	42
2.3.4 Ganancia	42
2.3.5 Eficiencia (η)	43
2.3.6 Impedancia de entrada	43
2.3.7 Ancho de haz	44
2.3.8 Polarización	44
2.3.9 Relación delante/atrás	45
2.4 HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS	46
2.4.1 Coeficiente de correlación	46
2.4.2 Error cuadrático medio	46
2.4.3 Normalización de datos	47
3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA ANTENA HELICOIDAL	48
3.1 MODO NORMAL	50
3.2 MODO AXIAL	52
4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADOS	55

4.1	LABORATORIO DE PRUEBAS CASSY LAB	55
4.1.1	Componentes utilizados para montaje y pruebas	55
4.1.2	Configuración de la estación de medición	58
4.1.3	Procedimiento	59
4.2	SOFTWARE MATLAB.	61
4.2.1	Modos de ejecución de comandos y funciones	62
5	Descripción y operación del software de antenas helicoidales	63
5.1	DESCRIPCIÓN SOFTWARE <i>HELICOIDAL2</i>	63
5.2	DESCRIPCIÓN SOFTWARE GUIDE	67
5.3	DESCRIPCIÓN SOFTWARE DESIGNE	71
6	TOMA DE DATOS, ANÁLISIS DE PRUEBA DE ANTENAS YPRUEBA DEL SOFTWARE DE ANTENAS HELICOIDALES	74
6.1	DATOS TEÓRICOS	74
6.2	ANTENA HELICOIDAL DE REFERENCIA ENAP 9.4 GHZ.	77
6.3	ANTENA FABRICADA, ESCALADA DE 2.4GHZ 9.4 GHZ	81
6.3.1	Análisis comparativo entre datos teóricos y antena fabricada	81
6.3.2	Análisis comparativo entre antena fabricada y antena enap	85
6.4	DISEÑO ANTENA 2.4 GHZ	86
7	CONCLUSIONES	90
8	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA	92
	ANEXOS	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Antena monopolo vertical	28
Figura 2. Antena yagi	29
Figura 3. Antena espira	30
Figura 4. Antena helicoidal	30
Figura 5. Antena de apertura	31
Figura 6. Antena de array	32
Figura 7. Antena de foco primario	35
Figura 8. Antena offset	36
Figura 9. Antena bocina piramidal	37
Figura 10. Antena bocina cónica	37
Figura 11. Antena microcinta	38
Figura 12. Patrón de radiación	41
Figura 13. Descripción geométrica y analítica de una antena helicoidal	48
Figura 14. Dimensiones de la hélice, lazo y dipolo	50
Figura 15. Patrón de radiación en modo normal	51
Figura 16. Antena helicoidal en modo axial	52
Figura 17. Plataforma giratoria para antenas.	56
Figura 18. Oscilador gunn (1 737 01)	56
Figura 19. Modulador pin	57
Figura 20. Guías de ondas unidireccional.	57
Figura 21. Juego absorbente de microondas	58
Figura 22. Juego de antenas helicoidales.	58
Figura 23 Configuración de la estación de medición	59
Figura 24. Montaje del laboratorio, antena emisora (1) y antena receptora (2)	59
Figura 25. Características físicas de la antena prueba	60
Figura 26. Matlab	61
Figura 27. Parámetros entrada del programa helicoidal2	64
Figura 28. Patrón de radiación teórico, tridimensional, polar y rectangular	65
Figura 29. Cálculo de variables en command window	65
Figura 30. Patrón de radiación rectangular y polar teórico vs antena enap	66
Figura 31. Patrón de radiación rectangular y polar teórico vs antena	66

fabricada	
Figura 32. Presentación inicial interfaz gráfica	67
Figura 33. Menú desplegable para opciones graficas	68
Figura 34. Presentación opción 1. Patrón de radiación en forma tridimensional	69
Figura 35. Presentación opción 2. Patrón de radiación en forma polar	70
Figura 36. Presentación opción 3 patrón radiación forma rectangular	71
Figura 37. Parámetros entrada del programa diseñado	72
Figura 38. Ventana calculo variables del programa designe	73
Figura 39. Patrón de radiación teórico	75
Figura 40. Datos teóricos - campo eléctrico vs ángulo en radianes	75
Figura 41. Patrón de radiación teórico con línea de media potencia	76
Figura 42. Prueba antena ENAP	77
Figura 3 Patrón de radiación en forma rectangular y polar de la antena ENAP	78
Figura 43 Patrón teórico vs patrón práctico antena ENAP	79
Figura 44. Datos teóricos vs experimentales antena ENAP	80
Figura 45. Antena fabricada	80
Figura 46. Prueba antena fabricada	82
Figura 47. Patrón radiación antena escalada 2.4-9.4ghz en forma rectangular y polar	82
Figura 48. Datos teóricos vs experimentales antena fabricada	83
Figura 49. Patrón de radiación teórico vs patrón antena fabricada	84
Figura 50. Patrón de radiación antena ENAP vs patrón radiación antena fabricada	84
Figura 51. Patrón de Radiación simulado HFSS (Rojo) Vs Patrón Radiación experimental (azul)	84
Figura 52. Patrón de Radiación simulado HFSS (Rojo) Vs Patrón Radiación experimental (azul) <i>representación cartesiana</i>	85
Figura 53. Parámetros de entrada programa "designe"	85
Figura 54. Cálculo de variables antena 2.4 ghz	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Bandas de frecuencia por décadas	27
Tabla 2. Características geométricas de la antena fabricada para 9.4 ghz	60
Tabla 3. Matriz de 360 X 4 datos. Mat	64

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Programa helicoidal2	94
Anexo B. programa guide	102
Anexo C. programa designe	113
Anexo D. datos patrón de radiación teórico	115
Anexo E. datos experimentales patrón radiación antena helicoidal ENAP	119
Anexo F. datos experimentales patrón radiación antena helicoidal fabricada	122

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo de este proyecto, es diseñar y construir un primer prototipo, de una antena helicoidal, que aprovechando las ventajas que tiene, pueda ser utilizada en el sistema de video del vehículo aéreo no tripulado UAV, ya que debe tener un alto valor de directividad, y puede ser utilizada para obtener la señal de video captada por una cámara de video instalada a bordo del UAV.

La antena helicoidal es un hilo conductor embobinado en forma de espiras o hélice sobre un cilindro de diámetro constante. Es un tipo de antena que presenta un comportamiento de banda ancha. Los parámetros geométricos que se tienen en cuenta para el diseño de una antena helicoidal son el diámetro de la espira, la separación entre las espiras, el número de vueltas o de espiras, el diámetro del hilo y el sentido del bobinado (a la derecha o a la izquierda).

Para desarrollar este proyecto, se utilizaron los módulos CASSY LAB de la Escuela Naval, en el cual permite capturar en tiempo real las señales eléctricas captadas por una antena determinando el patrón electromagnético que esta tiene. Estos datos se recopilaron para introducirlos en un script de matlab, el cual calcula los patrones de radiación de una antena helicoidal y posteriormente compara estos datos con los datos recogidos experimentalmente, determinando la correlación entre estos y el error entre ambos. Posterior a estos resultados se fabrica una antena con las mismas características geométricas pero escalada de 2.4 GHz a 9.4. Los resultados experimentales de esta antena son comparados con los calculados por el software de matlab y por los de la antena de la ENAP, determinando de igual manera la correlación y el error entre ambos.

Se desarrolló un segundo script el cual ingresando unos parámetros de frecuencia y geométricos iniciales, arroja el patrón de radiación de esta antena helicoidal en particular y otros datos necesarios para el desarrollo de antenas de este tipo. Finalmente se desarrolló otro script en matlab en el que se permitiera diseñar a cualquier frecuencia y número de espiras que el usuario desee una antena helicoidal, en el cual se introdujo la frecuencia de 2.4 GHz, que es la deseada por

la Escuela Naval, y sus resultados fueron comparados con cálculos realizados manualmente con el fin de poder validar este software.

Palabras claves: UAV, Helicoidal, Patrón de radiación, Frecuencia

INTRODUCCIÓN

Una antena es un dispositivo que sirve para transmitir y recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas y una receptora realiza la función inversa. En realidad una antena es un trozo de material conductor al cual se le aplica una señal y esta es radiada por el espacio libre.

La antena helicoidal es un hilo conductor doblado o embobinado en forma de espiras o hélice sobre un cilindro de diámetro constante. Es un tipo de antena que presenta un comportamiento de banda ancha.

Los parámetros geométricos que se tienen en cuenta para el diseño de una antena helicoidal son el diámetro de la espira, la separación entre las espiras o paso de la hélice, el número de vueltas o de espiras, el diámetro del hilo y el sentido del bobinado (a la derecha o a la izquierda).

Una antena helicoidal puede irradiar muchos modos, pero en función de las dimensiones de la hélice, existen dos modos básicos y principales, son el modo axial y el modo normal de radiación. El modo normal es cuando la longitud total del hilo empleado embobinarlo es mucho menor que λ . De igual manera la máxima radiación se produce en la dirección normal al eje de la hélice. El modo axial es cuando la longitud del hilo empleado es mayor que λ . La máxima radiación se encuentra en la dirección del eje de la hélice. Debido a su alta directividad, polarización circular, ancho de banda amplio y dimensiones no críticas, la antena helicoidal de modo axial es ampliamente usada en aplicaciones espaciales. Fue inventada por John Kraus en 1946.

Estas antenas son usadas normalmente en radios de comunicación portátiles en la banda VHF (30-150 MHz), con el fin de reducir el tamaño del radiador a longitudes apropiadas. Con una adecuada selección de parámetros, el dipolo helicoidal es una estructura de radiación eficiente, con un desempeño en eficiencia de radiación igual a los dipolos de media onda. El ancho de banda es menor que el ancho de banda de una antena dipolo de media onda debido a su

alto valor Q, el cual depende del número de vueltas y del diámetro del lazo de la antena.

El diámetro (D) de las espiras es igual a $\lambda/3$, la separación entre las espiras (S) o el paso del bobinado es igual a $\lambda/4$ y la longitud (L) depende del número de espiras. El objetivo es aprovechar las características de directividad y polarización de la antena helicoidal para diseñar y construir un prototipo que sea utilizado en el sistema de recepción de la señal de video en el proyecto UAV de la Armada Nacional.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a las políticas institucionales, la Armada está desarrollando un sistema de investigación más competitivo para potenciar los recursos disponibles y brindar verdaderas soluciones a la problemática operacional y logística, fortaleciendo los centros de investigación científica identificados y proveyendo recursos que garanticen el desarrollo de proyectos prioritarios que estimulen la innovación. La Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla está potenciando sus capacidades de investigación científica en el campo naval, buscando liderazgo y convirtiéndose en el pilar del conocimiento marítimo nacional¹. Con esto se busca lograr independencia tecnológica, en la elaboración de equipos a bajo costo y duplicables en el tiempo y que además genere un efecto persuasivo en los enemigos potenciales.

La aeronave no tripulada Tipo UAV, es una herramienta de avanzada que permite obtener información, mediante video e imágenes en tiempo real de una zona geográfica determinada, minimizando los riesgos comunes de las operaciones terrestres, aumentando los niveles de seguridad para el personal y limitando sus costos de operación.

La Armada Nacional con el proyecto de la plataforma estratégica de superficie, invertirá alrededor de 200 millones de pesos en una investigación que pretende identificar las características de los UAV el cual estará listo, por intermedio de COTECMAR para el año 2026. De igual manera la Escuela Naval Almirante Padilla, desde el 2007, ha estado desarrollando investigación de los UAV, incluso ya existen algunos prototipos.

La principal limitante de dicho sistema se basa en su tecnología extranjera, que lo hace un elemento muy costoso en cuanto a reparación, mantenimiento y adquisición de repuestos. Por lo anterior, se crea la necesidad por parte de la

¹Políticas Institucionales de la Armada Nacional, Capítulo V “Políticas referidas al desarrollo de la Fuerza, la gestión con calidad, la investigación científica, la innovación y el desarrollo tecnológico” literal i, j, m. Pág. 21

Armada Nacional de diseñar sus propios sistemas, con material Nacional, que los haga más económicos en su diseño, construcción, mantenimiento y reparación.

El objetivo principal de tener un UAV es obtener imágenes en tiempo real de un área geográfica de interés. Para satisfacer en especial esta necesidad se requieren cámaras de video a bordo del vehículo, y que estas imágenes sean transmitidas y recibidas en tiempo real. Para la recepción de estas señales de video en tierra, se requiere una antena que sea capaz de recibir una señal de 2.4 Ghz, fácil de transportar y de un tamaño pequeño. Actualmente existe un proyecto en investigación que consiste en el diseño de la plataforma direccional que se requiere para el UAV, pero no contempla cual es la antena más apropiada para este equipo. Se necesita una antena especial ya que las señales de video requieren de mucha energía y son de alta frecuencia (dos GHz mínimo).

A diferencia de las señales de datos (navegación, posición, rumbo, velocidad, y otros, cuya frecuencia esta en 900 MHz), que se transmiten de manera omnidireccional y su información por el ancho de banda utilizado no requiere utilizar sistemas de comunicaciones muy exigentes, como en el caso del video, las señales deben transmitirse direccionalmente de lo contrario la información se perdería durante la transmisión, por lo tanto no se conseguiría el objetivo final, las imágenes en tiempo real.

En la Escuela Naval Almirante Padilla ya se han hecho investigaciones sobre antenas, como es el caso del proyecto de grado del Sr. CCESP Octavio Alberto Gutiérrez Herrera, quien realizo una investigación en el 2009 sobre diseño e implementación de antenas tipo arreglo de dipolos de longitud finita, aunque estaba dirigido a satisfacer las comunicaciones en HF y VHF en la Armada Nacional, esta investigación será parte de los elementos de estudio revisando el aporte que pueda dar en esta investigación.

De igual manera el Departamento de Armas y Electrónica de BN1, han trabajado en las fabricaciones de antenas para aplicaciones en las comunicaciones dentro de la gama HF y VHF.

El problema se fundamenta principalmente en el estudio, clasificación, diseño y construcción de una antena direccional que pueda recibir la señal de video transmitida desde el UAV, manteniéndose enganchada en la ruta de vuelo, por lo tanto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el prototipo de antena que debe diseñarse para ser utilizada en la recepción de la señal de video emitida por el sistema de transmisión del UAV?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El objetivo principal de tener un avión no tripulado UAV, es tener imágenes en tiempo real de un área geográfica de interés. Para esto se requiere de cámaras a bordo del avión pero también de una antena que sea capaz de recibir la señal y pueda hacer el acople en la plataforma direccional en tierra.

El UAV transmite dos señales, la de datos como posición, rumbo, velocidad, y otras, además de la señal de video como tal. Estas dos señales no van juntas por manejarse cada una de ellas en protocolos diferentes y podrían causar interferencias entre sí.

Se necesita un sistema para la transmisión entre la cámara de video y una consola de mando dispuesta en tierra. La señal típica emitida por los sistemas de video usados en UAV's tiene una tasa de transferencia de aproximadamente de 50 Mbps comprimido. La frecuencia de la transmisión es de 2.4 Gigahertz o mayores.

El uso de una antena direccional para la recepción, permite evitar los problemas de ecos y otras interferencias externas y asegura la buena amplificación en la recepción. Puesto que la información viene de un dispositivo en movimiento, es necesario que la antena direccional cuente con una plataforma que le permita un cambio de la orientación para ubicar el objetivo de donde se trasmite la señal. Esta plataforma es motivo de investigación de otro proyecto el cual no incluye cual es el tipo de antena apropiada a utilizar para la recepción de la señal.

Por lo tanto se estudiaron y analizaron los diferentes tipos de antenas, observando sus ventajas, desventajas, costos, patrones de radiación y demás parámetros que se ajusten a la necesidad de recibir una señal de video de 2.4 Ghz, encontrando que la antena helicoidal es la más adecuada; debido a su fácil

fabricación, bajos costos, poco peso y una excelente directividad, permitiendo una buena recepción de la señal de video.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general. Investigar, seleccionar, diseñar y construir el prototipo de una antena de alta ganancia directiva, instalado en el vehículo aéreo no tripulado de la Escuela Naval de Cadete Almirante Padilla, para ser utilizada en la recepción de la señal de video emitida por el sistema de transmisión de 2.4 GHz.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Efectuar la revisión y posterior análisis de la bibliografía pertinente al proyecto, con el fin de obtener los fundamentos teóricos de las diferentes antenas que cumplan con las especificaciones técnicas necesarias para el mismo.
- Programar e implementar un software en matlab, que permita realizar la simulación de la antena seleccionada estableciendo los diferentes parámetros de la misma.
- Diseñar y construir un primer prototipo de la antena seleccionada a la frecuencia de 9.4GHz, para ser probada experimentalmente en el laboratorio de Antenas de la Escuela Naval Almirante Padilla.
- Proponer un prototipo de la antena a una frecuencia de 2.4 Ghz que es la utilizada para transmitir la señal de video desde el UAV.

1.5 DISEÑO METODOLOGICO

Por el propósito o finalidades perseguidas se utilizó un tipo de Investigación básica♦ y aplicada♦♦, ya que por medio de ellas se pudo seleccionar la antena

* Se caracteriza porque parte de un marco teórico y permanece en él; la finalidad de éste tipo de investigación radica en formular nuevas teorías o modificar las existentes y en incrementar los conocimientos.

** Este tipo de investigación también recibe el nombre de práctica o empírica. Se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren. La investigación aplicada se encuentra estrechamente vinculada con la investigación básica, pues depende de los resultados y avances de esta última; esto queda aclarado si nos percatamos de que toda investigación aplicada requiere de un marco teórico. Sin embargo, en una investigación empírica, lo que le interesa al investigador, primordialmente, son las consecuencias prácticas.

más adecuada para cumplir con las especificaciones de transmisión del equipo de video con el cual cuenta el vehículo autónomo no tripulado UAV (por sus siglas en inglés), además con los conocimientos adquiridos, plantear alternativas para el análisis y diseño de la misma.

La investigación se basó en las teorías ya existentes sobre antenas, para el caso particular se desarrolla el software para el diseño de antena helicoidal con base en la fundamentación teórica, siguiendo puntualmente los modelos matemáticos que en ellos se encuentran, sin modificar la teoría pero simplificando los modelos para un caso práctico, se encuentra dentro del marco la clase de investigación previamente citada.

Por la clase de medios utilizados para obtener los datos: se utilizó la investigación documental y de campo. □ la documental: como su nombre lo indica, se realizó con el apoyo de fuentes de carácter documental de la empresa. Como subtipos de esta investigación se trabajó la investigación bibliográfica

La información se recopiló en el Laboratorio de Comunicaciones y Electrónica de la ENAP, donde se hicieron pruebas experimentales gracias a que se contó con los equipos de comunicaciones dispuesto para tal fin, dichos equipos corresponden al 'laboratorio' de microondas de *labold didactic* con el cual se pueden poner a prueba diferentes montajes con el fin de validar las teorías de antenas, para este caso se usó el montaje típico de la estación de medición de antenas que propone el fabricante y del cual se expondrá más adelante con mayor detalle, se realizó el montaje con el fin de validar el modelo matemático correspondiente.

El análisis e interpretación de resultados se realizó a través de los resultados de toda la información recopilada (tanto la documental como los resultados experimentales) la cual sirvió para hacer un análisis deductivo de la misma lo cual conduce a la selección de la antena helicoidal como una alternativa práctica y eficiente para su utilización en el UAV.

Una vez obtenidos los resultados experimentales de la prueba de la antena, y tras realizarse en varias oportunidades para tener finalmente una sola matriz de datos promediados correspondientes a posición angular vs campo medido por la plataforma giratoria, se realizan las comparaciones mediante el software desarrollado.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES

En el año 2009 el Sr. CCESP Octavio Alberto Gutiérrez Herrera, presentó a la Escuela Naval Almirante Padilla, una investigación como proyecto de grado sobre diseño e implementación de antenas tipo arreglo de dipolos de longitud finita, el cual está dirigido a satisfacer las comunicaciones en HF y VHF en la Armada Nacional.

El Departamento de Armas y Electrónica de BN1, ha trabajado en las fabricaciones de antenas para aplicaciones en las comunicaciones dentro de la gama HF y VHF tipo arreglo de dipolos de igual manera.

A la fecha no se han realizado estudios para antenas de recepción de video en aeronaves no tripuladas, teniendo en cuenta el teatro de operaciones en el cual se pretende utilizar.

2.2 MARCO TEÓRICO

El Instituto de Ingeniería eléctrica y electrónica *IEEE* (IEEE Std. 145-1983). Define una antena como aquel elemento transductor que convierte señales eléctricas en magnéticas y forma parte de un sistema diseñado específicamente para transmitir y/o recibir dichas señales.

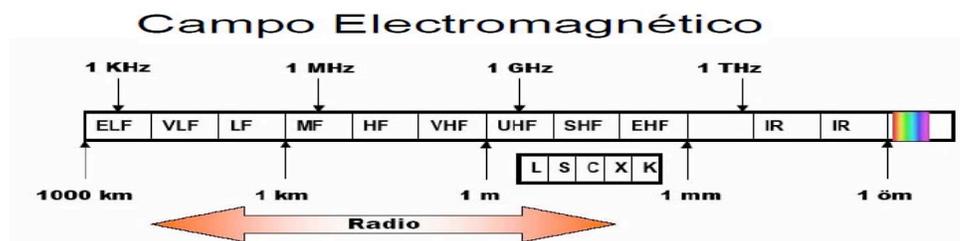
Si bien la variedad de antenas es amplia, la misión de la antena siempre será de transmitir la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas para la aplicación.

Por ejemplo, para aplicaciones de radiodifusión y/o comunicaciones móviles se buscará radiar en de forma omnidireccional sobre una zona deseada, mientras que en radiocomunicaciones fijas se buscará que las antenas sean direccionales.

Toda onda está caracterizada por su frecuencia (f) y su longitud de onda (λ), ambas relacionadas por la velocidad de propagación en el medio, que habitualmente en antenas tiene las propiedades del vacío ($C=3 \times 10^8$ m/s), con $C = \lambda f$. El conjunto de todas las frecuencias, o espectro de frecuencias, se divide por bandas según su uso.

Tabla 1. Bandas de Frecuencia por décadas

BANDA	FRECUENCIA	LONG. DE ONDA	DENOMINACIÓN
ELF	<3 kHz	>100 km	Extremely Low Frequency
VLF	3-30 kHz	100-10 km	Very Low Frequency
LF	30-300 kHz	10-1 km	Low Frequency
MF	0,3 -3 MHz	1.000-100 m	Medium Frequency
HF	3-30 MHz	100-10 m	High Frequency
VHF	30-300 MHz	10-1 m	Very High Frequency
UHF	0,3 -3 GHz	100-10 cm	Ultra High Frequency
SHF	3-30 GHz	10-1 cm	Super High Frequency
EHF	30-300 GHz	10-1 mm	Extremely High Frequency



Fuente. Libro Antenas de Ángel Cárdoma Aznar

Una antena es un dispositivo diseñado para emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia y desde el espacio libre. Una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa.

Existe una gran diversidad de tipos de antenas, dependiendo del uso a que van a ser destinadas. En unos casos deben expandir en lo posible la potencia radiada, es decir, no deben ser directivas (ejemplo: una emisora de radio comercial o una estación base de teléfonos móviles), otras veces deben serlo para canalizar la potencia en una dirección y no interferir a otros servicios (antenas entre estaciones de radioenlaces). También es una antena la que está integrada en la computadora portátil para conectarse a las redes Wi-Fi.

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

2.2.1 Clasificación Clásica de Antenas². Existen tres tipos básicos de antenas: antenas de hilo, antenas de apertura y antenas planas. Asimismo, las agrupaciones de estas antenas (arrays) se suelen considerar en la literatura como otro tipo básico de antena.

- **Antenas De Hilo.** Las antenas de hilo son aquellas cuyos elementos radiantes son conductores de hilo que tienen una sección despreciable respecto a la longitud de onda de trabajo. Las dimensiones suelen ser como máximo de una longitud de onda. Se utilizan extensamente en las bandas de MF, HF, VHF y UHF. Ejemplos de antenas de hilo son:

El monopolo vertical; constituida de un solo brazo rectilíneo que irradia en posición vertical. Es considerada una antena incompleta, y para ser completada se necesita un plano de masa que la haga funcionar correctamente. Ese plano de masa puede ser natural (como una superficie de agua salada), o artificial (una serie de conductores que se unen en la base del monopolo).

Figura 1. Antena Monopolo Vertical.



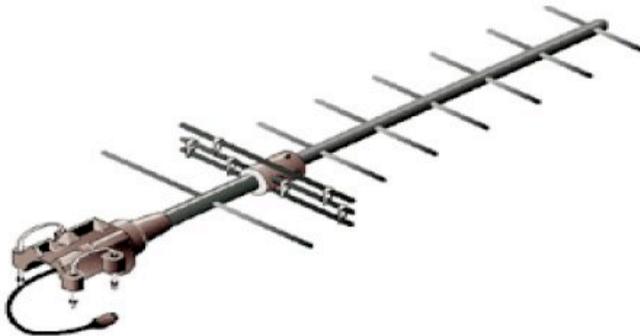
Fuente: <http://antenasparatodos.blogspot.com/2008/05/antenas-de-hilo-o-de-dipolo.html>

²CARDAMA AZNAR, ANGEL. “ANTENAS”, Ediciones Upc, 2ª edición septiembre 2002

El monopolo se alimenta en la base. La alimentación es asimétrica, es decir, cuando uno de los conductores del monopolo está a masa y el otro experimenta las variaciones de tensión, se dice que la alimentación es asimétrica, y habitualmente se alimenta con cable coaxial.

- **La antena Yagi;** consiste en cierto número de elementos rectos que miden cada uno aproximadamente la mitad de la longitud de onda. El elemento excitado o activo de una Yagi es el equivalente a una antena dipolo de media onda con alimentación central.

Figura 2. Antena Yagi.



Fuente http://dklight.info/manuales/nexxt:montevideo:segundo_dia:antenas

Paralelo al elemento activo, a una distancia entre 0,2 y 0,5 longitudes de onda en cada lado, están los reflectores que son varillas rectas o alambres, que son los elementos pasivos. Un reflector se ubica detrás del elemento activo y es ligeramente más largo que media longitud de onda; un director se coloca en frente del elemento activo y es ligeramente más corto que media longitud de onda. Una Yagi típica tiene un reflector y uno o más directores. La antena propaga la energía del campo electromagnético en la dirección que va desde el elemento activo hacia los directores, y es más sensible a la energía electromagnética entrante en esta misma dirección. Cuantos más directores tiene una Yagi, mayor la ganancia y la antena será más larga. Estas antenas son utilizadas principalmente para los enlaces punto a punto; tienen una ganancia desde 10 a 20 dBi y un ancho de haz horizontal de 10 a 20 grados.

- La antena espira; es también llamada como antena de cuadro o loop.

Figura 3Antena Espira.



Fuente: [http://eficiencia.com/recursos/enciclopedia/Espira\(antena\)](http://eficiencia.com/recursos/enciclopedia/Espira(antena))

Generalmente está formada por una espira conductora, formando una circunferencia, cuadrado, hexágono u octógono, y sus dimensiones pueden variar desde 30 o 40 cm de diámetro, hasta varios metros según la frecuencia y el rendimiento esperado. La inductancia de la espira habitualmente está sintonizada por un condensador variable.

- La antena helicoidal; es un tipo especial de antena que se usa principalmente en VHF y UHF. Este tipo de antena presenta un comportamiento de banda ancha. Una hélice es el resultado de bobinar un hilo conductor sobre un cilindro de diámetro constante.

Figura 4Antena Helicoidal.



Fuente: <http://antenasparatodos.blogspot.com/2008/05/antenas-de'helice.html>

Los parámetros geométricos de diseño de una hélice son: su diámetro, la separación entre dos vueltas o paso de la hélice, el número de vueltas, el diámetro del hilo y el sentido del bobinado (a derechas o izquierdas). La longitud de una vuelta de hélice se puede relacionar con el diámetro y el paso a partir de un triángulo. En función de las dimensiones de la hélice existen dos modos básicos de funcionamiento: el modo normal y el modo axial. En el modo normal el máximo de radiación se produce en la dirección normal al eje de la hélice (aquí normal hace referencia a perpendicular, ortogonal) y en el modo axial el máximo de radiación se encuentra en la dirección del eje de la hélice.

- **Antenas De Apertura.** Las antenas de apertura son aquellas que utilizan superficies o aperturas para direccionar el haz electromagnético de forma que concentran la emisión y recepción de su sistema radiante en una dirección. La más conocida y utilizada es la de reflector parabólico, tanto en enlaces de radio terrestres como de satélite. La ganancia de dichas antenas está relacionada con la superficie de la parábola, a mayor tamaño mayor orientación del haz tendremos y por lo tanto mayor directividad.

Figura 5. Antena de Apertura



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Parabolic_Antennas.jpg

El elemento radiante es el alimentador, el cual puede iluminar de forma directa a la parábola o en forma indirecta mediante un subreflector. El alimentador está generalmente ubicado en el foco de la parábola. El alimentador, en sí mismo, también es una antena de apertura (se denominan antenas de bocina) que puede utilizarse sin reflector, cuando el objetivo es una cobertura más amplia (e.g. cuando se pretende cubrir la totalidad de la superficie de la tierra desde un satélite en órbita geostacionaria).

Se puede calcular la directividad (D_0) de este cierto tipo de antenas, con la siguiente expresión, donde S es el área y λ es la longitud de onda:

Ecuación 1.

$$D_0 = 4\pi \frac{S}{\lambda^2}$$

Hay varios tipos de antenas de apertura, como la antena de bocina, la antena parabólica, la antena parabólica del Radar Doppler y superficies reflectoras en general.

Antenas de Array. Las antenas de array están formadas por un conjunto de dos o más antenas idénticas distribuidas y ordenadas de tal forma que en su conjunto se comportan como una única antena con un diagrama de radiación propio.

Figura 6 Antena de Array.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Antenas_Array.jpg

La característica principal de los arrays de antenas es que su diagrama de radiación es modificable, pudiendo adaptarlo a diferentes aplicaciones/necesidades. Esto se consigue controlando de manera individual la amplitud y fase de la señal que alimenta a cada uno de los elementos del array.

Atendiendo a la distribución de las antenas que componen un array podemos hacer la siguiente clasificación:

- **Arrays lineales:** Los elementos están dispuestos sobre una línea.
- **Arrays Planos:** Los elementos están dispuestos bidimensionalmente sobre un plano.
- **Arrays conformados:** Los elementos están dispuestos sobre una superficie curva.

A nivel de aplicación los arrays de antenas se utilizan para la construcción de antenas inteligentes. Una definición básica de un sistema de antenas inteligentes es cualquier configuración adaptativa de múltiples antenas que mejoran el rendimiento de un sistema de comunicaciones inalámbricas.

Las características de las antenas inteligentes con unos haces de radiación con una mayor directividad (es decir, mayor ganancia y mayor selectividad angular), proporcionan múltiples ventajas:

- **Incremento de la zona de cobertura:** Dado que la ganancia es mayor que en el caso de antenas omnidireccionales o sectorizadas.
- **Reducción de la potencia de transmisión:** La mayor ganancia de la antena permite incrementar la sensibilidad
- **Reducción del nivel de interferencia:** La mejor selectividad espacial de la antena permitirá al receptor discriminar las señales de usuarios interferentes a favor de la señal del usuario deseado. Incluso se pueden utilizar antenas inteligentes con configuración antena principal y secundaria donde las secundarias anulan las interferencias.
- **Reducción de la propagación multitrayecto:** Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada, se reduce el número de trayectorias que debe seguir la señal antes de llegar al receptor
- **Mejora de la seguridad:** Gracias a que la transmisión es direccional, hay una probabilidad muy baja de que un equipo ajeno intercepte la comunicación.

- **Introducción de nuevos servicios:** Al poder identificar la posición de usuarios se puede aplicar a radiolocalización, tarificación geográfica, publicidad en servicios cercanos, etc.

2.2.2 Clasificación Funcional de las Antenas. La clasificación funcional de las antenas se basa, fundamentalmente, en la forma en que se distribuye el campo electromagnético en la propia antena o en la tecnología utilizada.

- **Antenas Con Reflector.** Su funcionamiento se basa en la reflexión de las ondas electromagnéticas por la cual las ondas que inciden paralelamente al eje principal se reflejan y van a parar a un punto denominado foco que está centrado en el paraboloides, en el caso de una antena receptora. En cambio si se trata de una antena emisora, las ondas que emanan del foco (dispositivo de emisión) se ven reflejados y abandonan el reflector en forma paralela al eje de la antena.

Cuando se desea la máxima directividad de una antena, la forma del reflector generalmente es parabólica, con la fuente primaria localizada en el foco y dirigida hacia el reflector.

Las antenas con reflector parabólico, o simplemente antenas parabólicas se utilizan extensamente en sistemas de comunicaciones en las bandas de UHF a partir de unos 800 MHz y en las de SHF y EHF. Entre sus características principales se encuentran la sencillez de construcción y elevada direccionalidad. La forma más habitual del reflector es la de un paraboloides de revolución, excitado por un alimentador situado en el foco.

Entre las antenas de reflectores existen los siguientes tipos:

- **Foco primario:** La superficie de estas antenas es un paraboloides de revolución. Las ondas electromagnéticas inciden paralelamente al eje principal, se reflejan y dirigen al foco. El foco está centrado en el paraboloides.

Figura 7. Antena de Foco Primario



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Foco_Primary.jpg

Tienen un rendimiento máximo de aproximadamente el 60%, es decir, de toda la energía que llega a la superficie de la antena, el 60% lo hace al foco y se aprovecha, el resto se pierde debido principalmente a dos efectos, el efecto spillover y el efecto bloqueo.

Su relativa gran superficie implica un menor ángulo de anchura del haz (3 dB), por lo que la antena debe montarse con mayor precisión que una antena offset normal. La lluvia y la nieve pueden acumularse en el plato e interferir en la señal; Además como el LNB³ va montado centralmente, bloquea muchas señales con su propia sombra sobre la superficie de la antena.

- **Offset:** Una antena offset está formada por una sección de un reflector paraboloidal de forma oval. La superficie de la antena ya no es redonda, sino oval y simétrica (elipse).

³LowNoise Block: Bloque de Bajo Ruido, es un dispositivo utilizado en la recepción de señales de satélites, las cuales son muy débiles para ser distribuidas por cables coaxiales. Este dispositivo convierte la señal del satélite (Banda Ku) en una de menor frecuencia, minimizando de esta manera las pérdidas en el cable.

Figura 8 Antena Offset.



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Offset.jpg>

El punto focal no está montado en el centro del plato, sino a un lado del mismo (offset), de tal forma que el foco queda fuera de la superficie de la antena. Debido a esto, el rendimiento es algo mayor que en la de Foco Primario, pudiendo ser de un 70% o algo más.

- **Cassegrain:** Este tipo de antenas presentan una gran directividad, una elevada potencia en el transmisor y un receptor de bajo ruido. Utilizar una gran antena reflectora implica grandes distancias del transmisor al foco (y la imposibilidad de colocar equipos en él) por lo que una solución es emplear un segundo reflector o subreflector. En el caso del reflector parabólico Cassegrain el subreflector es hiperbólico.

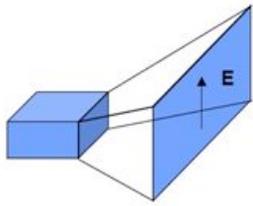
El reflector principal refleja la radiación incidente hacia el foco primario. El reflector secundario posee un foco en común con el reflector parabólico.

El sistema de alimentación está situado en el foco secundario, de manera que el centro de fases del alimentador coincide con el foco secundario del hiperboloide.

El paraboloide convierte una onda plana incidente en una esférica dirigida hacia el foco primario, que es entonces reflejada por el subreflector para formar una onda esférica incidente en el alimentador.

- **Bocina piramidal:** Es un tipo de bocina rectangular. Se ensancha tanto en el plano E como en el H, lo que permite radiar haces estrechos en ambos planos. Este tipo de bocinas son adecuadas para sistemas de polarización lineal.

Figura 9Antena Bocina Piramidal.



Fuente:http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Bocina_Piramidal.jpg

Su ganancia puede calcularse exactamente a partir de sus dimensiones físicas por ello se suelen utilizar como patrones de comparación en las medidas de ganancia. El diseño de una bocina piramidal requiere que su garganta coincida con la guía rectangular de alimentación.

- **Bocina cónica:** Se utilizan fundamentalmente en antenas de satélites de haz global. Son las más adecuadas para utilizar polarizaciones circulares, aunque también pueden utilizar polarización lineal.

Figura 10Antena Bocina Cónica.



Fuente:http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Bocina_Corrugada.jpg

- **Antenas Planas.**

- **Antenas de bucle magnético:** Las antenas de bucle magnético consisten en un bucle de forma circular, octogonal o rectangular. El perímetro de la antena puede ser del orden de la longitud de onda, o bien bastante menor.

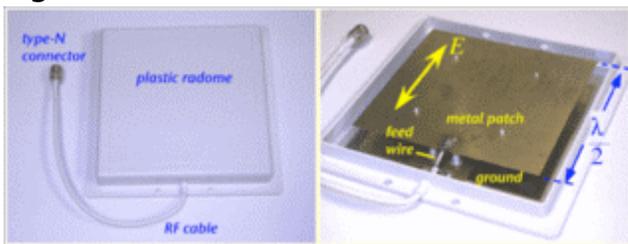
Estas antenas tienen una elevada direccionalidad, con el máximo de recepción en el plano de la antena, y el mínimo en el plano perpendicular al plano de la antena, son poco afectadas por la tierra a partir de alturas superiores a un metro y medio.

En contrapartida, estas antenas desarrollan tensiones de varios kilovolts en bornes, lo que significa que los materiales deben ser capaces de soportar esas tensiones. Las medidas de seguridad también se ven afectadas.

Finalmente, el ancho de banda es de unos pocos kilohertz, lo que significa que en caso de cambio de frecuencia requiera un nuevo ajuste de la impedancia.

- **Antenas Microcinta:** Estas antenas consisten en un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico colocado encima de un plano metálico. El parche es habitualmente de forma rectangular o circular y de dimensiones del orden de media longitud de onda.

Figura 11 Antena Microcinta.



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Patchantena.jpg>

Es posible, asimismo, construir agrupaciones de parches combinando líneas y radiadores impresos. Sus principales limitaciones son su reducido ancho de banda, por tratarse de una estructura resonante, y su baja eficiencia, puesto que de la energía acumulada en la cavidad formada entre el parche y el plano de masa sólo una pequeña porción es radiada al espacio.

Inconvenientes: - Baja eficiencia - Baja potencia - Alto Q - Pobre pureza de polarización - Banda estrecha - Radiación espuria de las líneas

Ventajas: - Bajo perfil - Conformable a estructuras - Fabricación sencilla y barata - Robustas - Combinable con circuitos integrados de microondas - Versátiles en la elección de la frecuencia de resonancia o polarización

Estas antenas suelen estar montadas en aviones, naves espaciales o incorporadas a radios de comunicaciones móviles. Las antenas microstrip son baratas de construir gracias a su simple estructura. Estas antenas también son utilizadas en UHF ya que el tamaño de la antena es directamente proporcional al ancho de banda de la frecuencia de resonancia. Una sola antena microstrip puede tener una ganancia de 6-9dBi. Un array de estas antenas consigue mayores ganancias que una sola antena microstrip. La antena microstrip más utilizada es la de parche rectangular. Esta antena es aproximadamente la mitad de la sección de la longitud de onda de la línea de transmisión de una microstrip rectangular. Una ventaja de estas antenas es la diversidad de polarización, pueden ser fácilmente diseñadas para estar polarizadas en vertical, horizontal, circular derecha o circular izquierda.

Este tipo de antenas se diseñan a partir de líneas de transmisión o resonadores sobre sustrato dieléctrico. Su estructura consiste en un parche metálico sobre un sustrato dieléctrico sin pérdidas. El grosor varía entre 0.003λ y 0.05λ y su constante dieléctrica puede tomar valores entre 2 y 12. En la parte inferior hay un plano conductor perfecto.

Las antenas parche son un tipo popular de antena cuyo nombre viene del hecho de que consisten básicamente en un parche de metal tapado por un soporte plano que normalmente es de plástico y lo protege de daños.

- **Antenas De Apertura Sintética (SAR).** Este tipo de antenas o radares ilumina una escena a través de una sucesión de pulsos en una frecuencia determinada. Una parte de la energía que se propaga (en todas direcciones) vuelve a la antena (eco). Un sensor mide la intensidad y el retardo de las señales emitidas y las que vuelven y con la interpretación de estos últimos se forman imágenes en función de la distancia al radar. Este radar es un sensor activo, ya que lleva su propia fuente de alimentación. Opera principalmente en la radiación microondas, lo que hace que sea más independiente de factores externos como lluvia, nubosidad o niebla. Esto permite la observación continua, incluso en horario nocturno.

Se trabaja en dominio discreto al hacer muestreo de las señales. Las imágenes radar están compuestas por muchos puntos o elementos, denominados píxeles. Cada píxel representa un eco de vuelta detectado. Un satélite que utiliza este tipo de antena o radar es el European Remote Sensing Satellite (ERS).

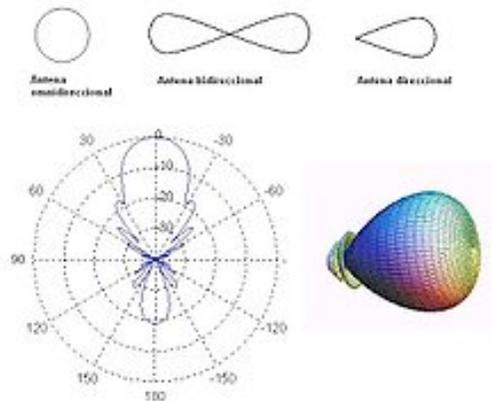
2.3 MARCO CONCEPTUAL⁴

Es necesario tener en cuenta algunos términos específicos para la correcta interpretación del presente anteproyecto y el posterior documento de trabajo de grado. Los siguientes conceptos corresponden a los parámetros que se deben tener en cuenta para el diseño de una antena.

2.3.1 Diagrama De Radiación O Patrón De Radiación. Es la representación gráfica de las características de radiación de una antena, en función de la dirección (coordenadas en azimut y elevación). Lo más habitual es representar la densidad de potencia radiada, aunque también se pueden encontrar diagramas de polarización o de fase. Atendiendo al diagrama de radiación, podemos hacer una clasificación general de los tipos de antena y podemos definir la directividad de la antena (antena isotrópica, antena directiva, antena bidireccional, antena omnidireccional,...)

⁴CARDAMA AZNAR, ANGEL. "ANTENAS", Ediciones Upc, 2ª edición septiembre 2002. BALANIS, CONSTANTINE A. "ANTENNA THEORY", Editorial Wiley, 2ª edición, 1997

Figura 1 Patrón de Radiación.



Fuente:http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Diagrama_gen_rad.jpg

Los *patrones o diagramas de radiación* describen la intensidad relativa del campo radiado en varias direcciones desde la antena a una distancia constante. El patrón de radiación es también de recepción, porque describe las propiedades de recepción de la antena. El patrón de radiación es tridimensional, pero generalmente las mediciones de los mismos son una porción bi-dimensional del patrón, en el plano horizontal o vertical. Estas mediciones son presentadas en coordenadas *rectangulares* o en coordenadas *polares*.

Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son:

- Dirección de apuntamiento: Es la de máxima radiación. Directividad y Ganancia.
- Lóbulo principal: Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.
- Lóbulos secundarios: Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.
- Ancho de haz: Es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma un valor de 3dB por debajo del máximo. Es decir, la dirección en la que la potencia radiada se reduce a la mitad.

- Relación de lóbulo principal a secundario (SLL): Es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.
- Relación delante-atrás (FBR): Es el cociente en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.

2.3.2 Ancho De Banda. Es el margen de frecuencias en el cual los parámetros de la antena cumplen unas determinadas características. Se puede definir un ancho de banda de impedancia, de polarización, de ganancia o de otros parámetros.

2.3.3 Directividad. Se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena.

Ecuación 2.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\rho(\theta, \varphi)}{P_r / (4\pi r^2)}$$

Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

Ecuación 3.

$$D = \frac{\rho_{max}}{P_r / (4\pi r^2)}$$

2.3.4 Ganancia. Se define como la ganancia de potencia en la dirección de máxima radiación. La Ganancia (G) se produce por el efecto de la directividad al concentrarse la potencia en las zonas indicadas en el diagrama de radiación.

Ecuación 4.

$$G = 10 \log[4\pi U(max) / P(in)]$$

La unidad de Ganancia (G) de una antena es el dBd o dBi, dependiendo si esta se define respecto a un dipolo de media onda o a la isotrónica.

2.3.5 Eficiencia (η). La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se define que el rendimiento o eficiencia es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena.

También se puede definir como la relación entre ganancia y directividad.

Ecuación 5.

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{G}{D}$$

El parámetro eficiencia (η) es adimensional

2.3.6 Impedancia De Entrada. Es la impedancia de la antena en sus terminales. Es la relación entre la tensión y la corriente de entrada.

Ecuación 6.

$$Z = \frac{V}{I}$$

La impedancia es un número complejo. La parte real de la impedancia se denomina Resistencia de Antena y la parte imaginaria es la Reactancia. La resistencia de antena es la suma de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas. Las antenas se denominan resonantes cuando se anula su reactancia de entrada.

2.3.7 Ancho De Haz. Es un parámetro de radiación, ligado al diagrama de radiación. Observando el lóbulo principal, se halla el pico de intensidad de radiación, luego se localizan los puntos de ambos lados del pico que representan la mitad de la potencia de intensidad del pico. El ancho del haz es la distancia angular entre los puntos de la mitad de la potencia. La mitad de la potencia en decibels es de -3dB, por lo tanto algunas veces el ancho del haz a mitad de potencia es referido como el ancho del haz a 3dB. Generalmente se consideran tanto el ancho de haz vertical como horizontal. La mayor parte de la potencia radiada no se dispersa en lóbulos laterales, entonces la ganancia directiva es inversamente proporcional al ancho del haz: cuando el ancho del haz decrece, la ganancia directiva se incrementa.

2.3.8 Polarización. Las antenas crean campos electromagnéticos radiados. Se define la polarización electromagnética en una determinada dirección, como la figura geométrica que traza el extremo del vector campo eléctrico a una cierta distancia de la antena, al variar el tiempo. La polarización puede ser lineal, circular y elíptica. La polarización lineal puede tomar distintas orientaciones (horizontal, vertical, +45°, -45°). Las polarizaciones circular o elíptica pueden ser a derechas o izquierdas (dextrógiras o levógiras), según el sentido de giro del campo (observado alejándose desde la antena).

En el marco de antenas se define un coeficiente de desacoplo por polarización. Este mide la cantidad de potencia que es capaz de recibir una antena polarizada de una forma con una longitud efectiva \vec{l}_{ef} de un campo eléctrico incidente con una determinada polarización \vec{E}_{in} . De este modo, el coeficiente de desacoplo por polarización se define como:

Ecuación 7.

$$C_p = \frac{|\vec{E}_{in} \cdot \vec{l}_{ef}|}{|\vec{E}_{in}| \cdot |\vec{l}_{ef}|}$$

De esta manera, obtenemos la fracción de potencia que finalmente la antena es capaz de recibir, multiplicando la potencia incidente en la antena por este coeficiente definido anteriormente, de la forma:

Ecuación 8.

$$P_{rec} = P_{in} \cdot C_p$$

2.3.9 Relación Delante/Atrás. Este parámetro se define como la relación existente entre la máxima potencia radiada en una dirección geométrica y la potencia radiada en la dirección opuesta a esta. Es decir es el cociente entre la directividad máxima de una antena con la directividad en la dirección opuesta.

Cuando se traza el patrón de radiación en una escala relativa en dB, la relación de ganancia adelante/atrás es la diferencia en dB entre el nivel de radiación máxima en la dirección delantera y el nivel de radiación a 180 grados. Este número no tiene sentido para un antena omnidireccional, pero brinda una idea de la cantidad de potencia dirigida hacia adelante en una antena muy direccional. El valor de esta relación es importante dependiendo que tipo de antena y para que aplicación desea utilizarse.

- **Nulos.** En los diagramas de radiación de una antena, una zona nula es aquella en la cual la potencia efectivamente radiada está en un mínimo. Un nulo a menudo tiene un ángulo de directividad estrecho en comparación al haz principal. Los nulos son útiles para varios propósitos tales como la supresión de señales interferentes en una dirección dada.

- **Resistencia De Radiación.** Cuando se le suministra potencia a una antena, parte de ella se irradia y otra parte, se convierte en calor disipándose. Cuando se habla de resistencia de radiación, se hace teniendo en cuenta que no se puede medir de forma directa.

Si se reemplaza la antena por la resistencia de radiación, esta, haría su trabajo, es decir, disiparía la misma cantidad de potencia que irradiaría la antena. La

resistencia de radiación es igual a la relación de la potencia radiada por la antena al cuadrado de la corriente en su punto de alimentación.

Ecuación 9.

$$R_r = \frac{P}{i^2}$$

Siendo:

R_r = Resistencia de radiación (Ohms)

P = Potencia radiada por la antena (Watts)

i = Corriente de la antena en el punto de alimentación (Amperes)

Se podría obtener la eficiencia de una antena, dada que es la relación de la potencia radiada y la potencia disipada.

2.4 Herramientas estadísticas

2.4.1 Coeficiente De Correlación. Es la intensidad de la relación y/o dependencia que existe entre dos variables o conjunto de variables. El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores entre -1 y 1, indicando que entre más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación en cualquier dirección, más fuerte será la relación entre las dos variables. Mientras más cercano a cero sea el coeficiente de correlación indicará la dependencia entre ambas variables es la más débil. Si es igual a cero se concluirá que no existe ninguna relación entre ambas variables.

2.4.2 Error Cuadrático Medio. Es el cuadrado de la resta entre un estimador ($\hat{\theta}$) y el estimado (θ) de un parámetro y se define como:

Ecuación 10.

$$ECM(\hat{\theta}) = E(\hat{\theta} - \theta)^2$$

2.4.3 Normalización de Datos. Un vector X se dice normalizado si su componente de máximo valor absoluto es 1. Normalizar un vector consiste en dividir el vector por el máximo valor absoluto de sus componentes. en general la normalización es la operación mediante la cual un conjunto de valores de una determinada magnitud son transformados en otros garantizando uniformidad en las escalas conservando la proporcionalidad.

Ecuación 11.

$$X_i = \frac{A_i}{\max(A)}$$

$$A = \{A_1 \dots A_n\}$$

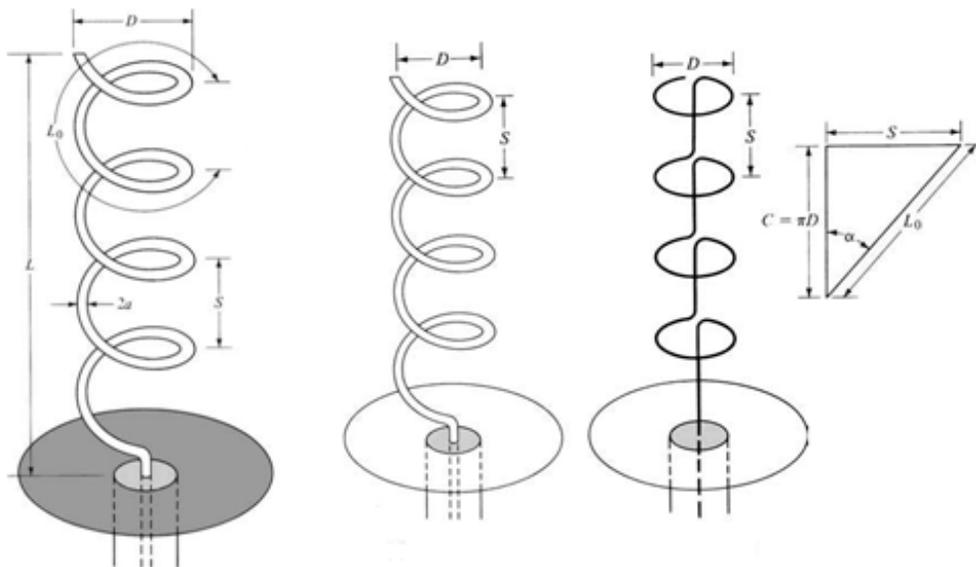
Donde X_i corresponde al valor normalizado de la posición i -ésima del vector X

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA ANTENA HELICOIDAL

Las antenas de tipo helicoidal derivan su nombre de acuerdo a su geometría y corresponden a un tipo de antena que de banda ancha y polarización circular. La geometría helicoidal es el resultado de bobinar un hilo conductor sobre un cilindro de diámetro constante ajustándolo a la forma de una espiral de diámetro constante.

Los parámetros que se deben tener en consideración en el diseño de una hélice son: el diámetro (D), la separación entre dos vueltas o paso de la hélice (S), el número de vueltas (N), el diámetro del hilo conductor y el sentido del bobinado (a derechas o izquierdas).

Figura 13 Descripción geométrica y analítica de una antena helicoidal



Fuente: Antenna Theory Third Edition de Constantine Balanis, pág 567 y 569

Las expresiones analíticas para diseño son las siguientes expresiones:

Ecuación 12.
$$L_n = NL_o$$

Ecuación 13. $L_o = \sqrt[3]{S^2 + C^2}$

Ecuación 14. $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{S}{C}\right)$

Ecuación 15. $C = \pi D$

Ecuación 16. $L_a = NS$

N = Número de espiras

L_o = Longitud de una vuelta

L_n = Largo del conductor constitutivo de la antena

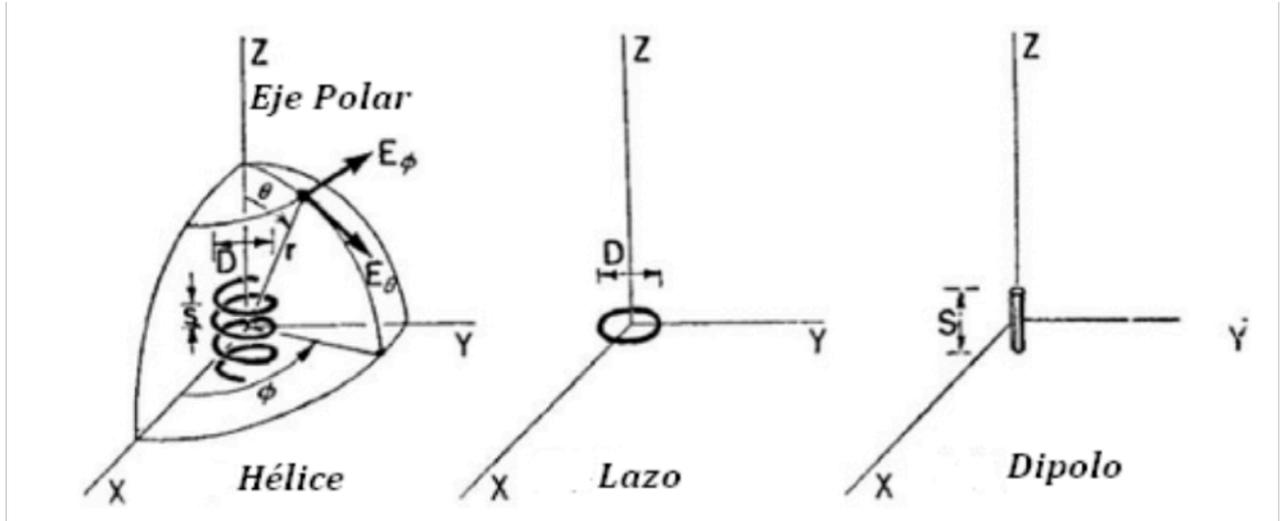
C= circunferencia de la hélice

L_a =longitud axial de la antena

El análisis de cada antena deriva de su geometría característica, para el caso de la antena helicoidal su configuración corresponde a un enrollado de N vueltas, el diámetro D y la separación entre espiras, el análisis y la expresiones para cálculo parten del modelo equivalente de la antena el cual consiste en aproximar su geometría a una combinación entre dipolos de longitud S y lazos circulares de un diámetro D , el ángulo de elevación α el cual se forma por una línea tangente a la espiral de alambre y el plano perpendicular al eje de la hélice.

Para el ángulo de elevación $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right)$, se observa: si ángulo α es 0° , la hélice se reduce a una antena circular de diámetro D y $S=0$, por otro lado si el ángulo α es 90° la hélice se reduce a un dipolo de longitud S es decir $D=0$. Por lo que se puede hablar de una espiral cuando el ángulo α está entre 0° y 90° .

Figura 14 Dimensiones de la Hélice, lazo y dipolo.

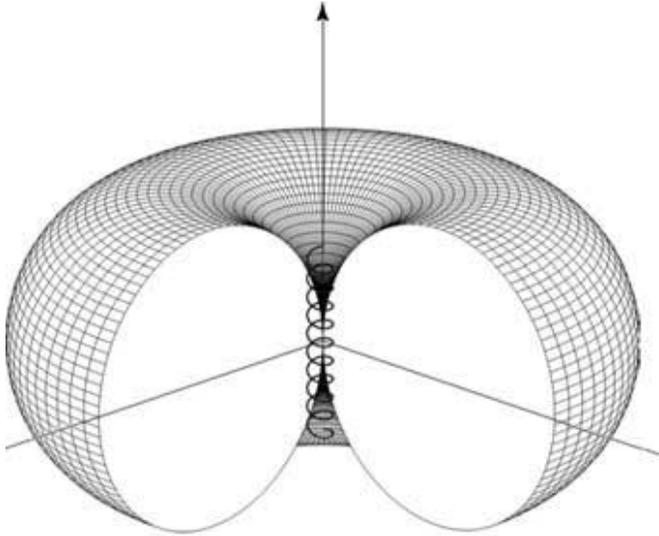


Fuente: Antenas Edición de 1950 de John D. Krauss, capítulo 7pág

De la antena helicoidal se trabajan dos modos de radiación, el *modo normal* y el *modo axial*. En el modo normal el máximo de radiación se produce en la dirección normal al eje de la hélice y en el modo axial el máximo de radiación se encuentra en la dirección del eje de la hélice.

3.1 MODO NORMAL. En este modo el campo irradiado por la antena es máximo en un plano normal al eje de la hélice y es mínimo a lo largo de su eje, como se ve en la Figura No 15. Para lograr operar en modo normal, las dimensiones de la hélice son usualmente pequeñas comparadas a la longitud de onda ($NL_0 \ll \lambda$).

Figura 15 Patrón de Radiación en modo Normal.



Fuente: Antenna Theory Third Edition de Constantine Balanis, pág 568

Es así como el patrón de radiación de una antena helicoidal en modo normal se puede describir por la suma las componentes E_ϕ y E_θ de los campos radiados por un dipolo de longitud S y un anillo de diámetro D con la misma distribución de corriente constante.

Patrón de Radiación de un Anillo de diámetro D .

Ecuación 17.

$$E_\theta = j\eta \frac{k^2 I_0 (D/2)^3 e^{-jkr}}{4r} \text{sen}\theta$$

Patrón de Radiación de un dipolo de longitud S .

Ecuación 18.

$$E_\phi = \eta \frac{k I_0 S e^{-jkr}}{4\pi r} \text{sen}\theta$$

Finalmente se debe conocer la relación axial AR de la antena, que en este modo de operación es la relación entre las magnitudes de los componentes de los campos,

Ecuación 19.

$$AR = \frac{|E_{\theta}|}{|E_{\phi}|} = \frac{4S}{\pi k D^2} = \frac{2\lambda S}{(\pi D)^2}$$

Nótese que al variar los valores de D o S la relación AR toma valores entre 0 e infinito y con esto se varía la polarización de la antena, entre lineal, elíptica y circular.

3.2 MODO AXIAL. El modo de radiación axial tiene máxima radiación a lo largo del eje axial de la misma, es decir, en la dirección de $+Z$. El modo axial ocurre si se obtienen las siguientes dimensiones óptimas:

$$\frac{3}{4} < \frac{C}{\lambda} < \frac{4}{3}$$

Relación entre circunferencia y longitud de onda

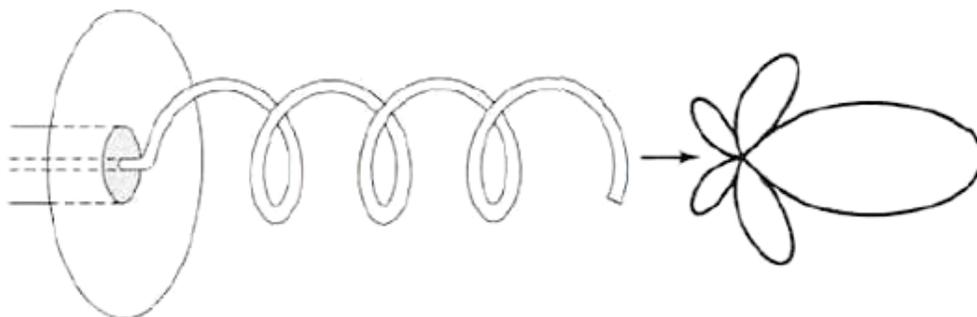
$$S \cong \frac{\lambda}{4}$$

Separación entre espiras

$$12 \leq \alpha \leq 14$$

Ángulo de inclinación

Figura 16 Antena helicoidal en Modo Axial.



Fuente. Antenna Theory Third Edition de Constantine Balanis, pág 568

En este modo de operación el campo eléctrico está dado por la expresión,

Ecuación 20.

$$E = \text{Sen}\left(\frac{\pi}{2N}\right) * \frac{\text{Sen}\left(\frac{\psi N}{2}\right)}{\text{Sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)} * \text{Cos}\theta$$

Donde ψ es la fase relativa a lo largo de varias vueltas.

Ecuación 21.

$$\psi = 2\pi\left(S(1 - \text{Cos}\theta) + \frac{1}{2N}\right)$$

Debido a que las hélices de longitud finita no tienen simetría circular perfecta los campos radiados son asimétricos, lo cual se da por la relación axial y en la dirección del haz principal comienza a aproximarse a la unidad en tanto N se hace más grande y la onda se acerca a una polarización circular perfecta, ya que E_θ y E_ϕ están en fase.

Ecuación 22.

$$\|AR\| = \frac{2N + 1}{2N}$$

En lo que se refiere a impedancia de salida de una antena helicoidal operando en modo axial, su impedancia tiende a comportarse como un elemento radiante netamente con valores entre 100 y 200 Ω , esa impedancia puede ser calculada por medio de la siguiente expresión:

Ecuación 23.

$$R = 140 \frac{C}{\lambda} \Omega$$

Otros parámetros importantes de medir y tener en cuenta para este modo de operación el ancho de haz de media potencia (HPBW), el cual se puede calcular conociendo las dimensiones de la antena:

Ecuación 24.

$$HPBW(\text{grados}) \cong \left(\frac{52\lambda^{3/2}}{C\sqrt{NS}} \right)$$

Finalmente para poder realizar diseños y análisis de antenas en este modo de operación se debe conocer el ángulo entre primeros nulos, lo cual se puede calcular mediante la expresión:

Ecuación 25.

$$FNBW(\text{grados}) \cong \left(\frac{115\lambda^{3/2}}{C\sqrt{NS}} \right)$$

Para la obtención de los datos en el laboratorio se trabajó con las antenas helicoidales suministradas por **ENAP(Escuela Naval Almirante Padilla)** y una antena helicoidal fabricada de forma manual con las mismas características geométricas, dichas antenas se dispusieron para operar en modo axial, para obtener los patrones característicos de cada antena y confrontarlos entre ellos y a su vez con los patrones teóricos.

4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADOS

4.1 LABORATORIO DE PRUEBAS CASSY LAB⁵

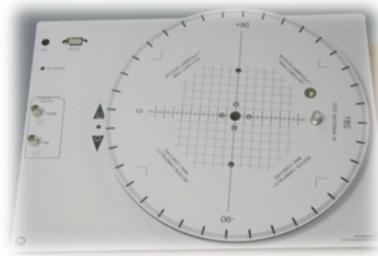
El software CASSY Lab, es una herramienta didáctica, que utiliza varios módulos CASSY-S, los cuales son utilizados para diferentes aplicaciones de la ingeniería, de igual manera soporta dispositivos de medición serial. Debido a que el objetivo de este proyecto es diseñar antenas helicoidales, el dispositivo de medición serial “plataforma giratoria para antena”, será utilizado para confrontar la teoría con la práctica, y de esta manera verificar que el software que se desea diseñar para calcular los patrones de radiación y demás parámetros correspondientes para el diseño de una antena de este tipo, arroje resultados acordes a la realidad física.

4.1.1 Componentes Utilizados Para Montaje y Pruebas. Para realizar el montaje y realización del laboratorio se utilizan los componentes que se nombran a continuación y posteriormente se describe la implementación de la experiencia para la obtención de los datos experimentales. Las referencias indicadas, son los elementos por las cuales está compuesto el laboratorio de “teoría de antenas”.

- **Plataforma giratoria para antenas.** Permite capturar en tiempo real las señales eléctricas captadas por la antena, esto gracias a que cuenta con un sistema de rotación de 360 grados con pasos programados por el usuario, desde 0.5, 1, y 2 grados, lo cual permite tener 720, 360, o 180 datos por recorrido respectivamente. Sus características son: ángulo de giro: máx. 365 grados. Resolución angular: máx. 0,5 grados. Velocidad de rotación: de aprox. 2/3/5 min. Corriente de polarización: aprox. 10 μ A. Entradas / salidas: Conectores BNC hembra: para el Oscilador Gunn y el modulador PIN. Conexión a red: 115 V, 50 Hz, aprox.15 VA. Elementos suministrados: (1) Programa en plataforma Windows para manejo de equipo.

⁵ <http://www.ld-didactic.de/software/524221es.pdf>

Figura 17 Plataforma giratoria para antenas.



Fuente: Laboratorio antenas ENAP

- **Oscilador GUNN (1 737 01).** Sus características son: Tensión de operación 8-10Vcc. Consumo 120mA. Frecuencia de operación 9.40Ghz. Potencia de microondas mayor a los 10mW. Conexión BNC hembra. Guía de onda R100.

Figura 18 Oscilador GUNN (1 737 01).



Fuente: Laboratorio antenas ENAP

- **Modulador PIN.** Sus características son: Frecuencia de corte 9.4GHz. Pérdidas por inserción igual o menor a 1dB. Atenuación por bloqueo menor o igual a 15dB. Tensión de operación 0-10Vcc. Frecuencia de modulación: mayor o igual a 5MHz. Conexión: Conector BNC hembra.

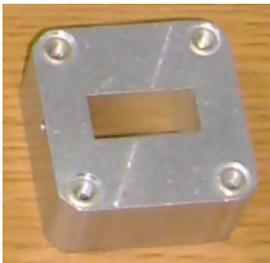
Figura 19 Modulador PIN.



Fuente: Laboratorio antenas ENAP

- **Guías de Ondas unidireccional.** Sus características son: Guía de onda de aluminio de 13mm de longitud. Frecuencia de corte 9.40GHz. Aislamiento mayor o igual a 20dB. Perdidas de inserción menor o igual a 1.5dB. ROE menor igual a 1.25. Para tipo de guía de ondas R100

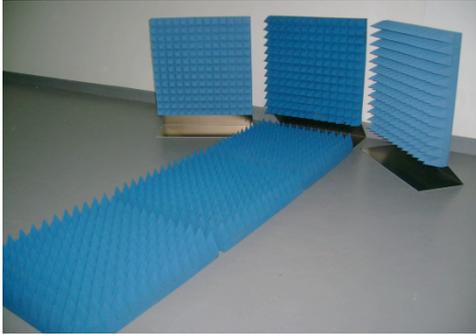
Figura 20 Guías de Ondas unidireccional.



Fuente Laboratorio antenas ENAP

- **Juego absorbente de microondas (Cámara Anecoica 1 737 390):** Son 6 Placas absorboras aprox. 500 x 500x 60 (mm), y 3 placas de estas con portadoras metálicas.

Figura 21 Juego absorbente de microondas.



Fuente: Laboratorio antenas ENAP

- **Juego de Antenas Helicoidales (2 de polarización derecha y 1 de Izquierda) (1 737 390):** son dos antenas helicoidales, polarización circular según la regla de la mano derecha, y una antena helicoidal, polarización circular, según la regla de la mano izquierda

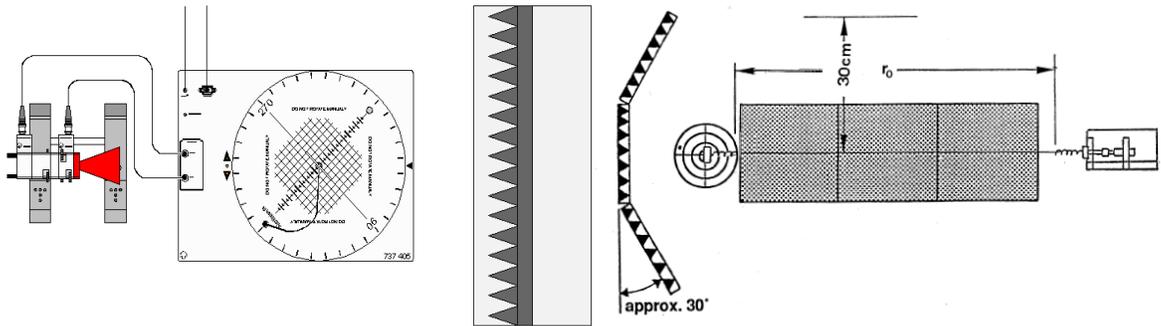
Figura 22 Juego de Antenas Helicoidales.



Fuente: Laboratorio antenas ENAP

4.1.2 Configuración De La Estación De Medición. La configuración del laboratorio se muestra en la Figura No. 23, en el cual se desarrollaran tres pruebas sobre la antena, primero se medirá el patrón de radiación y la relación de recepción ante un emisor de polarización derecha.

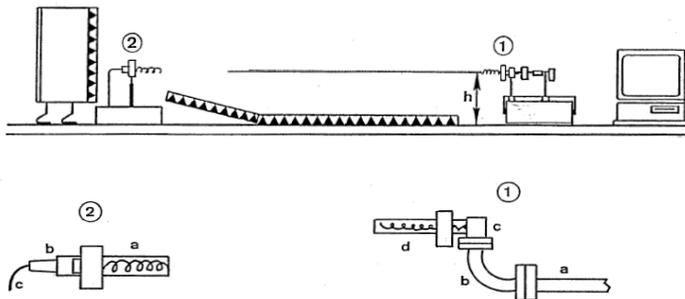
Figura.23 Configuración de la Estación de medición



Fuente: T 7.6 ThirdEdition de J.M. Kloza, pág 10

Los montajes realizan de acuerdo con lo ilustrado en la Figura No 24 , donde de igual forma se puede observar la disposición de las antenas transmisora y receptora.

Figura 24.Montaje del laboratorio, antena emisora (1) y antena receptora (2)



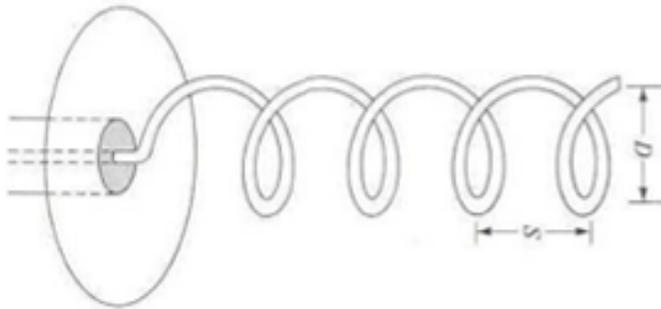
Fuente: T 7.6 ThirdEdition de J.M. Kloza, pág 70

4.1.3 Procedimiento. Una vez dispuesta la configuración de los equipos y correcta ubicación del montaje, se realizan las prueba en una frecuencia de operación de 9.4 Ghz, y se obtienen las mediciones experimentales mediante la utilización del programa CASSYLAB suministrado por la ENAP. De allí se obtienen los datos necesarios para la caracterización y análisis correspondientes a cada antena.

Luego se realizan las mediciones de las características físicas de las antenas, puesto que son necesarios para obtener los cálculos de los parámetros de la antena, por medio de las expresiones analíticas descritas en el capítulo 2.

Se desarrolla un script en Matlab, usando el modelo matemático de la antena helicoidal con sus diferentes parámetros, siendo en este donde se introducen los datos de las características físicas de la antena, con el fin de validar el código y realizar la confrontación teórico-experimental.

Figura 25 Características Físicas de la Antena de prueba



Theory Third Edition de Constantine Balanis, pág 567

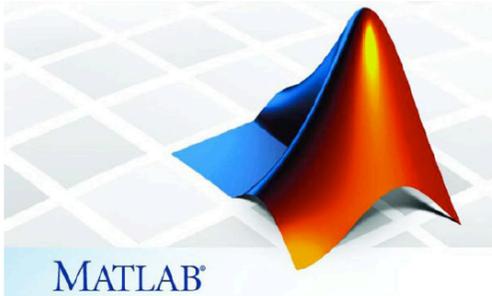
TABLA 2. Características geométricas de la Antena fabricada para 9.4 Ghz

ANTENA PRUEBA	
S	7mms
D	8 mms
N	11

Fuente: Laboratorio antenas ENAP

4.2 SOFTWARE MATLAB. MATLAB es un software matemático que trabaja en un entorno de desarrollo integrado y tiene su propio lenguaje de programación. Sus funciones básicas son: integra el análisis numérico, calculo y manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI), procesamiento de señales y graficación, y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Figura 26 MATLAB.



Fuente: SOFTWARE MATLAB

El nombre de MATLAB nace de *matrix laboratory*, ya que el elemento básico de dato es una matriz, la cual no requiere de dimensionamiento, lo que permite resolver problemas en una fracción de tiempo, del que tomaría al escribir un programa en cualquier lenguaje como, Pascal, Fortran, C, u otros.

MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus beneficios, el primero es Simulink, que consiste en una plataforma de simulación multidominio y el segundo es GUIDE, que es un editor de interfaces de usuario - GUI. De igual manera, MATLAB puede ampliar sus capacidades con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

Las cajas de herramientas *toolboxes*, son colecciones de funciones utilizadas para resolver algún problema muy particular. Las áreas en donde los *toolboxes* están disponibles incluyen el procesamiento de señales, diseño de sistemas de control, la simulación de sistemas dinámicos, la identificación de sistemas, redes neuronales y otros.

4.2.1 Modos De Ejecución De Comandos Y Funciones. El usuario puede utilizar diferentes modos de ejecución de comandos y funciones en MATLAB los cuales son tres: *Interactivo, Por Programa, y por interfase grafica (Guide)*.

- **Interactivo.** Con este modo se puede teclear directamente los comandos y funciones sobre el área de trabajo de MATLAB, permitiendo una ejecución paso a paso, así como el seguimiento de las variables y la graficación de los resultados intermedios.

- **Por Programa.** Se crea un archivo con la secuencia adecuada de comandos y funciones que se requiera. Este archivo se puede realizar desde el editor de MATLAB los cuales se conocen como m-file. Hay que cerciorarse de que el archivo se llame de esta forma <nombre>.m. Para la creación del archivo “.m” se tienen que seguir las reglas de sintaxis propias de MATLAB y guardarlo con extensión “.m”.

- **Interface Gráfica De Usuario De Matlab(*Guide*).** Es un juego de herramientas diseñadas para desarrollar conjuntos de paneles con botones, menús desplegables, controles deslizantes, textos editables, entre otros cuyo flujo de cómputo está controlado por las acciones de interfaz *GUI*(*GraphicalUser Interfaces*) de fácil y rápido uso, reduciendo la labor al grado de seleccionar, tirar, arrastrar y personalizar propiedades.

El panel GUI es una ventana de figura y consta de los siguientes componentes:

- Menú de interfaz con el usuario
- Dispositivos de control de la interfaz con el usuario
- Ejes para desplegar las gráficas o imágenes.

En los scripts, los comandos se ejecutan en un orden, mientras en una interfaz se ejecuta por eventos que genera el usuario del programa, es decir, que no se ejecutan en un orden establecido.

5 DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL SOFTWARE DE ANTENAS HELICOIDALES

Utilizando los equipos mencionados en el capítulo anterior se tomaron los datos obtenidos del patrón de radiación de la antena helicoidal de la ENAP y se desarrolló un software en Matlab, de nombre "*Helicoidal2*" (Anexo "A"), que al introducir como entradas las características geométricas de la antena y la frecuencia de trabajo (9.4 GHz), arroja un patrón de radiación similar al obtenido en la práctica. El software tiene la capacidad de comparar ambos datos y determinar el coeficiente de correlación y similitud de ambos patrones. De esta manera se determina y valida el software diseñado en Matlab. De igual manera el software tiene la capacidad de medir el ancho de haz, directividad, nulos y demás parámetros de las antenas helicoidales, ofreciendo más información sobre la operación de estas.

Se desarrolló un segundo algoritmo de nombre *GUIDE* cuyo script se encuentra en el anexo "B", que introduciendo como parámetros de entrada, frecuencia, diámetro antena, separación entre espiras y número de espiras, arroja el patrón de radiación de una antena helicoidal. Este algoritmo tiene la ventaja de utilizar la interface "*Guide*" lo que le da una presentación más agradable al usuario al momento de ejecutar el programa.

Finalmente, se elabora un tercer programa llamado "*Design*", cuyo código se encuentra en el anexo "C", el cual solamente introduciendo la frecuencia y el número de vueltas deseado, entrega los datos necesarios para construir una antena helicoidal.

5.1 DESCRIPCIÓN SOFTWARE *HELICOIDAL2*

Al arrancar el programa "*Helicoidal2*" de matlab, este muestra una ventana inicial, como se puede observar en la figura 27, en donde pide los parámetros de entrada que son la frecuencia de operación (gigahertz), número de vueltas, distancia entre espiras (en milímetros) y diámetro de la antena (en milímetros).

Figura 27 Parámetros entrada del Programa Helicoidal2.

```

Command Window
-----PARAMETROS DE ENTRADA-----

Frecuencia de Operacion [GHz]: 9.4
Numero de Vueltas: 11
Distancia entre Espiras [mm]: 7
fx Diametro de la Antena [mm]: 8

```

FUENTE: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Para correr el script de comparación entre antenas helicoidales es necesario cargar un archivo externo en la misma ubicación del script; dicho archivo ha sido llamado *datos.mat*, el cual corresponde a una matriz de 360 x 4, dispuesta de la siguiente manera:

TABLA3.MATRIZ DE 360 X 4 DATOS.MAT

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
Angulos entre 0-360 en radianes	Valores teoricos del Campo Electrico (E)	Valores experimentales antena ENAP 9.4ghz	Valores experimentales antena escalada en frecuencia de 2.4 ghz a 9.4 ghz

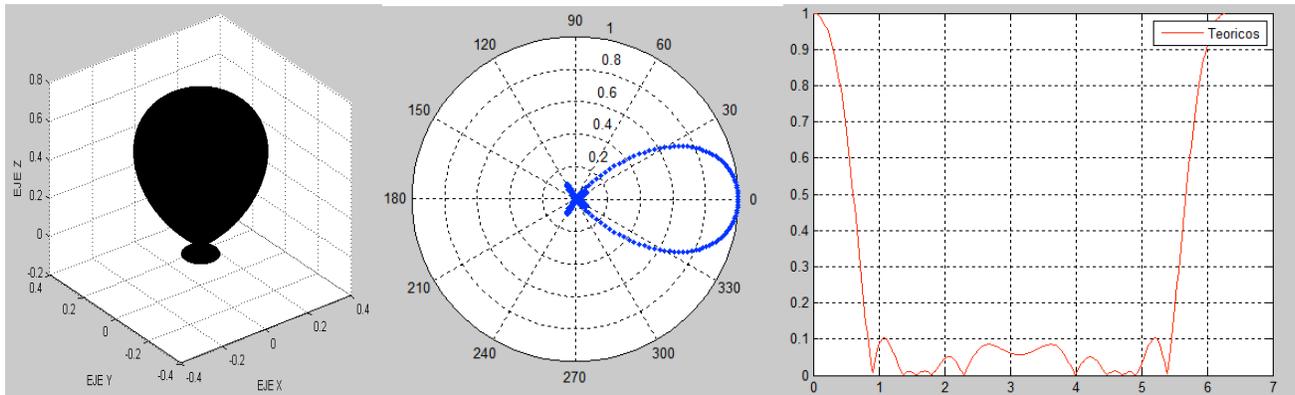
Fuente: Autores

Los valores teóricos del campo eléctrico fueron obtenidos al evaluar las expresiones programadas para cada posición angular, los valores de la antena ENAP corresponden a la antena que sirve como patrón de referencia y calibración del equipo **Cassy lab**.

Después de colocar los valores de los parámetros de entrada, oprima el botón "ENTER", para que el programa inicie el análisis y empiece a arrojar los resultados. Con el primer "ENTER", el programa arroja tres primeros gráficos, consistentes en patrón de radiación teórico tridimensional, polar y rectangular, como se ve en la figura 28. Paralelamente a esto, el programa "*Helicoidal2*" arroja casi de inmediato los resultados de los cálculos de las variables de salida en la ventana de matlab

“Command Window”, que son la longitud de onda, la circunferencia de una vuelta, el ángulo de inclinación entre espiras, el tamaño de una vuelta, radio axial, factor de fase, ancho de banda de media potencia, primeros nulos, y directividad, como se puede ver en las figura 29.

Figura 28. Patrón de Radiación Teórico, Tridimensional, Polar y Rectangular



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Figura 29 Cálculo de Variables en Command Window

```

Command Window
>> helicoidal2
-----PARAMETROS DE ENTRADA-----

Frecuencia de Operacion [GHz]: 9.4
Numero de Vueltas: 11
Distancia entre Espiras [mm]: 7
Diametro de la Antena [mm]: 8

---CALCULO DE VARIABLES---

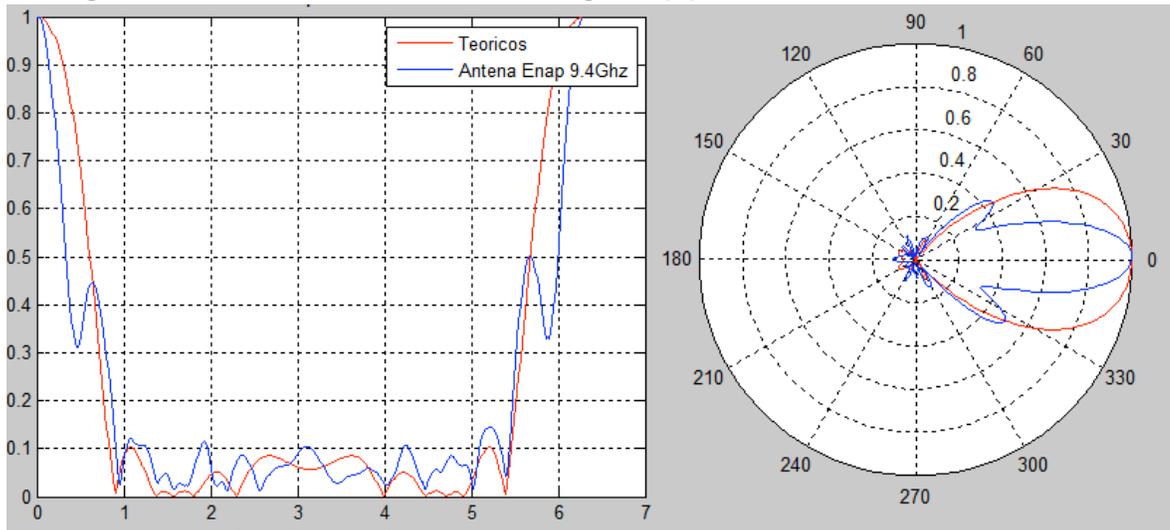
Lambda: 0.031915
Circunferencia de una Vuelta: 0.025133m
Angulo de Inclinación entre Espiras: 15.5636°
Tamaño de una Vuelta: 0.026089m
Radio Axial: 1.0455
Factor de Fase: 19.6873°
Ancho de banda de media potencia: 33.4776
Primeros nulos: 74.0371
Directividad: 36.19
    
```

Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

El usuario vuelve a oprimir “ENTER” y el programa “Helicoidal2” continua desplegando graficas comparativas de los patrones de radiación entre los datos

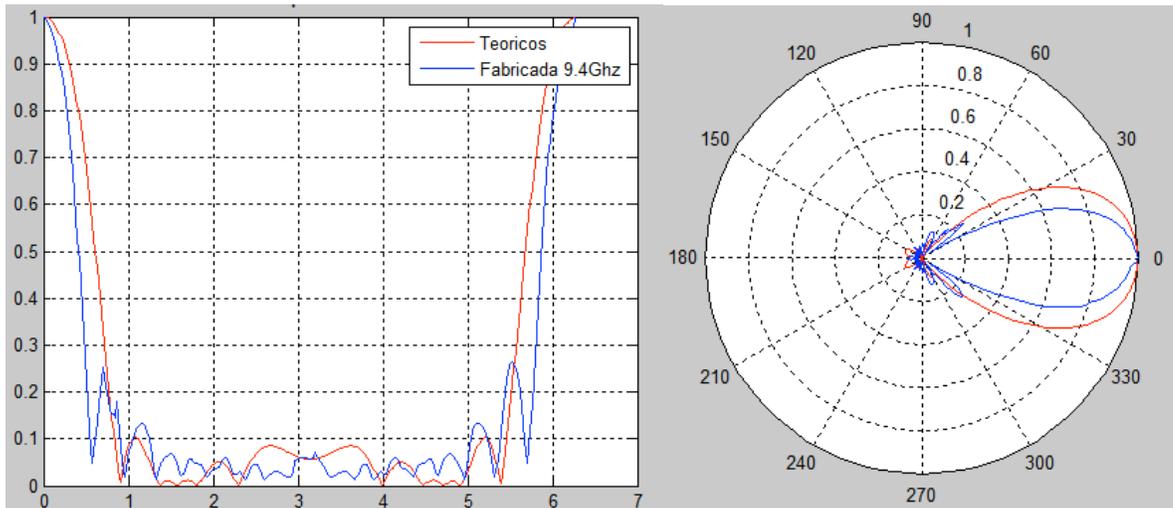
teóricos con los datos experimentales de la antena de referencia ENAP de 9.4 GHz como se ve en la figura 30 y con la antena fabricada que esta escalada de 2.4 GHz a 9.4 GHz en la figura 31, cuyos análisis se explican en los subcapítulos 5.1.2 y 5.1.3

Figura 30 Patrón de radiación rectangular y polar Teórico Vs Antena ENAP.



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Figura 31 Patrón de radiación rectangular y polar Teórico Vs Antena Fabricada

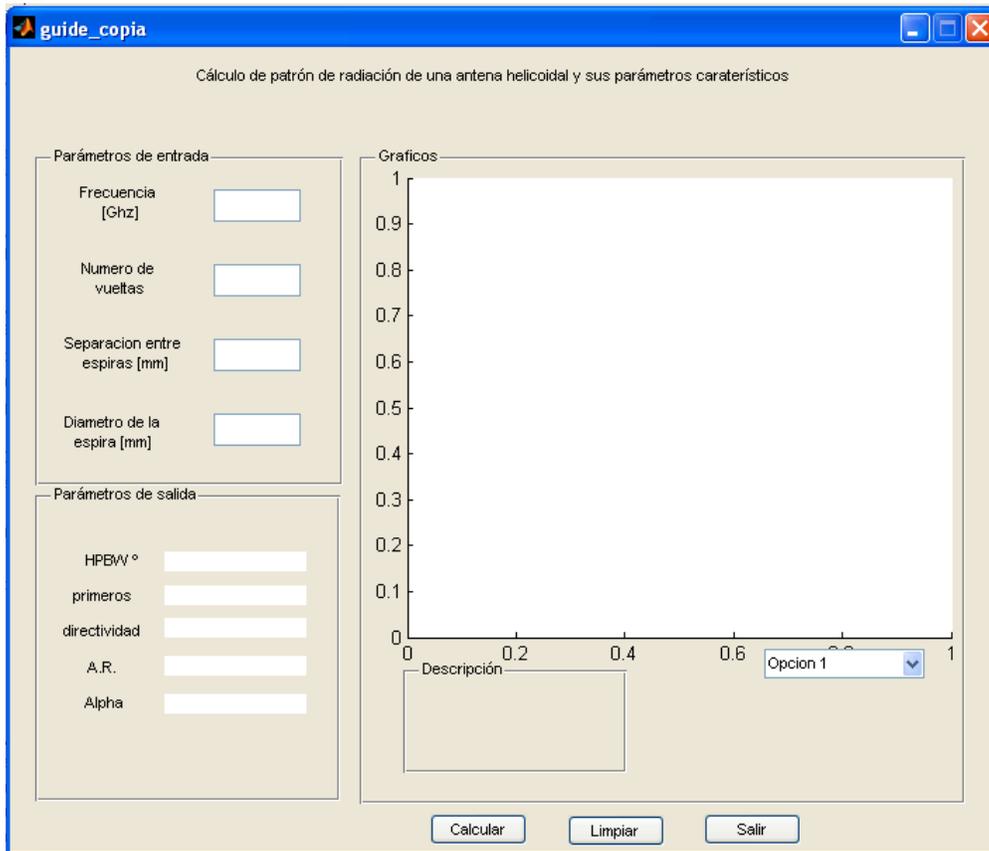


Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

5.2 DESCRIPCIÓN SOFTWARE GUIDE

El programa “GUIDE” a diferencia del “Helicoidal2”, utiliza una interface gráfica de matlab que se llama Guide y que permite una presentación más agradable y fácil operación al usuario. Este software le da la libertad al usuario de ingresar los valores de los parámetros de entrada y verificar si los patrones de radiación que se despliegan, son los que el usuario necesita. Al arrancar el programa, este muestra una ventana inicial, como se puede observar en la figura 32, en donde se debe colocar en las casillas ubicadas en la parte superior izquierda, los parámetros de entrada que son la frecuencia de operación (gigahertz), número de vueltas, separación entre espiras (en milímetros) y diámetro de la antena (en milímetros). En la parte inferior izquierda encontrara los parámetros de salida, que son ancho de banda de media potencia (HPBW), primeros nulos, directividad, radio axial y ángulo de atenuación (alpha), los cuales son calculados por el programa.

Figura 32 Presentación inicial interfaz gráfica

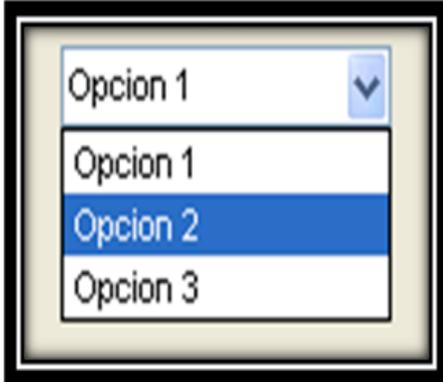


FUENTE: Programa GUIDE. Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

En la parte superior derecha, es donde se despliegan tres graficas que describen el comportamiento de la antena helicoidal que se haya configurado. El usuario

puede decidir cuál de las tres opciones puede escoger oprimiendo el menú desplegable de la figura 33, el cual está ubicado en la parte inferior derecha de la ventana, y sirve para la selección de los estilos de presentación gráfica que se requieren en el análisis de los patrones de radiación.

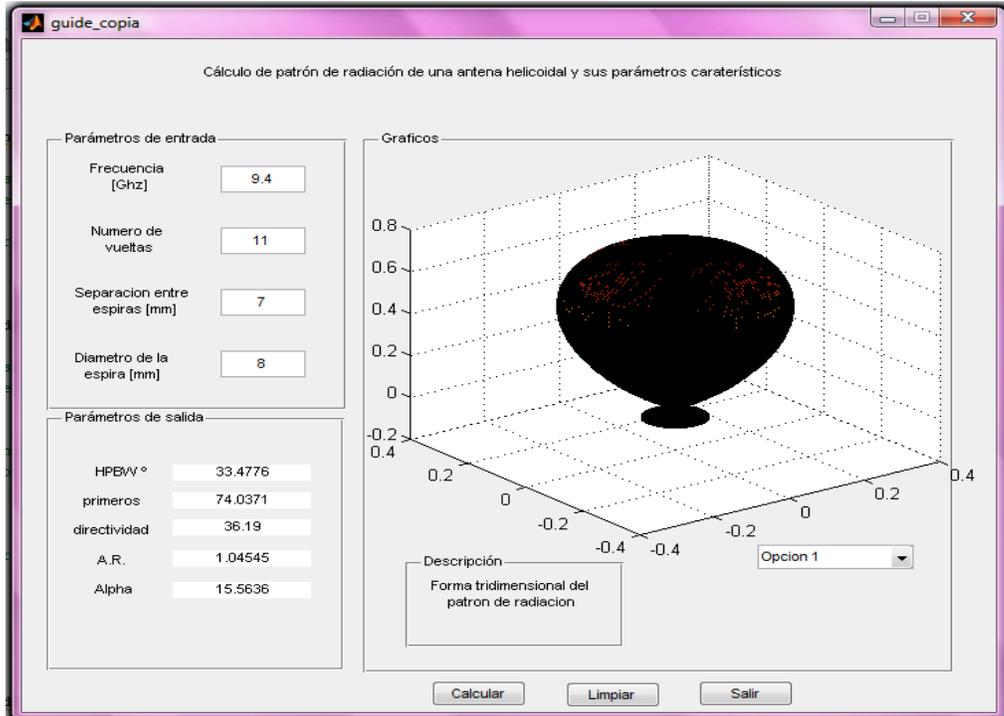
Figura 33 Menú Desplegable Para Opciones Graficas



FUENTE: Programa GUIDE. Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Después de ingresar los parámetros de entrada, oprima el botón calcular, que está en la parte inferior de la ventana. Luego oprima la opción 1 del menú de opciones desplegables para la presentación de gráficos y aparecerá la forma tridimensional del patrón de radiación, como se muestra en la figura 34.

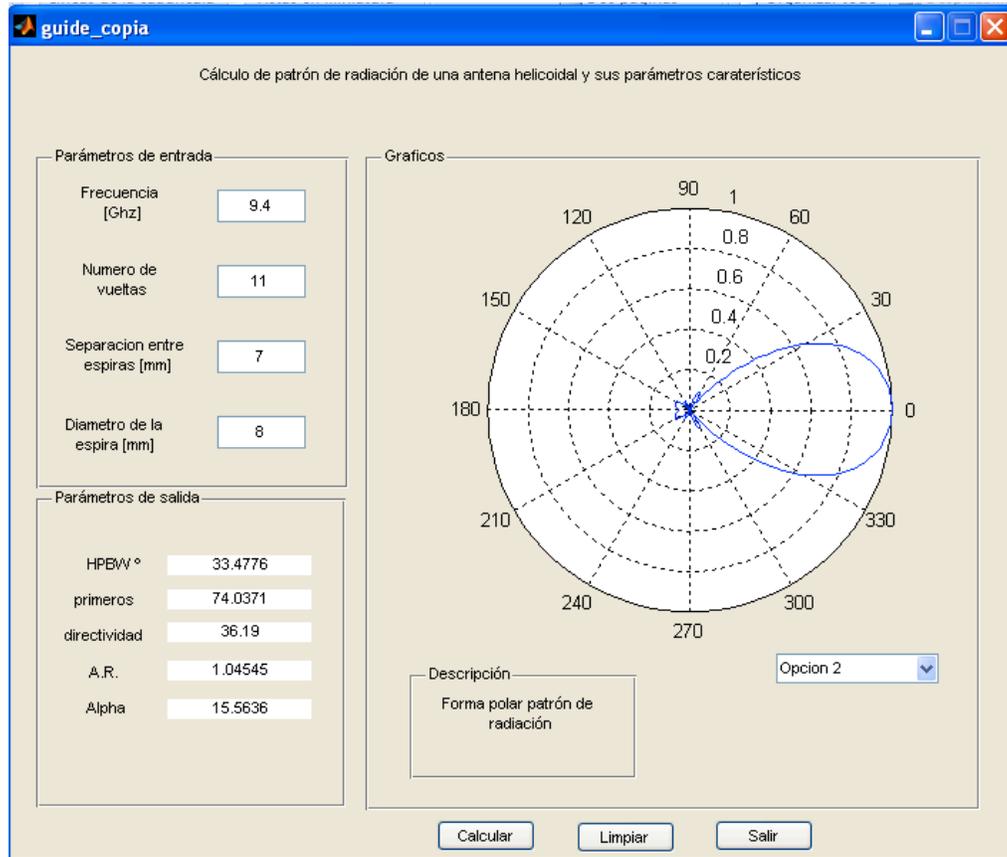
Figura 34 Presentación opción 1. Patrón de radiación en Forma Tridimensional



FUENTE: Programa GUIDE. Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

En la figura 35 se muestra al usuario la presentación que se obtiene al seleccionar la opción 2 dentro del menú de opciones gráficas, la cual presenta la forma polar del patrón de radiación, el cual muestra las magnitudes del patrón para cada posición angular.

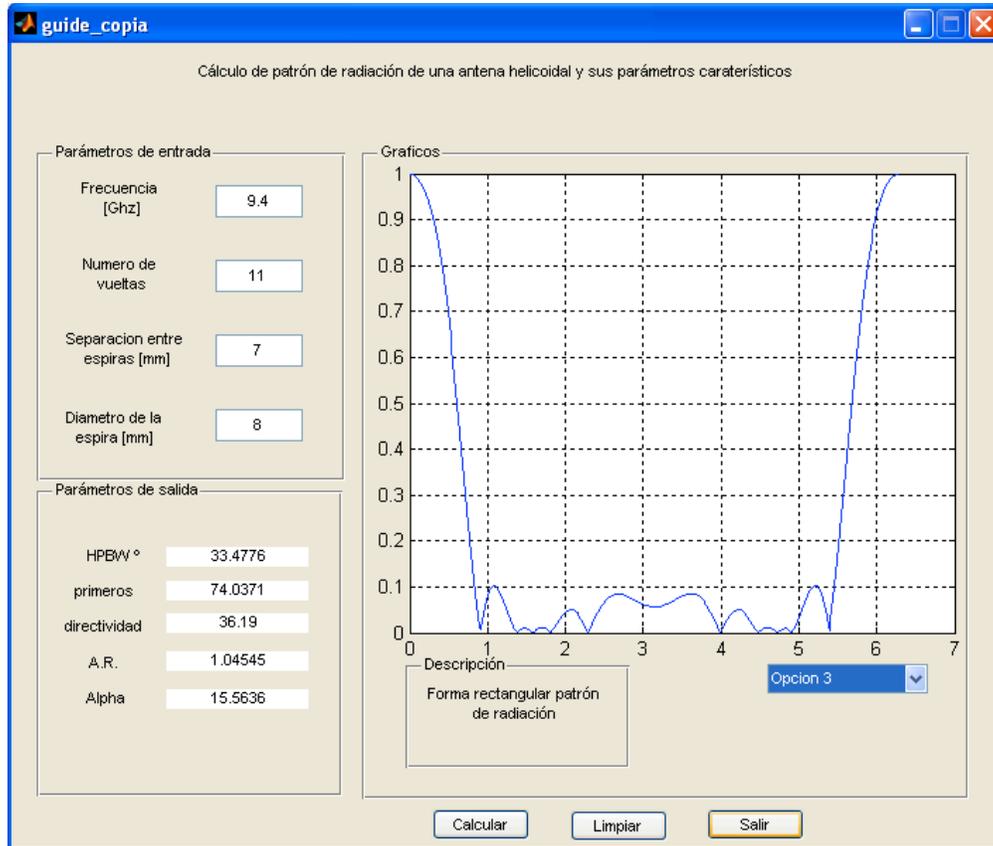
Figura 35 Presentación opción 2. Patrón de Radiación en Forma Polar



FUENTE: Programa GUIDE. Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

En la figura 36 se muestra al usuario la presentación que se obtiene al seleccionar la opción 3 dentro del menú de opciones gráficas, la cual presenta la forma rectangular del patrón de radiación, la cual presenta el valor normalizado de los datos para cada posición angular en radianes, pero presentados de forma rectangular, esto brinda le brinda una ayuda al usuario para obtener un análisis complementario de los patrones de radiación.

Figura 36 Presentación opción 3 Patrón Radiación Forma Rectangular



FUENTE: Programa GUIDE. Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Finalmente, si el usuario desea calcular nuevos patrones de radiación con parámetros de entradas diferentes al anterior, el puede oprimir el botón “limpiar” y este borrará todos los datos de las casillas, permitiendo al usuario que vuelva a empezar. En caso de que haya terminado, el usuario puede oprimir el botón “salir” y dar por terminado la operación del programa “GUIDE”.

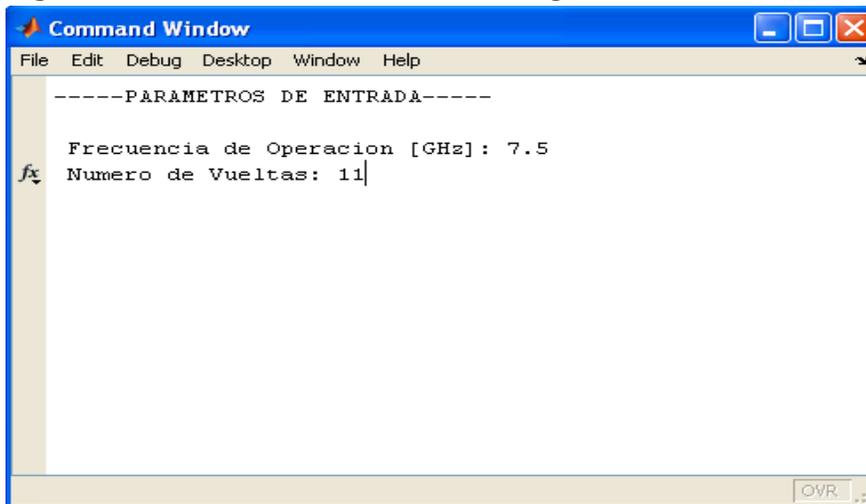
5.3 DESCRIPCIÓN SOFTWARE DESIGNE

Como se explico en el capítulo 2 “Fundamentación teorica Antena Helicoidal”, para diseñar una antena helicoidal, se requieren dos parametros iniciales para poderla diseñar, que son la frecuencia de operación y el número de vueltas/espiras. El programa para diseño de antenas helicoidales “*Designe*”, fue diseñado para que exija solamente introducir la frecuencia de operación y el

número de vueltas deseado, entregando los datos necesarios para construir una antena helicoidal.

Al arrancar el programa “*Designe*”, este despliega una ventana como la de la figura 37, en donde el usuario debe colocar los valores de los parametros de entrada (Frecuencia y número de vueltas) que el usuario necesita.

Figura 37. Parámetros entrada del Programa diseñado.



FUENTE: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

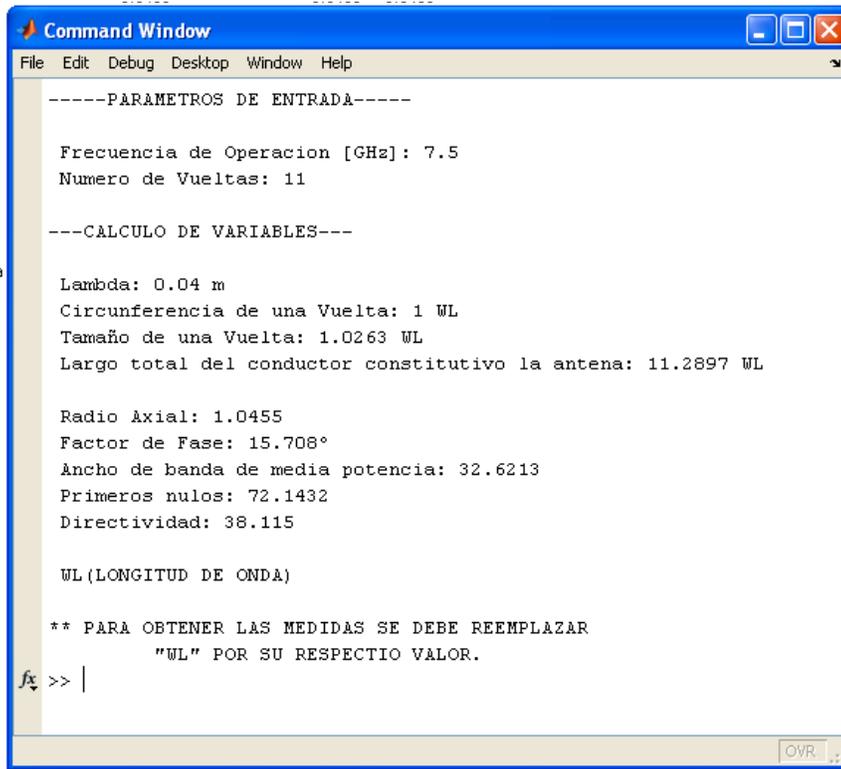
El programa finalmente presentará las variables de salida, como se ve en la figura 38, las cuales contienen la información necesaria para construir físicamente la antena que es la circunferencia de una vuelta, el tamaño de una vuelta, la longitud de onda y el largo total del hilo conductor que se requiere para enrollarlo y crear las espiras de la antena helicoidal. De igual forma se presentan otros parámetros característicos de la antena, en cuanto a su patrón de radiación tales como:

- Directividad
- Hancha de haz de media potencia
- Relación axial
- Factor de fase
- Primeros nulos

Con esta información el usuario podrá determinar que ajustes puede realizar, saber que cantidad de conductor necesita para realizar el enrollado en torno a un

eje cuyo perímetro debería coincidir con el *tamaño de vuelta* que arroja el programa.

Figura 38. Ventana Calculo Variables del programa *DESIGNE*.



```
Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
-----PARAMETROS DE ENTRADA-----

Frecuencia de Operacion [GHz]: 7.5
Numero de Vueltas: 11

---CALCULO DE VARIABLES---

Lambda: 0.04 m
Circunferencia de una Vuelta: 1 WL
Tamaño de una Vuelta: 1.0263 WL
Largo total del conductor constitutivo la antena: 11.2897 WL

Radio Axial: 1.0455
Factor de Fase: 15.708°
Ancho de banda de media potencia: 32.6213
Primeros nulos: 72.1432
Directividad: 38.115

WL (LONGITUD DE ONDA)

** PARA OBTENER LAS MEDIDAS SE DEBE REEMPLAZAR
   "WL" POR SU RESPECTIO VALOR.

fx >> |
OVR
```

FUENTE: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal
Diseñado Por Los Autores

6 TOMA DE DATOS, ANÁLISIS DE PRUEBA DE ANTENAS Y PRUEBA DEL SOFTWARE DE ANTENAS HELICOIDALES

En este capítulo se desarrolla una confrontación entre la teoría y la práctica. Utilizando los equipos mencionados en el capítulo tercero se tomaron los datos obtenidos del patrón de radiación de la antena helicoidal de la ENAP y se desarrolló el software "*Helicoidal2*", que al introducir como entradas las características geométricas de la antena y la frecuencia de trabajo (9.4 GHz), arroja un patrón de radiación similar al obtenido en la práctica. Con este software se procedió a comparar los datos de la teoría con la antena de la ENAP y se determinó el coeficiente de correlación y similitud de ambos patrones, validando de esta manera el software "*Helicoidal2*". Como se mencionó en el capítulo cuatro el software también entrega los datos para medir el ancho de haz, directividad, nulos y demás parámetros de las antenas helicoidales.

Posterior a la validación de "*Helicoidal2*", se diseñó y fabricó una antena para el sistema de video del proyecto UAV de la Escuela Naval. Debido a que el equipo de prueba de la Escuela Naval trabaja a 9.4GHz, se escaló el diseño en frecuencia desde 2.4GHz a 9.4GHz, y para poder realizar la confrontación teórico experimental, dicha antena fue sometida a las pruebas en los módulos del CASSY LAB y posteriormente los datos arrojados fueron comparados con los datos teóricos del software "*Helicoidal2*" y con los de la antena helicoidal de la ENAP, determinando la similitud tanto con los datos teóricos, como con la antena original de la ENAP.

Finalmente se hacen los cálculos matemáticos correspondientes para diseñar una antena de 2.4 GHz con 11 espiras, cuyos resultados son comparados con los resultados del software "*Designe*", validando de esta manera este programa.

6.1 DATOS TEORICOS

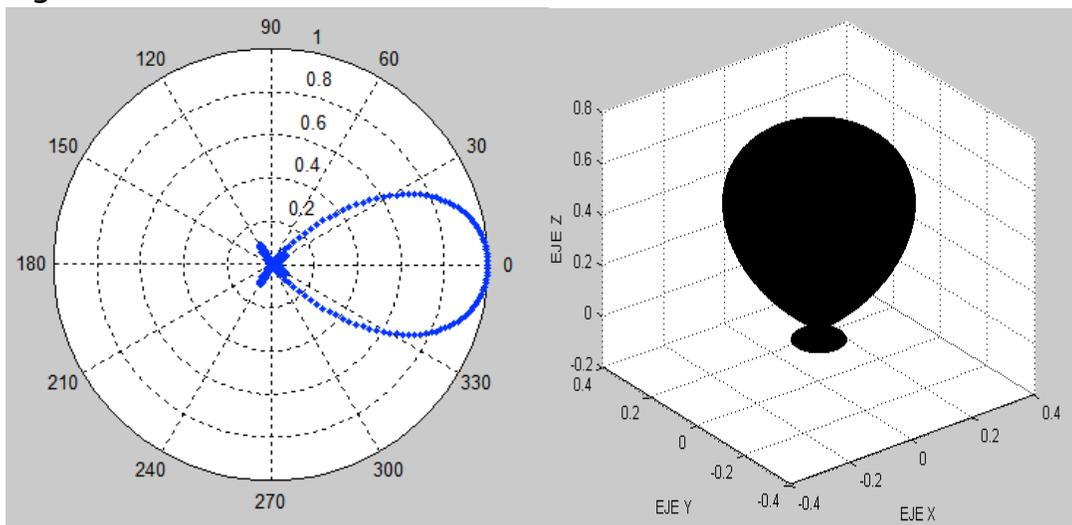
Los datos teóricos son calculados por el software "*Helicoidal2*" (Anexo D), cuya descripción ya fue elaborada en el capítulo 4.1. Los valores de los parámetros de entradas que se colocaron inicialmente para el análisis, dependen de las características técnicas de los equipos de prueba que se tienen en la Escuela

Naval (módulos del CASSY LAB). Por lo tanto los valores que se introducen son los siguientes:

- Frecuencia de operación : 9.4 Ghz
- Numero de vueltas : 11 espiras
- Distancia entre espiras : 7 milímetros
- Diámetro de la Antena : 8 milímetros

Después de colocar los datos, se oprime el botón “ENTER”, para que el programa inicie el análisis y empiece arrojar los resultados. El programa arroja los primeros gráficos y resultados de los cálculos de las variables, como se pueden ver en las figuras 39 y 40.

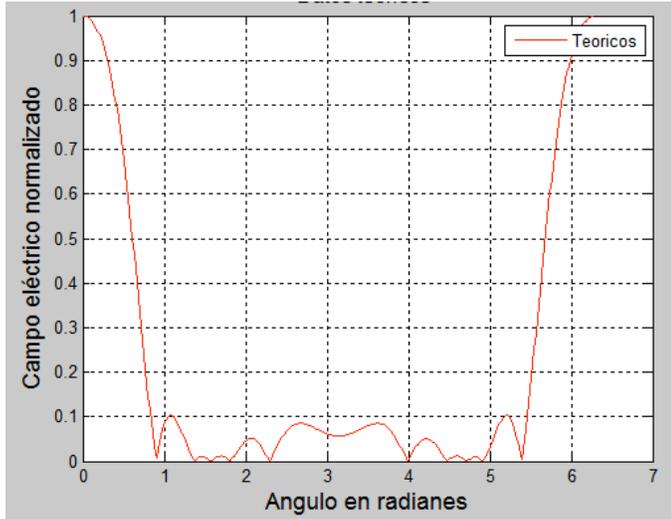
Figura 39. Patrón de Radiación Teórico.



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

En la figura 39 se puede observar los patrones de radiación tridimensional y polar teóricos con los parámetros de entrada ya mencionados. En la figura 40 se puede apreciar el valor del campo eléctrico para cada posición angular.

Figura 40 Datos teóricos – Campo eléctrico Vs Angulo en radianes



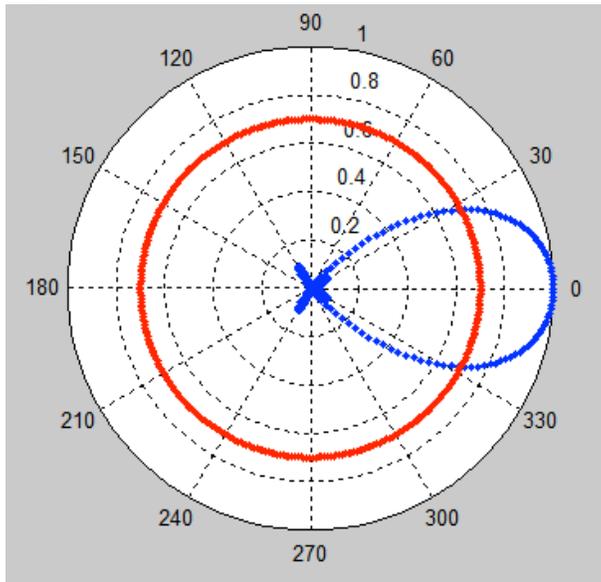
Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Con los cálculos de las variables, el programa “*Helicoidal2*” suministro los siguientes resultados:

- Lambda: 0.031915
- Frecuencia de operación: 9.4 Ghz
- Circunferencia de una Vuelta: $0,79 \lambda$,
- Angulo de Inclinación entre Espiras: 15.5636°
- Tamaño de una Vuelta: 0.82λ
- Radio Axial: 1.0455
- Factor de Fase: 19.6873°
- Ancho de banda de media potencia: 33.4776
- Primeros nulos: 74.0371°
- Directividad: 15.58 Db

Oprimiendo “ENTER” nuevamente, el programa proyecta el patrón de radiación teórico con la línea de media potencia, como se puede observar en la figura 41.

Figura 41 Patrón de Radiación Teórico con línea de media potencia.



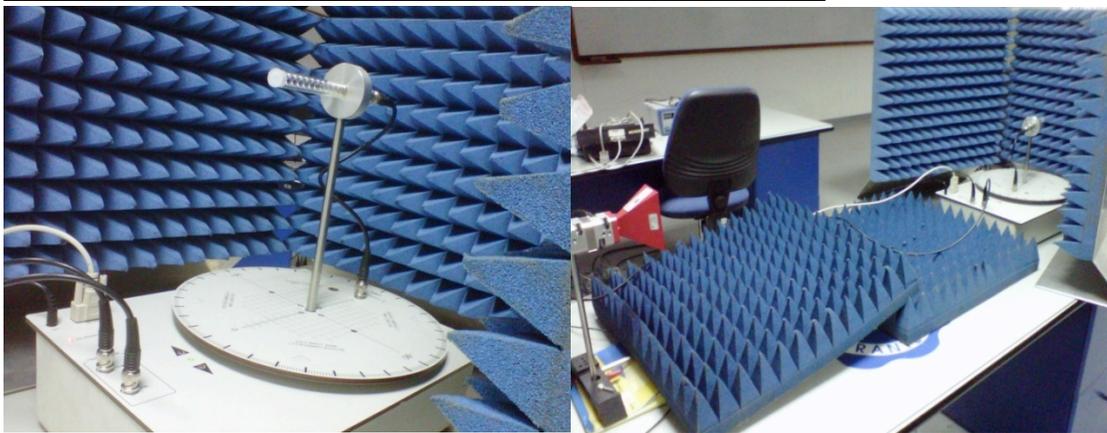
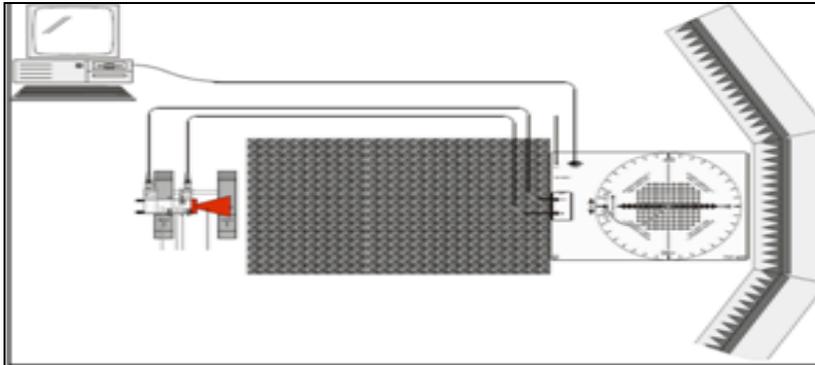
Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

6.2 ANTENA HELICOIDAL DE REFERENCIA ENAP 9.4 GHZ.

La antena helicoidal de la ENAP es una antena helicoidal que trabaja a 9.4Ghz y fue utilizada como referencia para la calibración del equipo, y para comparar los datos teóricos del software "Helicoidal2" y la antena fabricada. Esta antena fue instalada en la plataforma giratoria y puesta a prueba a una frecuencia de 9.4 GHz, como se puede observar en la figura 42. Los datos de las pruebas realizadas a la antena de la ENAP se encuentran en el anexo "E". Las características geométricas de la antena helicoidal ENAP son las siguientes:

- Numero de vueltas : 11 espiras
- Distancia entre espiras : 7 milímetros
- Diámetro de la Antena : 8 milímetros
- Longitud Total de la Antena : 9.3 cm

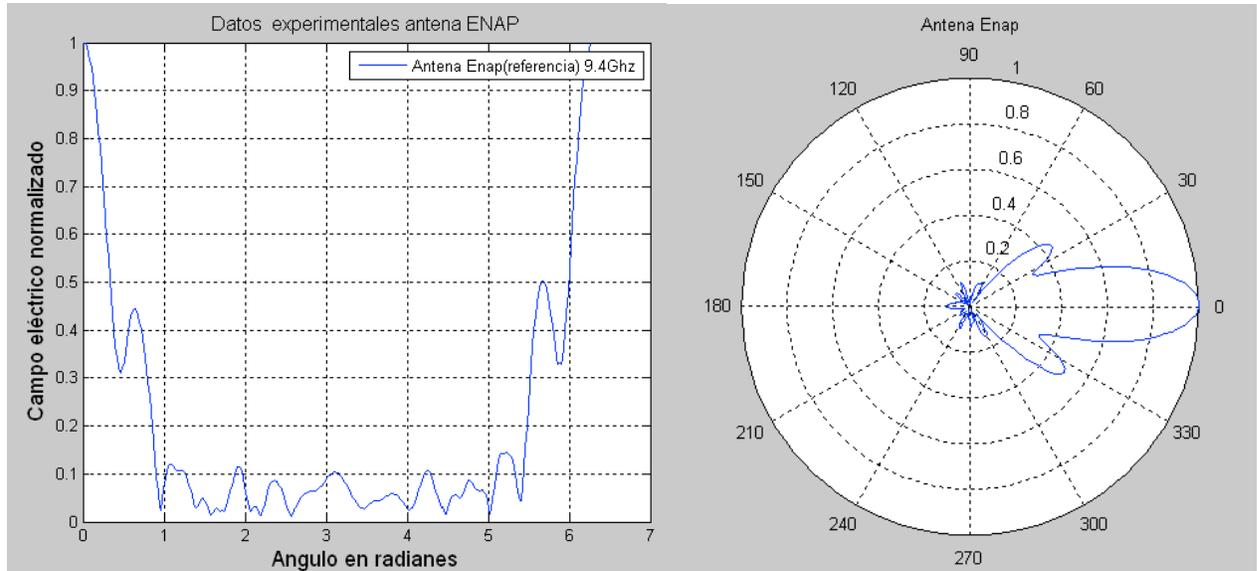
Figura 42 Prueba Antena ENAP.



Fuente: Laboratorio antenas ENAP

En la prueba experimental se tomaron los datos de campo eléctrico en cada posición angular, como se puede observar en la figura 43, teniendo el patrón de radiación en forma rectangular y polar de esta antena. Estos datos fueron introducidos en el software "*Helicoidal2*" para poder hacer las comparaciones entre las antenas y los datos teóricos.

Figura 43 Patrón de Radiación en forma Rectangular y Polar de la Antena ENAP

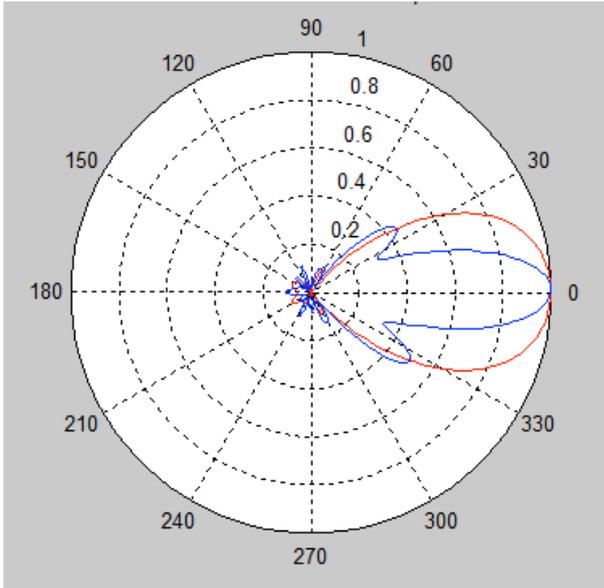


Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Como se mencionó anteriormente, al desarrollar las expresiones de campo y las expresiones de diseño con el script de Matlab, se obtienen los valores teóricos, los cuales son comparados con los valores obtenidos de forma experimental para ambas antenas, la suministrada por el fabricante laybold didactic (Módulos CASSY LAB), que es la antena ENAP, y la antena fabricada y escalada de 9.4 a 2.4 Ghz.

Por intermediodel software "Helicoidal2", se realiza la comparación entre el patrón radiación teorico normalizado y el patrón de la antena ENAP (Figura 44) y cuyos datos fueron agregados a la matriz de datos comparativa para poder hacer la comparación con Matlab.

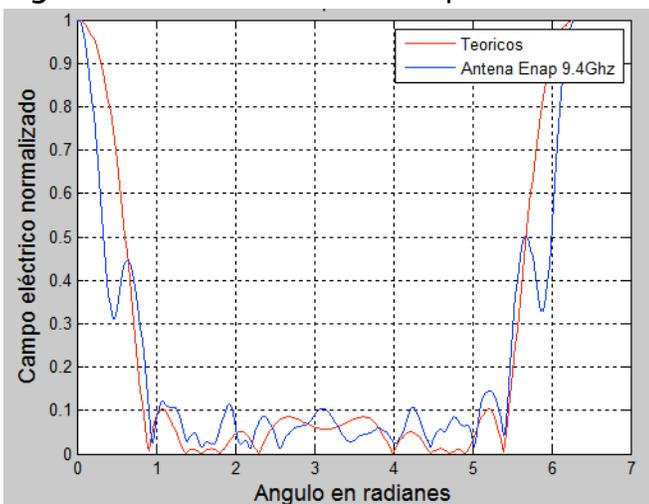
Figura 44 Patrón teórico (rojo) Vs Patrón práctico (azul) Antena ENAP.



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

La figura 45, compara en representación rectangular, los datos teóricos de campo electrico normalizado en cada posición angular contra los experimentales de la antena ENAP y se puede observar a simple vista que la diferencia entre ambos es pequeña.

Figura 45 Datos teóricos Vs Experimentales Antena ENAP.



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

El algoritmo calculó que el ancho de banda de media potencia (HPBW) es de 27.0752° para la antena ENAP y 56.156° al modelo teórico, la correlación que existe entre los datos teóricos y los experimentales es de 0.93012, lo cual indica una correlación alta entre ambos datos, esto partiendo de la definición típica de correlación, la cual dice que entre más próxima a 1 es indicador de que la relación entre dos variables es más fuerte, además se obtuvo un valor medio cuadrático EMC 1.761%, con base a los valores normalizados, Por lo tanto se puede decir que el comportamiento entre los datos teóricos y la antena de referencia es el esperado.

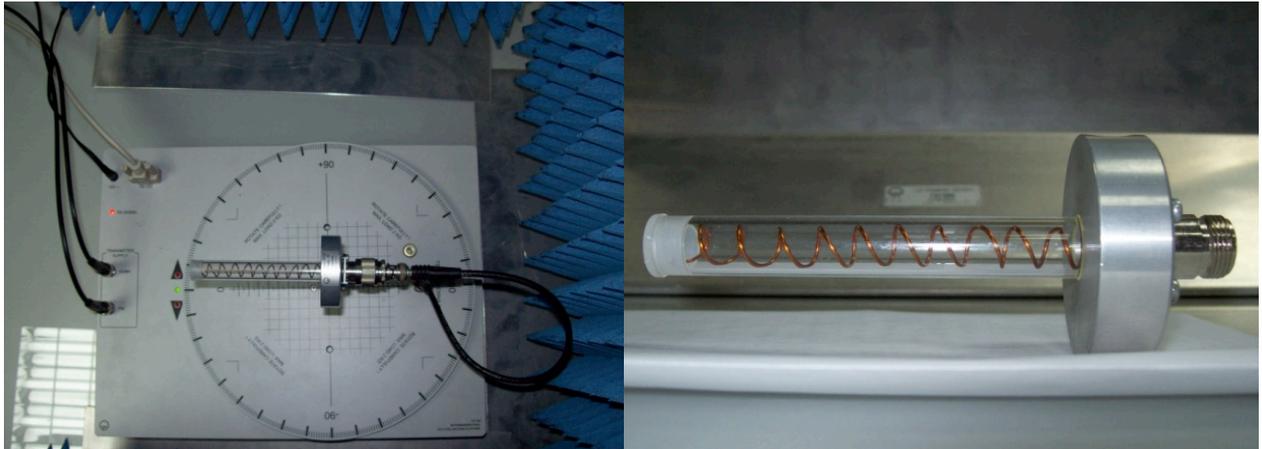
6.3 ANTENA FABRICADA, ESCALADA DE 2.4GHZ 9.4 GHZ.

Para la fabricación de una antena helicoidal exactamente igual a la de la ENAP, se utilizó un conector hembra BNC tipo N, 13 centímetros de alambre de cobre de 14 mm de espesor y se fabricó un reflector en aluminio con las mismas medidas que el de la antena original que corresponde a una circunferencia de 5.4 cm de diámetro, con un espesor de 1.5cm y un perímetro de 17.2 cm. EL alambre fue enrollado manualmente en un cilindro de ocho milímetros de diámetro hasta tener las 11 espiras con una separación uniforme de siete milímetros.

La antena helicoidal fabricada (figura 46), fue colocada en la plataforma giratoria y puesta a prueba a una frecuencia de 9.4 GHz como se puede observar en la figura 47. Los datos de las pruebas realizadas a la antena fabricada se encuentran en el anexo "F". Las características geométricas de la antena helicoidal fabricada son las siguientes:

Numero de vueltas	:	11 espiras
Distancia entre espiras	:	7 milímetros
Diámetro de la Antena	:	8 milímetros
Longitud Total de la Antena	:	9.3 cm

Figura 46 Antena FABRICADA.



Fuentes: Laboratorio antenas ENAP

Los datos geométricos de la antena fabricada son exactamente iguales a las de la antena ENAP. Se fabricó con alambre de cobre con un espesor de 14 milímetros, que es el mismo que el de la original. La diferencia radica en el recubrimiento que tiene la antena ENAP.

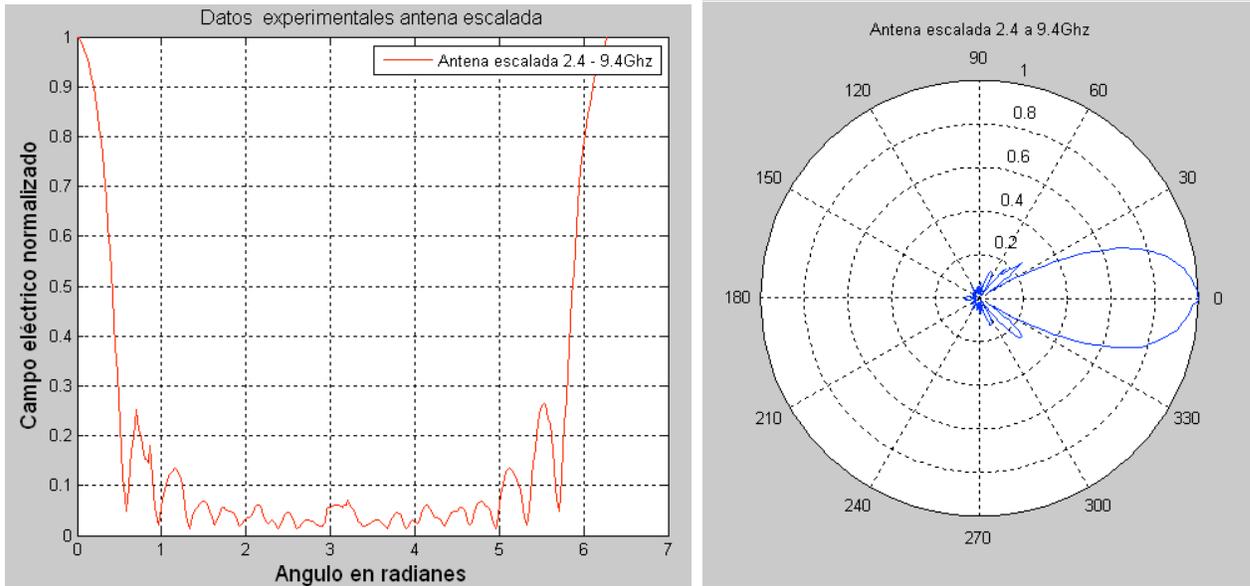
Figura 47 Prueba Antena Fabricada.



Fuentes: Laboratorio antenas ENAP

Los patrones de radiación obtenidos durante el experimento son los que se observan en la figura 48 tanto en forma rectangular como en forma polar.

Figura 48 Patrón Radiación Antena escalada 2.4-9.4Ghz en Forma Rectangular y Polar

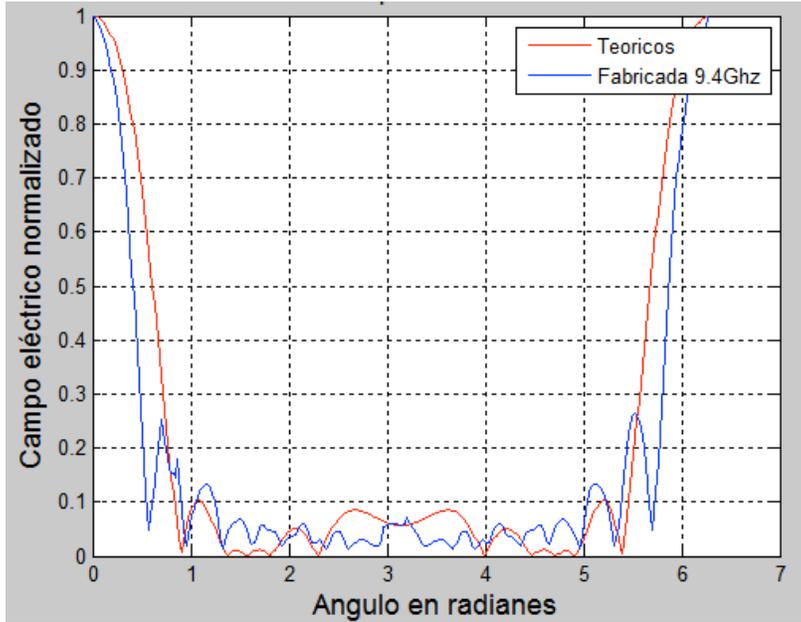


Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Estos datos (Anexo F), son introducidos en el software *"Helicoidal2"* para poder realizar el análisis y comparar los patrones de radiación de la antena escalada fabricada con los datos teóricos y luego lo compara con la antena ENAP, determinando la correlación y el error cuadrático como se muestra en el capítulo 6.3.1 y 6.3.2.

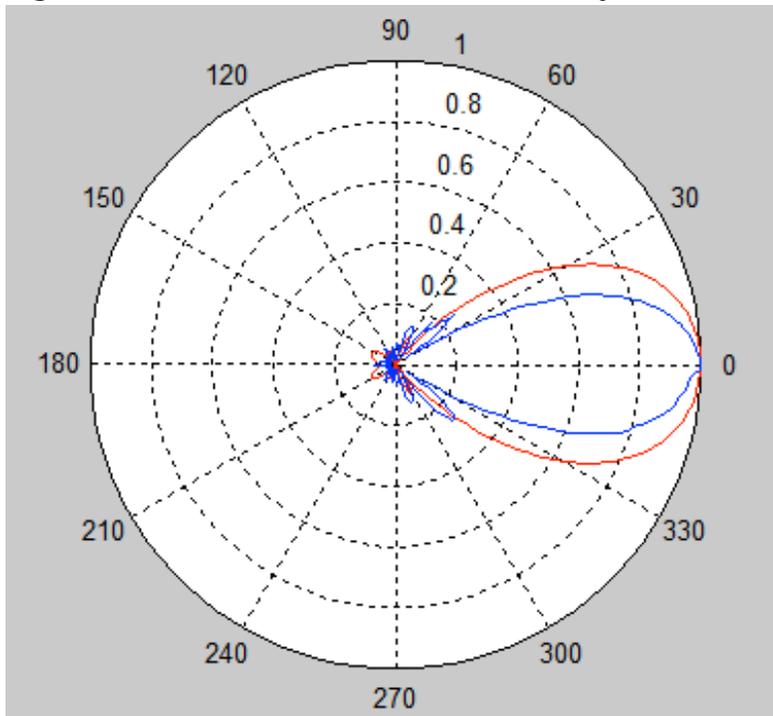
6.3.1 Análisis Comparativo entre Datos Teóricos y Antena fabricada. Como se puede observar en la figura 49, el algoritmo *"Helicoidal2"* muestra el contraste entre los datos experimentales obtenidos de la antena escalada en frecuencia vs los datos obtenidos del modelo teórico, de forma que se pueda apreciar el comportamiento de las antenas para cada posición angular dada en radianes y en la figura 50 se puede observar la comparación de los patrones de radiación teóricos Vs experimentales en forma polar.

Figura 49 Datos teóricos Vs Experimentales Antena fabricada



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Figura 50 Patrón de Radiación Teórico (rojo) Vs Patrón antena Fabricada (azul).

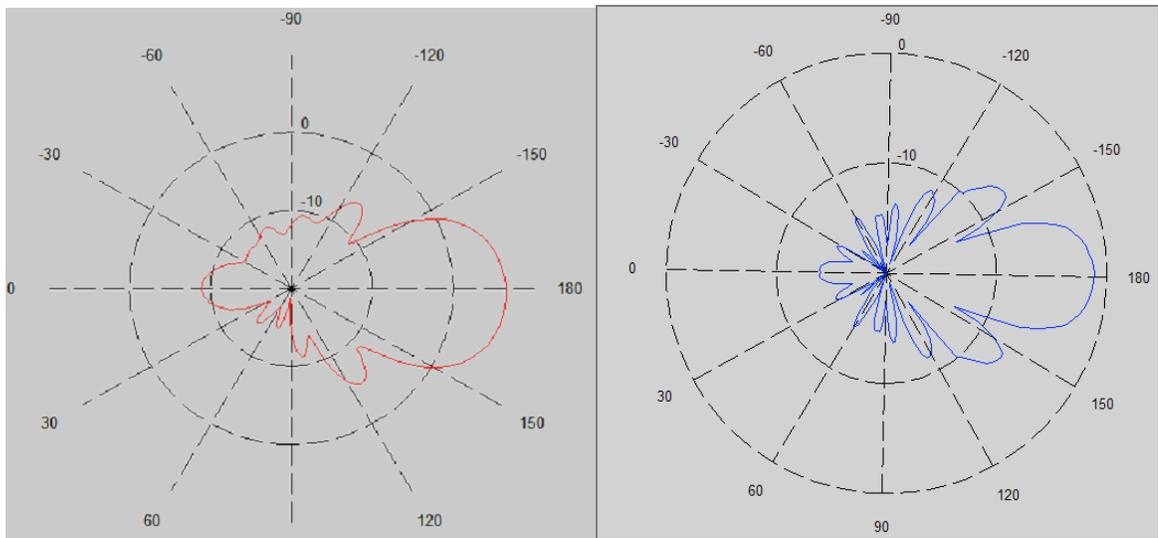


Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

De acuerdo con los cálculos realizados por el programa, el ancho de banda de media potencia (HPBW) para la antena escalada, y para el modelo teóricos son 47.1309° y 56.156° respectivamente, la correlación que existe entre los datos teóricos y los experimentales es de 0.93, y se obtuvo un error medio cuadrático 1.696%, por lo que se puede decir que la antena escalada respondió de forma óptima, ya que la diferencia entre el ancho de media potencia difiere en un 16% respecto del teórico y conservando la forma característica del patrón.

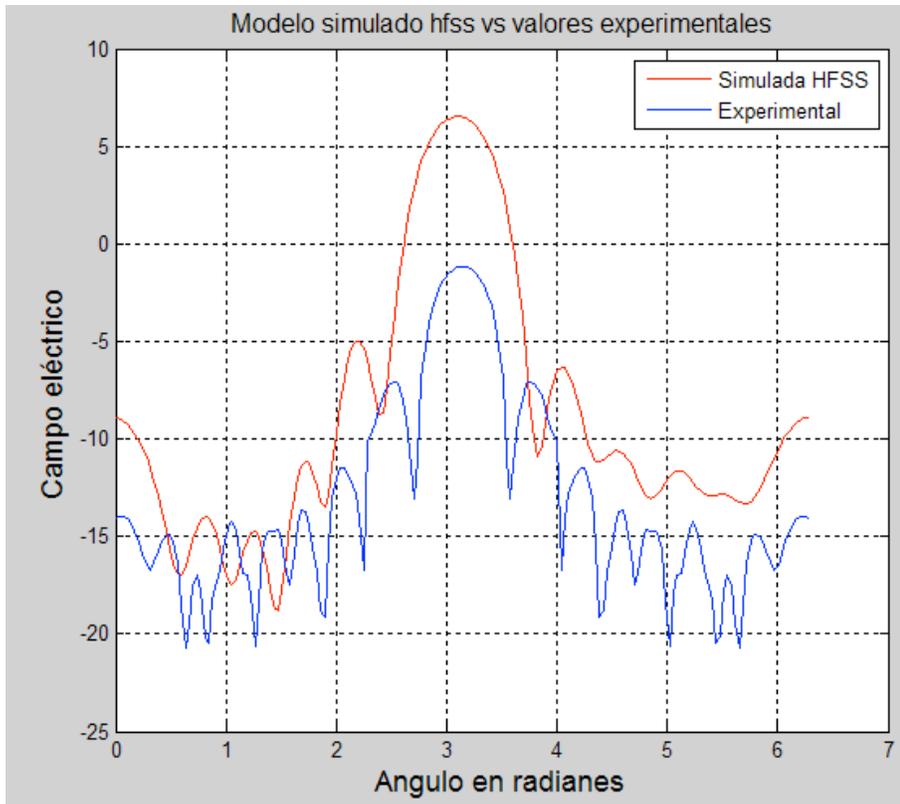
Análisis Comparativo entre Antena fabricada y Antena ENAP. En la figura 51 y 52 se comparan el patrón de radiación de la antena helicoidal simulado en el programa de análisis electromagnético HFSS vs la antena fabricada, el algoritmo cálculo una correlación de 0.85, si bien el valor de la correlación bajó respecto del valor teórico que se considera en el modelo matemático, esto se debe a que el modelo matemático no tiene en consideración los aportes que pueden tener el cable coaxial y el conector, sin embargo el valor de correlación que se obtiene aún sigue siendo fuerte dado que se acerca más a **1**

Figura 51 Patrón de Radiación Antena ENAP (Rojo) Vs Patrón Radiación Antena Fabricada (azul).



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

Figura 52 Patrón de Radiación simulado HFSS (Rojo) Vs Patrón Radiación experimental (azul). REPRESENTACIÓN CARTESIANA.



Fuente: Programa Para Cálculo Patrón Radiación De Antena Helicoidal Diseñado Por Los Autores

6.4 DISEÑO ANTENA 2.4 GHz

Se diseñó la antena helicoidal de 2.4GHz y 11 vueltas, sin embargo no se contó con los equipos para trabajar a dicha frecuencia de operación, por lo cual se escaló el diseño en frecuencia⁶, de 2.4 GHz a 9.4GHz, de modo que se pudiera probar de forma práctica dicha escalada con el equipo del Cassylab el cual trabaja a 9.4 GHz

Para el diseño de la antena a 2.4 GHz se utilizó como base el software "Helicoidal2" para crear el software "Design" descrito en el capítulo 4.3, cuyo código se encuentra en el Anexo "C", el cual solo entrando el parámetro de la frecuencia y el número de vueltas, este código entrega la longitud de onda, la Circunferencia de una Vuelta, el Tamaño de una Vuelta, el largo total de la antena, el Radio axial, el factor de fase, ancho de banda de media potencia, primeros nulos y directividad de la antena que se fabrica.

Con estos datos el usuario puede saber si la antena cumple con los requerimientos para el cual se quiere construir. La frecuencia y el número de vueltas son los parámetros que voluntariamente un ingeniero tiene para diseñar la antena helicoidal y el código se encarga de hacer los cálculos matemáticos que le indican los demás parámetros geométricos y electromagnéticos.

Teniendo en cuenta lo anterior y la teoría sobre diseño de antenas helicoidales explicado en el capítulo 2, para el diseño de la antena helicoidal en una frecuencia de trabajo de 2.4 GHz y número de espiras igual a 11, se toman en cuenta las siguientes consideraciones para obtener un diseño óptimo:

$$\frac{3}{4} < \frac{C}{\lambda} < \frac{4}{3}$$

$$12 \leq \alpha \leq 14$$

Relación entre circunferencia y longitud de onda

Ángulo de inclinación

Estas condiciones son importantes ya que de estas es que se podrá determinar la separación entre las espiras de la antena helicoidal⁷. Luego:

$$f=2.4\text{GHz}(\text{s}^{-1})$$

$$N=11(\text{espiras})$$

⁶ Antenna Theory Third Edition, Constantine A. Balanis ,Capítulo 17.10, pág 1044

⁷Para escalar la antena en frecuencia, los resultados de las expresiones se presentaron en unidades de longitud de onda.

c_L ,=velocidad de la luz en el vacío = 3×10^8 m/s

$$\frac{c_L}{f} = \lambda \therefore \lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.4 \times 10^9 \text{ Ghz}} = 0.125 \text{ m}$$

Promediando los extremos de la relación $\frac{C}{\lambda}$ para un diseño optimo

$$\frac{\frac{3}{4} + \frac{4}{3}}{2} = 1.04 \rightarrow \frac{C}{\lambda} \cong 1$$

Promediando los extremos para el valor de ángulo de inclinación (α) para un diseño optimo

$$\frac{12 + 14}{2} = 13 \rightarrow \alpha = 13^\circ$$

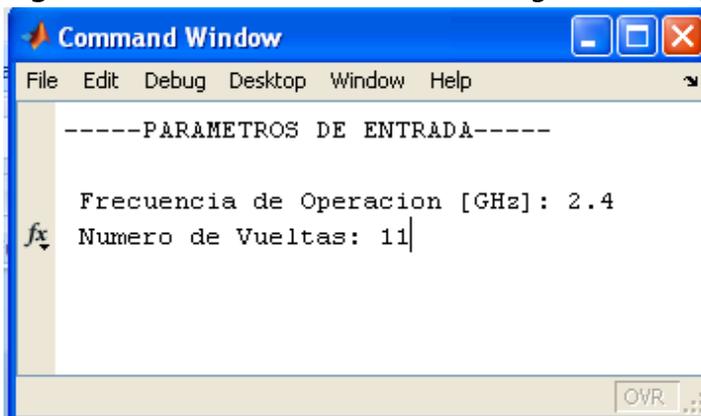
Luego

$$\frac{C}{\lambda} \cong 1 \rightarrow C \sim \lambda, \alpha = 13^\circ \rightarrow S = C \tan(\alpha) \therefore S = \lambda \tan(13^\circ) \rightarrow S = 0.231\lambda$$

$$L_o = \lambda \sqrt{0.231^2 + 1^2} \rightarrow L_o = 1.0263\lambda$$

Después de estos cálculos, se procedió a iniciar el software “*Designe*”, este pide al usuario que introduzca los parámetros de frecuencia y numero de vueltas que se desea tenga la antena helicoidal, que para este caso corresponde a 2.4 GHz y 11 Vueltas respectivamente, como se ve en la figura 52.

Figura 53 Parámetros de Entrada Programa “*Designe*”



Fuente: Programa “*Designe*” Creado Por Los Autores

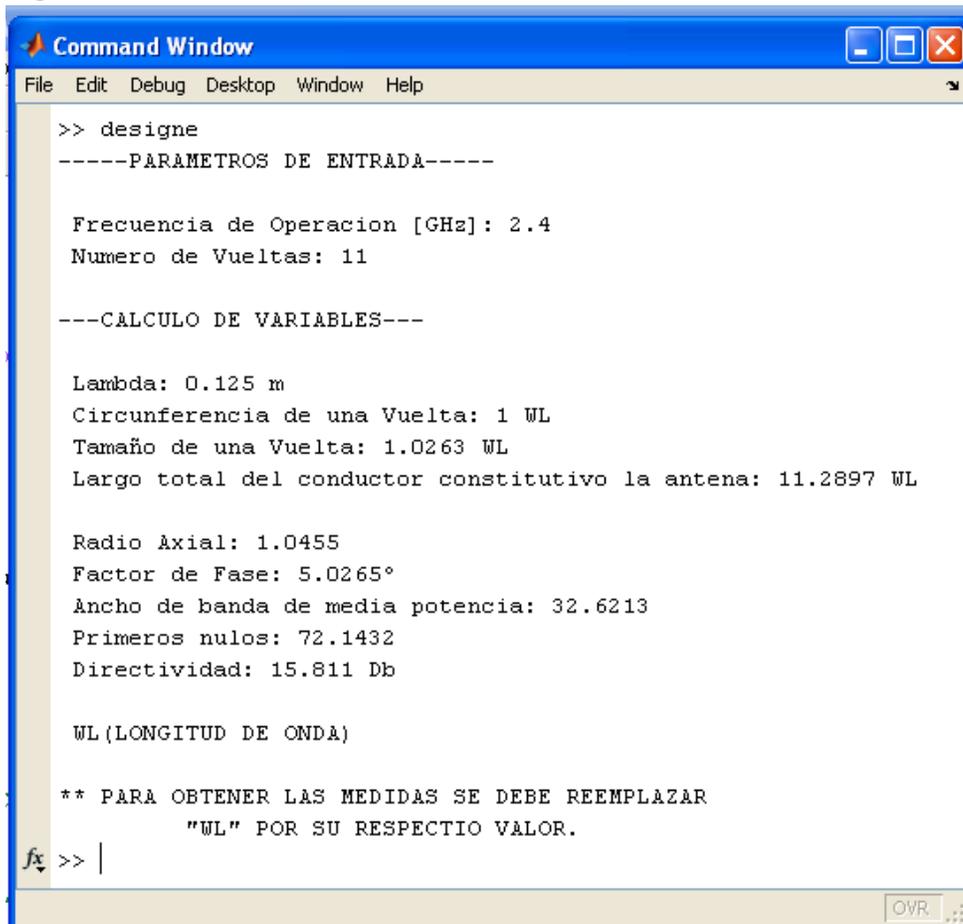
El programa arroja la información necesaria en longitudes de onda WL⁸ que le permite al usuario conocer las dimensiones de la antena.

En la figura 53 se puede observar los cálculos de las variables que comparándolos con los cálculos matemáticos descritos anteriormente se puede observar que son iguales, determinado de esta manera que el software "*Design*" si funciona correctamente. De igual manera el software presentan cálculos adicionales tales como:

- Longitud de Onda: 0.125 m
- Circunferencia de una Vuelta (C): 1WL
- Tamaño de una Vuelta (Lo): 1.0263WL
- Largo total de la antena: 11.2897 WL
- Radio Axial: 1.0455
- Factor de Fase: 5.0265°
- Ancho de banda de media potencia: 32.6213
- Primeros nulos: 72.1432
- Directividad: 15.811 Db

⁸ WL: wave length, longitud de onda. Es la abreviatura con la cual se medirá las unidades de longitud de onda

Figura 54 Cálculo de Variables Antena 2.4 GHz



```
>> designe
-----PARAMETROS DE ENTRADA-----

Frecuencia de Operacion [GHz]: 2.4
Numero de Vueltas: 11

---CALCULO DE VARIABLES---

Lambda: 0.125 m
Circunferencia de una Vuelta: 1 WL
Tamaño de una Vuelta: 1.0263 WL
Largo total del conductor constitutivo la antena: 11.2897 WL

Radio Axial: 1.0455
Factor de Fase: 5.0265°
Ancho de banda de media potencia: 32.6213
Primeros nulos: 72.1432
Directividad: 15.811 Db

WL(LONGITUD DE ONDA)

** PARA OBTENER LAS MEDIDAS SE DEBE REEMPLAZAR
   "WL" POR SU RESPECTIO VALOR.
fx >> |
```

Fuente: Programa “Design” Creado Por Los Autores

En caso de que se decida cambiar la frecuencia de transmisión de video del UAV, esta herramienta podrá ser utilizada para determinar los nuevos parámetros de la antena helicoidal.

7 CONCLUSIONES

- Se superó el alcance previsto inicialmente en cuanto al desarrollo de los algoritmos para diseño y análisis de la antena en cuestión, logrando que el algoritmo aplique de forma genérica para cualquier frecuencia y no sólo el caso particular de nuestro enfoque.
- El software fue validado y representa una opción práctica para el diseño y, análisis de antenas helicoidales, se obtuvieron correlaciones alrededor de **0.92 y 0.93** y *errores medios cuadráticos* que no superan el 2%, de forma que las expectativas se ven superadas, mostrando en la práctica se obtuvieron resultados cercanos a lo ideal.
- El patrón de radiación de la antena fabricada tiene lóbulos laterales menos pronunciados comparados con los de la antena ENAP, permitiendo que concentre la mayor parte de su energía de manera localizada sin tantas pérdidas en la transmisión, lo que permitiría una mejor recepción de la señal de video del UAV.
- Al simular la antena en un software de cálculo electromagnético como *SuperNEC* trial versión V2.9, se puede realizar un análisis más completo de la antena, dado que se tiene en consideración los efectos que tiene el cable, la fuente y el conector en la respuesta de la antena, es así como se obtiene una correlación de 0.85 entre la simulación electro-magnética y los valores experimentales, y el error cuadrático medio se incrementa alrededor de los valores del lóbulo principal.

8. RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos a desarrollar con el diseño de la antena, en cuanto a su implementación se recomienda:

- Bobinar usando como guía a una plantilla con las especificaciones de la antena.
- Someter a prueba en laboratorio para obtener valores de onda estacionaria de voltaje.
- Obtener de forma experimental el valor de impedancia de la antena⁹, la cual debería ser próxima a 140 ohm, teniendo en cuenta las premisas de diseño.
- Fabricar el acople adecuado con el fin de adaptar la antena a los equipos que tiene como estándar una impedancia de 50 ohm.

⁹ Antennas From Theory To Practice First Edition, Yi Huang, Kevin Boyle , pág 150

BIBLIOGRAFIA

1. BALANIS, Constantine. Antenna Theory, Third Edition. Edición Wiley.
2. CARDAMA AZNAR, Ángel. Antenas. 2 Edición. Septiembre de 2002.
3. KRAUS, John. Antennas. McGraw Hill. 1950.
4. YI, Huang. BOYLE, Kevin. Antennas From Theory to Practice. A John Wiley and Sons editions. 2008.

ANEXOS

ANEXO "A"

Programa "HELICOIDAL2", para el cálculo del patrón de radiación de una antena helicoidal

```
%PARAMETROS DE ENTRADA
```

```
disp('-----PARAMETROS DE ENTRADA-----')
```

```
disp(' ')
```

```
%Frecuencia de Operación
```

```
f = input(' Frecuencia de Operacion [GHz]: ');
```

```
f = f*1e9;
```

```
%Numero de Vueltas
```

```
N = input(' Numero de Vueltas: ');
```

```
%Distancia entre Espiras
```

```
S = input(' Distancia entre Espiras [mm]: ');
```

```
S = S/1000;
```

```
%Diametro de la Antena
```

```
D = input(' Diametro de la Antena [mm]: ');
```

```
D = D/1000;
```

```
disp(' ');
```

```
%-----
```

```
%OBTENCION DE LA VARIABLES
```

```
disp('---CALCULO DE VARIABLES---')
```

```
disp(' ')
```

```
%Lambda
```

```
lambda = (3e8)/f;  
disp([' Lambda: ', num2str(lambda)]);
```

```
%Circunferencia de una Vuelta
```

```
C = pi*D;
```

```
disp([' Circunferencia de una Vuelta: ', num2str(C), 'm']);
```

```
%Angulo de Inclinación entre Espiras
```

```
alpha = atan(S/C);  
alpha = alpha*180/pi;  
disp([' Angulo de Inclinación entre Espiras: ', num2str(alpha), '°']);
```

```
%Tamaño de una Vuelta
```

```
Lo = (((C^2)+(S^2))^(0.5));  
disp([' Tamaño de una Vuelta: ', num2str(Lo), 'm']);
```

```
%Relacion axial de radio
```

```
AR = (2*N + 1)/(2*N);  
disp([' Radio Axial: ', num2str(AR)]);
```

```
%Factor de Fase
```

```
beta = 2*pi*f/(3*10e8);  
disp([' Factor de Fase: ', num2str(beta), '°']);
```

```
S=S/lambda;
```

```
HPBW=52/sqrt(N*S); % CALCULO ANCHO DE BANDA DE MEDIA POTENCIA  
disp([' Ancho de banda de media potencia: ', num2str(HPBW)]);
```

```
FNBW=115/sqrt(N*S); % CALCULO PRIMEROS NULOS
```

```
disp([' Primeros nulos: ', num2str(FNBW)]);
```

```
direct=15*N*S; % CALCULO directividad
```

```
disp([' Directividad: ', num2str(direct)]);
```

```
%PATRON DE RADIACION%-----  
% -----
```

```

t=0;
for theta=linspace(0,2.*pi,360)
t=t+1;
    p=0;
for phi=linspace(0,2.*pi,360)
p=p+1;
cita=2.*pi.*(S.*(1-cos(theta)+1./(2.*N)));
    E=sin((pi./2)./(2.*N)).*sin(cita.*N./2).*cos(theta)./sin(cita./2);
Ex(t,p)=E.*sin(theta).*cos(phi);
Ey(t,p)=E.*sin(theta).*sin(phi);
Ez(t,p)=E.*cos(theta);
end
end
figure(1)
surf(Ex,Ey,Ez)
TITLE('PATRÓN DE RADIACIÓN PRODUCIDO POR UNA ANTENA
HELICOIDAL','FontSize',12);
xlabel('EJE X')
ylabel('EJE Y')
zlabel('EJE Z')

t=0;
for theta=linspace(0,2.*pi,360)
t=t+1;
cita=2.*pi.*(S.*(1-cos(theta)+1./(2.*N)));
    E(t)=sin((pi./2)./(2.*N)).*sin(cita.*N./2).*cos(theta)./sin(cita./2);

end

%%%%% CARGAR LOS DATOS DE DATOS.MAT PARA REALIZAR LOS CALCULOS DE
LOS PARÁMETROS
loaddatos.mat
% DATOS.MAT ES UNA MATRIZ DE 360x4
% columna 1 angulo 0-360 en radianes
% columna 2 valores teoricos de E
% columna 3 valores experimentales Antena ENAP 9.4Ghz
% columna 4 valores experimentales antena fabricada para 9.4Ghz

```

```

mediap=0.7.*ones(360,1);%Línea de media potencia
angulo=datos(:,1);
E_1= datos(:,2);%teóricos
E_2= datos(:,3);%enap
E_3= datos(:,4);%fabricada

```

```

figure(2) % valores teóricos
grafica1=plot(datos(:,1),datos(:,2),'r');
hleg = legend('Teóricos');
TITLE('Datos teóricos ','FontSize',12);
xlabel('Angulo en radianes','FontSize',13);
ylabel('Campo eléctrico normalizado','FontSize',13);
grid

```

```

figure(3)
polar(linspace(0,2.*pi,360),E/max(E),'.b')
title('PATRON DE RADIACION TEORICO');

```

```

pause
hold

```

```

polar (angulo,mediap, '.r');
title('linea de media potencia');
pause

```

```

%%-----

```

```

%-----
% Graficos Patron de Radiación Normalizado -----
-----

```

%COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS PATRONES DE RADIACIÓN

```
figure(4) % valores teoricos vs valores experimentales antena Enap
grafica=plot(datos(:,1),datos(:,2), 'r',datos(:,1),datos(:,3));
hleg = legend('Teoricos','Antena Enap 9.4Ghz');
TITLE('Datos teóricos vs experimentales antena ENAP','FontSize',12);
xlabel('Angulo en radianes','FontSize',13);
ylabel('Campo eléctrico normalizado','FontSize',13);
grid
```

```
figure (5)% Teoricos vs antena Enap
polar (angulo,E_1,'r');
title('Normalizado');
pause
hold
polar (angulo,E_2);
title('Teoricos vs antena Enap');
pause
```

%%%%%%%%-----

```
figure(6) % valores teoricos vs valores experimentales antena fabricada a medida
segun la antena Enap
grafica1=plot(datos(:,1),datos(:,2),'r',datos(:,1),datos(:,4));
hleg = legend('Teoricos','Fabricada 9.4Ghz');
TITLE('Datos teóricos vs experimentales antena fabricada','FontSize',12);
xlabel('Angulo en radianes','FontSize',13);
ylabel('Campo eléctrico normalizado','FontSize',13);
grid
```

```
figure (7)% Teoricos vs antena fabricada
polar (angulo,E_1,'r');
title('Normalizado');
pause
hold
```

```
polar (angulo,E_3);
title('Teóricos vs antena fabricada 9.4Ghz');
pause
```

```
%%%-----
```

```
figure(8) % valores experimentales antena enap vs antena fabricada
grafica2=plot(datos(:,1),datos(:,3),'r' ,datos(:,1),datos(:,4));
hleg = legend('Antena Enap','Fabricada 9.4Ghz');
TITLE('Experimentales Enap vs Experimentales antena fabricada','FontSize',12)
xlabel('Angulo en radianes','FontSize',13);
ylabel('Campo eléctrico normalizado','FontSize',13);
grid
```

```
figure (8)% Antena Enap vs antena fabricada
polar (angulo,E_2,'r');
title('Normalizado');
pause
hold
polar (angulo,E_3);
title('(Antena Enap vs antena fabricada) 9.4Ghz');
pause
```

```
%%%cálculo de los angulos de media potencia para cada antena
%%%teorico
```

```
con=1;
for x=1:360
if datos(x, 2)<=0.7 & con==1
ang(1)=datos(x, 1);
con=0;
end
if datos(x, 2)>=0.7 & con==0
ang(2)=datos(x, 1);
con=2;
end
end
```

```
%%%% Antena Enap
```

```
con=1;  
for x=1:360  
if datos(x, 3)<=0.7 & con==1  
angenap(1)=datos(x, 1);  
con=0;  
end  
if datos(x, 3)>=0.7 & con==0  
angenap(2)=datos(x, 1);  
con=2;  
end  
end
```

```
%%%% Antena Fabricada
```

```
con=1;  
for x=1:360  
if datos(x, 4)<=0.7 & con==1  
angfab(1)=datos(x, 1);  
con=0;  
end  
if datos(x, 4)>=0.7 & con==0  
angfab(2)=datos(x, 1);  
con=2;  
end  
end
```

```
% Mostrar los anchos de bandas de media potencia de cada antena
```

```
ang=ang.*180/pi; %lo transforma a grados a la antena teorica  
hpbw1=360+ang(1,1)-ang(1,2); %ancho de banda antena teorica
```

```
disp([' HPBW TEORICO: ', num2str(hpbw1), '°']);
```

```
%ancho de banda antena practica ENAP
```

```
angenap=angenap.*180/pi; %lo transforma a grados a la antena práctica ENAP  
hpbw2=360+angenap(1,1)-angenap(1,2);%ancho de banda antena práctica ENAP
```

```
disp([' HPBW ENAP: ', num2str(hpbw2), '°']);
```

```

%%-----
%%-----
%ancho de banda antena fabricada.

angfab=angfab.*180/pi ; %lo transforma a grados
hpbw3=360+angfab(1,1)-ang(1,2); %ancho de banda antena Fabricada

disp([' HPBW FABRICADA: ', num2str(hpbw3), '°']);

%-----
%-----
%-----

corr1=corrcoef(E_1,E_2);%%correlacion entre antena teorico vs antena enap
corr1=corr1(1,2);
disp([' Correlación TEORICO-ENAP: ', num2str(corr1),]);

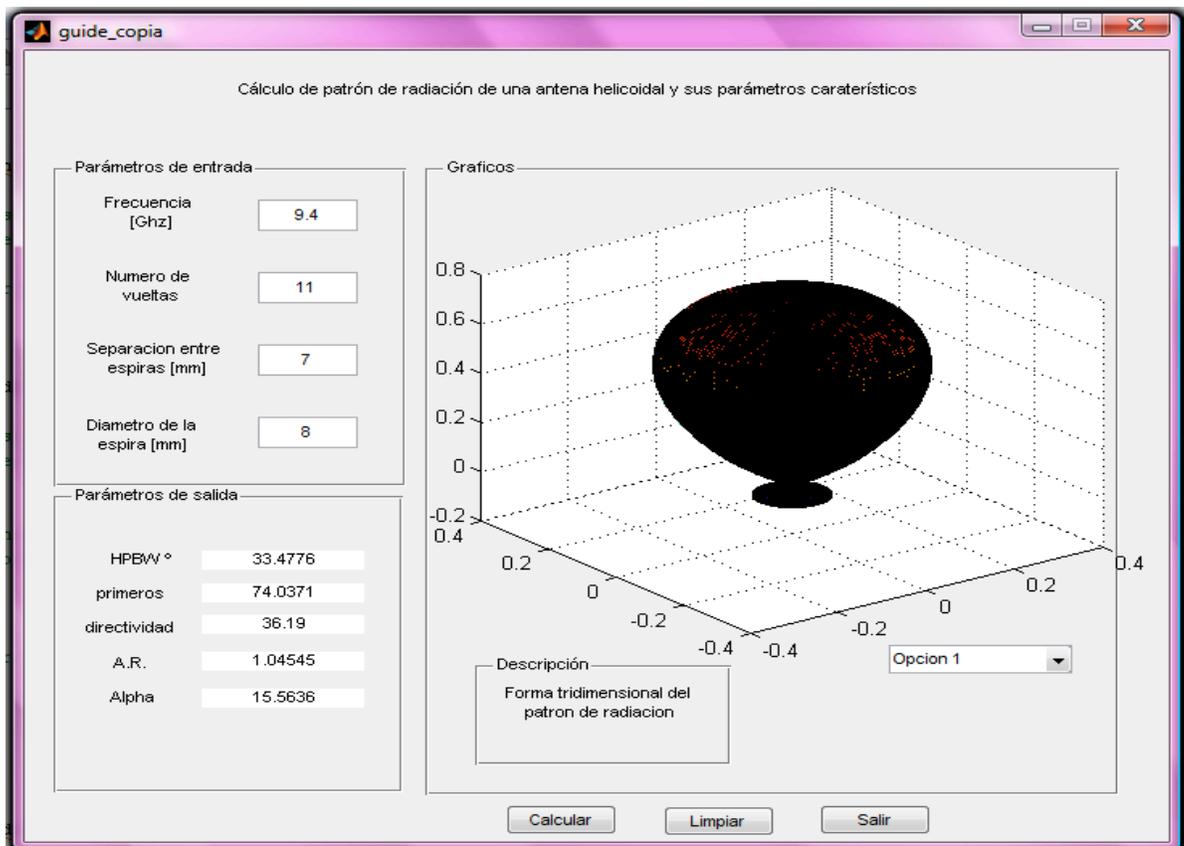
corr2=corrcoef(E_1,E_3);%%correlacion entre antena teorico vs antena fabricaa
corr2=corr2(1,2);
disp([' Correlación TEORICO-FABRICADA: ', num2str(corr2),]);

corr3=corrcoef(E_2,E_3);%%correlacion entre antena enap vs antena fabricada
corr3=corr3(1,2);
disp([' Correlación TEORICO-ENAP: ', num2str(corr3),]);

```

ANEXO “B”

Presentación del Software “*GUIDE*” para el cálculo del patrón de radiación de una antena helicoidal con interface *GUIDE*



```

function varargout = guide_copia(varargin)
% GUIDE_COPIA M-file for guide_copia.fig
%   GUIDE_COPIA, by itself, creates a new GUIDE_COPIA or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = GUIDE_COPIA returns the handle to a new GUIDE_COPIA or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   GUIDE_COPIA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in GUIDE_COPIA.M with the given input
arguments.
%
%   GUIDE_COPIA('Property','Value',...) creates a new GUIDE_COPIA or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before guide_copia_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to guide_copia_OpeningFcn via varargin.
%

```

```

% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help guide_copia

% Last Modified by GUIDE v2.5 25-Jun-2011 13:02:43

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 0;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @guide_copia_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @guide_copia_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn', [] , ...
'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before guide_copia is made visible.
function guide_copia_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to guide_copia (see VARARGIN)

% Choose default command line output for guide_copia

```

```

handles.output = hObject;

opciones=cell(1,3);
opciones(1,1)={'Opcion 1'};
opciones(1,2)={'Opcion 2'};
opciones(1,3)={'Opcion 3'};
set(handles.popupmenu1, 'String', opciones);
guidata(hObject,handles)

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes guide_copia wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = guide_copia_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function frecuencia_entrada_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to frecuencia_entrada (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of frecuencia_entrada as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of frecuencia_entrada as a
double
frecuencia_entrada=str2double(get(hObject,'String'));
handles.frecuencia_entrada=frecuencia_entrada;
guidata(hObject, handles);

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frecuencia_entrada_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to frecuencia_entrada (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function vueltas_entrada_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to vueltas_entrada (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of vueltas_entrada as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of vueltas_entrada as a
double
vueltas_entrada=str2double(get(hObject,'String'));
handles.vueltas_entrada=vueltas_entrada;
guidata(hObject, handles);

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function vueltas_entrada_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to vueltas_entrada (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```
set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
functionseparacion_entrada_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject handle to separacion_entrada (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)  
  
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of separacion_entrada as text  
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of separacion_entrada as  
a double  
separacion_entrada=str2double(get(hObject,'String'));  
handles.separacion_entrada=separacion_entrada;  
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.  
functionseparacion_entrada_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% hObject handle to separacion_entrada (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called  
  
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.  
% See ISPC and COMPUTER.  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
functiondiametro_entrada_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject handle to diametro_entrada (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)  
  
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of diametro_entrada as text  
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of diametro_entrada as a  
double
```

```
diametro_entrada=str2double(get(hObject,'String'));
handles.diametro_entrada=diametro_entrada;
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function diametro_entrada_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to diametro_entrada (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
f=handles.frecuencia_entrada;
N=handles.vueltas_entrada;
S=handles.separacion_entrada;
D=handles.diametro_entrada;
```

```
%PARAMETROS DE ENTRADA
```

```
%Frecuencia de Operación
```

```
f = f*1e9;
```

```
%Numero de Vueltas
```

```
%Distancia entre Espiras
```

```
S = S/1000;
```

```
%Diametro de la Antena
```

```
D = D/1000;
```

```

%-----
%OBTENCION DE LA VARIABLES
%Lambda
lambda = (3e8)/f;
%Circunferencia de una Vuelta
C = pi*D;
%Angulo de Inclinación entre Espiras
alpha = atan(S/C);
alpha = alpha*180/pi;
%Tamaño de una Vuelta
Lo = (((C^2)+(S^2))^(0.5));
%Relacion axial de radio
AR = (2*N + 1)/(2*N);
%Factor de Fase
beta = 2*pi*f/(3*10e8);
S=S/lambda;
HPBW=52/sqrt(N*S); % CALCULO ANCHO DE BANDA DE MEDIA POTENCIA
FNBW=115/sqrt(N*S); % CALCULO PRIMEROS NULOS
direct=15*(N*S); % CALCULO directividad

%%----- VARIABLES DE SALIDA -----
handles.alpha=alpha;
set(handles.pitch, 'String', (handles.alpha));
%
handles.HPBW=HPBW;
set(handles.ancho, 'String', (handles.HPBW));

handles.FNBW=FNBW;
set(handles.nulos, 'String', (handles.FNBW));

handles.direct=direct;
set(handles.text22, 'String', (handles.direct));

handles.AR=AR;
set(handles.raxial, 'String', (handles.AR));

% -----

```

```

t=0;
for theta=linspace(0,2.*pi,360)
    t=t+1;
    p=0;
    for phi=linspace(0,2.*pi,360)
        p=p+1;
        cita=2.*pi.*(S.*(1-cos(theta)+1./(2.*N)));
        E=sin((pi./2)./(2.*N)).*sin(cita.*N./2).*cos(theta)./sin(cita./2);
        Ex(t,p)=E.*sin(theta).*cos(phi);
        Ey(t,p)=E.*sin(theta).*sin(phi);
        Ez(t,p)=E.*cos(theta);
    end
end

```

```

t=0;
for theta=linspace(0,2.*pi,360)
    t=t+1;
    cita=2.*pi.*(S.*(1-cos(theta)+1./(2.*N)));
    E(t)=sin((pi./2)./(2.*N)).*sin(cita.*N./2).*cos(theta)./sin(cita./2);

```

```

end
%%%% CARGAR LOS DATOS DE DATOS.MAT PARA REALIZAR LOS CALCULOS DE
LOS PARÁMETROS

```

```

loaddatos.mat
% DATOS.MAT ES UNA MATRIZ DE 360x4
% columna 1 angulo 0-360 en radianes
% columna 2 valores teoricos de E
% columna 3 valores experimentales Antena ENAP 9.4Ghz
% columna 4 valores experimentales antena fabricada para 9.4Ghz
mediap=0.7.*ones(360,1);%Línea de media potencia
angulo=datos(:,1);
E_1= datos(:,2);%teoricos
E_2= datos(:,3);%enap
E_3= datos(:,4);%fabricada
%

```

```

%GRAFICO
handles.Ex=Ex;

```

```

handles.Ey=Ey;
handles.Ez=Ez;
handles.polar_angulo=datos(:,1);
handles.polar_magnitud=datos(:,2);

```

```

guidata(hObject,handles)

```

```

% --- Executes on selection change in popupmenu1.

```

```

function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns popupmenu1 contents as cell
array

```

```

%     contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu1

```

```

str=get(hObject,'String');

```

```

val=get(hObject,'Value');

```

```

switchstr{val}

```

```

case'Opcion 1'

```

```

surf(handles.Ex,handles.Ey,handles.Ez)

```

```

set(handles.text12, 'String', {'Forma tridimensional del patron de radiacion'});

```

```

case'Opcion 2'

```

```

polar(handles.polar_angulo,handles.polar_magnitud);

```

```

set(handles.text12, 'String', {'Forma polar patrón de radiación'});

```

```

case'Opcion 3'

```

```

plot(handles.polar_angulo,handles.polar_magnitud);

```

```

set(handles.text12, 'String', {'Forma rectangular patrón de radiación'});

```

```

end

```

```

guidata(hObject,handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton1

```

```

% --- Executes on button press in radiobutton2.
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to radiobutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton2

```

```

% --- Executes on button press in radiobutton3.
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to radiobutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton3

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles) %%%%%%%%%Boton de
reset para la aplicación

```

```

% hObject   handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
closeGUI = handles.figure1;

guiPosition = get(handles.figure1,'Position'); %get the position of the GUI
guiName = get(handles.figure1,'Name'); %get the name of the GUI
eval(guiName) %call the GUI again

close(closeGUI); %close the old GUI
set(gcf,'Position',guiPosition); %set the position for the new GUI

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
close(gcf)

```

ANEXO “C”

Programa “*Designe*”, para el cálculo de los parámetros geométricos y físicos de una antena helicoidal, entregando como parámetro inicial la frecuencia y el número de espiras:

```

%PARAMETROS DE ENTRADA

disp('-----PARAMETROS DE ENTRADA-----')

disp(' ')
%Frecuencia de Operación
f = input(' Frecuencia de Operacion [GHz]: ');

f = f*1e9;
%Numero de Vueltas

```

```

N = input(' Numero de Vueltas: ');

%-----
%OBTENCION DE LA VARIABLES

disp('---CALCULO DE VARIABLES---')

disp(' ')

%Lambda

lambda = (3e8)/f;
disp([' Lambda: ', num2str(lambda), ' m ']);

%Distancia entre Espiras
S = 0.231*lambda;

%Circunferencia de una Vuelta

C = lambda;

disp([' Circunferencia de una Vuelta: ', num2str(C), ' m ']);

%Largo de una Vuelta

Lo = (((C^2)+(S^2))^(0.5));

disp([' Tamaño de una Vuelta: ', num2str(Lo), ' m ']);

%Largo total de la antena (

Lt=N*Lo;

disp([' Largo total de la antena: ', num2str(Lt), ' m ']);

%Relacion axial de radio
AR = (2*N + 1)/(2*N);

```

```

disp([' Radio Axial: ', num2str(AR)]);

%Factor de Fase
beta = 2*pi*f/(3*10e8);
disp([' Factor de Fase: ', num2str(beta), '°']);

S=S/lambda;
HPBW=52/sqrt(N*S); % CALCULO ANCHO DE BANDA DE MEDIA POTENCIA
disp([' Ancho de banda de media potencia: ', num2str(HPBW)]);

FNBW=115/sqrt(N*S); % CALCULO PRIMEROS NULOS
disp([' Primeros nulos: ', num2str(FNBW)]);

direct=15*N*S; % CALCULO directividad
disp([' Directividad: ', num2str(direct)]);

```

ANEXO “D”

Datos patrón de radiación teórico

PATRÓN DE RADIACIÓN TEÓRICO							
Angul o	magnitu d	Angul o	magnitu d	Angul o	magnitud	Angul o	magnitu d
-180	0.7694	-90	0.0005	0	0.0148	90	0.0014
-179	0.7692	-89	0.0023	1	0.015004 4	91	0.0033
-178	0.7685	-88	0.0039	2	0.015324	92	0.0052

-177	0.7674	-87	0.0052	3	0.0158	93	0.0068
-176	0.7659	-86	0.0061	4	0.0164	94	0.0082
-175	0.7638	-85	0.0067	5	0.0172	95	0.0091
-174	0.7613	-84	0.0068	6	0.0182	96	0.0096
-173	0.7583	-83	0.0065	7	0.0193	97	0.0095
-172	0.7547	-82	0.0056	8	0.0205	98	0.0088
-171	0.7506	-81	0.0043	9	0.0219	99	0.0074
-170	0.7460	-80	0.0025	10	0.0234	100	0.0053
-169	0.7407	-79	0.0004	11	0.0250	101	0.0024
-168	0.7348	-78	0.0022	12	0.0267	102	0.0011
-167	0.7282	-77	0.0051	13	0.0286	103	0.0053
-166	0.7209	-76	0.0082	14	0.0305	104	0.0102
-165	0.7129	-75	0.0114	15	0.0325	105	0.0157
-164	0.7042	-74	0.0148	16	0.0346	106	0.0217
-163	0.6946	-73	0.0181	17	0.0368	107	0.0280
-162	0.6842	-72	0.0214	18	0.0390	108	0.0346
-161	0.6730	-71	0.0245	19	0.0412	109	0.0414
-160	0.6608	-70	0.0273	20	0.0434	110	0.0481
-159	0.6478	-69	0.0298	21	0.0456	111	0.0546
-158	0.6338	-68	0.0320	22	0.0477	112	0.0609
-157	0.6189	-67	0.0336	23	0.0498	113	0.0666
-156	0.6031	-66	0.0348	24	0.0518	114	0.0716
-155	0.5862	-65	0.0354	25	0.0537	115	0.0759
-154	0.5685	-64	0.0355	26	0.0554	116	0.0791
-153	0.5497	-63	0.0350	27	0.0570	117	0.0812
-152	0.5301	-62	0.0339	28	0.0584	118	0.0821
-151	0.5095	-61	0.0322	29	0.0596	119	0.0816
-150	0.4881	-60	0.0299	30	0.0605	120	0.0796
-149	0.4659	-59	0.0272	31	0.0611	121	0.0760
-148	0.4429	-58	0.0239	32	0.0615	122	0.0708
-147	0.4192	-57	0.0202	33	0.0615	123	0.0640
-146	0.3949	-56	0.0162	34	0.0611	124	0.0554
-145	0.3700	-55	0.0117	35	0.0605	125	0.0451
-144	0.3447	-54	0.0071	36	0.0594	126	0.0331
-143	0.3190	-53	0.0022	37	0.0579	127	0.0195
-142	0.2931	-52	0.0029	38	0.0561	128	0.0042
-141	0.2671	-51	0.0080	39	0.0539	129	0.0126
-140	0.2411	-50	0.0131	40	0.0512	130	0.0309
-139	0.2153	-49	0.0182	41	0.0482	131	0.0505
-138	0.1898	-48	0.0232	42	0.0448	132	0.0713

-137	0.1646	-47	0.0280	43	0.0411	133	0.0933
-136	0.1401	-46	0.0326	44	0.0370	134	0.1163
-135	0.1163	-45	0.0370	45	0.0326	135	0.1401
-134	0.0933	-44	0.0411	46	0.0280	136	0.1646
-133	0.0713	-43	0.0448	47	0.0232	137	0.1898
-132	0.0505	-42	0.0482	48	0.0182	138	0.2153
-131	0.0309	-41	0.0512	49	0.0131	139	0.2411
-130	0.0126	-40	0.0539	50	0.0080	140	0.2671
-129	0.0042	-39	0.0561	51	0.0029	141	0.2931
-128	0.0195	-38	0.0579	52	0.0022	142	0.3190
-127	0.0331	-37	0.0594	53	0.0071	143	0.3447
-126	0.0451	-36	0.0605	54	0.0117	144	0.3700
-125	0.0554	-35	0.0611	55	0.0162	145	0.3949
-124	0.0640	-34	0.0615	56	0.0202	146	0.4192
-123	0.0708	-33	0.0615	57	0.0239	147	0.4429
-122	0.0760	-32	0.0611	58	0.0272	148	0.4659
-121	0.0796	-31	0.0605	59	0.0299	149	0.4881
-120	0.0816	-30	0.0596	60	0.0322	150	0.5095
-119	0.0821	-29	0.0584	61	0.0339	151	0.5301
-118	0.0812	-28	0.0570	62	0.0350	152	0.5497
-117	0.0791	-27	0.0554	63	0.0355	153	0.5685
-116	0.0759	-26	0.0537	64	0.0354	154	0.5862
-115	0.0716	-25	0.0518	65	0.0348	155	0.6031
-114	0.0666	-24	0.0498	66	0.0336	156	0.6189
-113	0.0609	-23	0.0477	67	0.0320	157	0.6338
-112	0.0546	-22	0.0456	68	0.0298	158	0.6478
-111	0.0481	-21	0.0434	69	0.0273	159	0.6608
-110	0.0414	-20	0.0412	70	0.0245	160	0.6730
-109	0.0346	-19	0.0390	71	0.0214	161	0.6842
-108	0.0280	-18	0.0368	72	0.0181	162	0.6946
-107	0.0217	-17	0.0346	73	0.0148	163	0.7042
-106	0.0157	-16	0.0325	74	0.0114	164	0.7129
-105	0.0102	-15	0.0305	75	0.0082	165	0.7209
-104	0.0053	-14	0.0286	76	0.0051	166	0.7282
-103	0.0011	-13	0.0267	77	0.0022	167	0.7348
-102	0.0024	-12	0.0250	78	0.0004	168	0.7407
-101	0.0053	-11	0.0234	79	0.0025	169	0.7460
-100	0.0074	-10	0.0219	80	0.0043	170	0.7506
-99	0.0088	-9	0.0205	81	0.0056	171	0.7547
-98	0.0095	-8	0.0193	82	0.0065	172	0.7583

-97	0.0096	-7	0.0182	83	0.0068	173	0.7613
-96	0.0091	-6	0.0172	84	0.0067	174	0.7638
-95	0.0082	-5	0.0164	85	0.0061	175	0.7659
-94	0.0068	-4	0.0158	86	0.0052	176	0.7674
-93	0.0052	-3	0.0153	87	0.0039	177	0.7685
-92	0.0033	-2	0.0150	88	0.0023	178	0.7692
-91	0.0014	-1	0.0148	89	0.0005	179	0.7694

ANEXO “E”

Datos experimentales patrón de radiación de la antena helicoidal de la ENAP

PATRÓN DE RADIACIÓN EXPERIMENTAL ANTENA HELICOIDAL(ENAP)							
Angulo	magnitud	Angulo	magnitud	Angulo	magnitud	Angulo	magnitud
-180	0.72393	-90	0.01057	0	0.073	90	0.05344
-179	0.72298	-89	0.01125	1	0.07103	91	0.05723
-178	0.71953	-88	0.01448	2	0.0689	92	0.0623
-177	0.71407	-87	0.01844	3	0.06637	93	0.06087
-176	0.70588	-86	0.02005	4	0.06314	94	0.05985
-175	0.69485	-85	0.01823	5	0.05921	95	0.05669
-174	0.68272	-84	0.01712	6	0.05535	96	0.05327
-173	0.66712	-83	0.01527	7	0.05121	97	0.05
-172	0.64925	-82	0.01688	8	0.04737	98	0.04754
-171	0.63121	-81	0.01582	9	0.04305	99	0.0471
-170	0.61023	-80	0.01809	10	0.03883	100	0.04632
-169	0.58784	-79	0.02364	11	0.03534	101	0.04759
-168	0.56352	-78	0.02968	12	0.03141	102	0.04832
-167	0.53677	-77	0.03719	13	0.02806	103	0.04516
-166	0.50987	-76	0.04561	14	0.02622	104	0.0414
-165	0.48646	-75	0.05375	15	0.02267	105	0.03118
-164	0.45674	-74	0.06264	16	0.02153	106	0.01962
-163	0.42728	-73	0.07088	17	0.02	107	0.01244
-162	0.39696	-72	0.07766	18	0.01947	108	0.01976
-161	0.36734	-71	0.08214	19	0.02081	109	0.03471
-160	0.33937	-70	0.08334	20	0.02221	110	0.0533
-159	0.31201	-69	0.08099	21	0.02398	111	0.06815
-158	0.28711	-68	0.07595	22	0.02687	112	0.08116
-157	0.26373	-67	0.06712	23	0.02851	113	0.09171
-156	0.24595	-66	0.05624	24	0.02958	114	0.0981
-155	0.23248	-65	0.04357	25	0.03097	115	0.10266
-154	0.22522	-64	0.03084	26	0.03134	116	0.10296
-153	0.22439	-63	0.02043	27	0.03222	117	0.10327
-152	0.23054	-62	0.01548	28	0.03253	118	0.10452

-151	0.24045	-61	0.01811	29	0.03222	119	0.10393
-150	0.25497	-60	0.02042	30	0.03312	120	0.10268
-149	0.27084	-59	0.02183	31	0.03408	121	0.10072
-148	0.28498	-58	0.02207	32	0.03481	122	0.09682
-147	0.2994	-57	0.01898	33	0.03699	123	0.09135
-146	0.30991	-56	0.01424	34	0.03839	124	0.08236
-145	0.31734	-55	0.00916	35	0.03963	125	0.07171
-144	0.32074	-54	0.00927	36	0.04117	126	0.05934
-143	0.32099	-53	0.01741	37	0.04214	127	0.04421
-142	0.31731	-52	0.02692	38	0.04223	128	0.0312
-141	0.31071	-51	0.03626	39	0.04231	129	0.03234
-140	0.30111	-50	0.04451	40	0.04174	130	0.05322
-139	0.29006	-49	0.05089	41	0.04	131	0.07991
-138	0.27759	-48	0.05518	42	0.03859	132	0.11158
-137	0.26289	-47	0.05896	43	0.03649	133	0.14398
-136	0.2466	-46	0.0613	44	0.03383	134	0.17356
-135	0.22949	-45	0.06191	45	0.03116	135	0.20524
-134	0.21034	-44	0.06167	46	0.02819	136	0.23538
-133	0.18919	-43	0.06028	47	0.02444	137	0.26351
-132	0.16657	-42	0.05743	48	0.02239	138	0.28767
-131	0.14461	-41	0.05391	49	0.01862	139	0.30933
-130	0.12028	-40	0.04912	50	0.01737	140	0.32799
-129	0.09497	-39	0.04329	51	0.0186	141	0.3418
-128	0.06868	-38	0.03749	52	0.02074	142	0.35179
-127	0.04441	-37	0.0297	53	0.02476	143	0.35876
-126	0.02248	-36	0.02277	54	0.0294	144	0.36183
-125	0.01764	-35	0.01539	55	0.03443	145	0.35976
-124	0.03342	-34	0.01024	56	0.04121	146	0.35726
-123	0.0498	-33	0.00881	57	0.04758	147	0.35147
-122	0.06429	-32	0.01152	58	0.05533	148	0.33858
-121	0.07573	-31	0.01722	59	0.06186	149	0.3271
-120	0.08333	-30	0.02145	60	0.06832	150	0.31245
-119	0.08673	-29	0.02644	61	0.07332	151	0.29553
-118	0.08686	-28	0.02989	62	0.07608	152	0.27975
-117	0.08566	-27	0.03344	63	0.07682	153	0.26415
-116	0.08206	-26	0.03661	64	0.07595	154	0.24834
-115	0.07974	-25	0.03897	65	0.07268	155	0.23727
-114	0.07803	-24	0.04109	66	0.06699	156	0.23896
-113	0.07744	-23	0.04303	67	0.06036	157	0.23739

-112	0.07739	-22	0.0437	68	0.05251	158	0.24674
-111	0.0778	-21	0.04515	69	0.0458	159	0.26229
-110	0.0776	-20	0.04581	70	0.03882	160	0.28405
-109	0.07606	-19	0.04541	71	0.03248	161	0.31319
-108	0.07345	-18	0.04593	72	0.02762	162	0.34491
-107	0.06909	-17	0.04665	73	0.02139	163	0.37912
-106	0.06287	-16	0.04689	74	0.02196	164	0.41523
-105	0.05592	-15	0.04838	75	0.01188	165	0.45041
-104	0.04744	-14	0.05001	76	0.01135	166	0.48429
-103	0.03857	-13	0.0518	77	0.01866	167	0.5159
-102	0.02915	-12	0.05396	78	0.02626	168	0.54398
-101	0.02283	-11	0.05613	79	0.03262	169	0.57158
-100	0.02104	-10	0.0587	80	0.0368	170	0.5997
-99	0.02331	-9	0.06157	81	0.03948	171	0.61979
-98	0.02862	-8	0.0642	82	0.04058	172	0.64266
-97	0.03243	-7	0.06747	83	0.04126	173	0.6611
-96	0.0352	-6	0.07019	84	0.03852	174	0.67894
-95	0.03488	-5	0.07201	85	0.03647	175	0.69223
-94	0.03168	-4	0.07395	86	0.03594	176	0.7026
-93	0.02717	-3	0.07481	87	0.03822	177	0.71186
-92	0.0208	-2	0.07451	88	0.04222	178	0.71662
-91	0.01513	-1	0.07434	89	0.04743	179	0.72059

ANEXO "F"

Datos experimentales del patrón de radiación de la antena helicoidal fabricada

PATRÓN DE RADIACIÓN EXPERIMENTAL							
Angulo	magnitud	Angulo	magnitud	Angulo	magnitud	Angulo	magnitud
-180	0.6691	-90	0.0323	0	0.0376	90	0.0377
-179	0.6679	-89	0.0259	1	0.0404	91	0.0426
-178	0.6649	-88	0.0180	2	0.0402	92	0.0446
-177	0.6610	-87	0.0138	3	0.0479	93	0.0451
-176	0.6562	-86	0.0173	4	0.0446	94	0.0463
-175	0.6518	-85	0.0213	5	0.0410	95	0.0439
-174	0.6455	-84	0.0288	6	0.0374	96	0.0417
-173	0.6380	-83	0.0341	7	0.0335	97	0.0395
-172	0.6330	-82	0.0372	8	0.0293	98	0.0370
-171	0.6235	-81	0.0378	9	0.0260	99	0.0350
-170	0.6138	-80	0.0372	10	0.0208	100	0.0301
-169	0.6025	-79	0.0347	11	0.0182	101	0.0243
-168	0.5905	-78	0.0331	12	0.0151	102	0.0179
-167	0.5772	-77	0.0321	13	0.0122	103	0.0096
-166	0.5651	-76	0.0317	14	0.0120	104	0.0140
-165	0.5471	-75	0.0312	15	0.0123	105	0.0270
-164	0.5286	-74	0.0302	16	0.0140	106	0.0415
-163	0.5111	-73	0.0261	17	0.0143	107	0.0552
-162	0.4905	-72	0.0219	18	0.0163	108	0.0672
-161	0.4704	-71	0.0164	19	0.0180	109	0.0769
-160	0.4518	-70	0.0128	20	0.0184	110	0.0843
-159	0.4138	-69	0.0139	21	0.0197	111	0.0874
-158	0.3844	-68	0.0169	22	0.0207	112	0.0889
-157	0.3536	-67	0.0212	23	0.0206	113	0.0899
-156	0.3214	-66	0.0230	24	0.0207	114	0.0880
-155	0.2879	-65	0.0246	25	0.0195	115	0.0859

-154	0.2541	-64	0.0240	26	0.0173	116	0.0831
-153	0.2178	-63	0.0248	27	0.0152	117	0.0790
-152	0.1847	-62	0.0268	28	0.0122	118	0.0741
-151	0.1493	-61	0.0307	29	0.0105	119	0.0679
-150	0.1163	-60	0.0353	30	0.0096	120	0.0601
-149	0.0783	-59	0.0385	31	0.0130	121	0.0499
-148	0.0530	-58	0.0408	32	0.0176	122	0.0378
-147	0.0321	-57	0.0410	33	0.0220	123	0.0243
-146	0.0490	-56	0.0386	34	0.0262	124	0.0137
-145	0.0637	-55	0.0336	35	0.0296	125	0.0200
-144	0.0916	-54	0.0277	36	0.0307	126	0.0372
-143	0.1138	-53	0.0218	37	0.0309	127	0.0560
-142	0.1331	-52	0.0169	38	0.0297	128	0.0773
-141	0.1503	-51	0.0157	39	0.0267	129	0.0967
-140	0.1691	-50	0.0174	40	0.0215	130	0.1163
-139	0.1559	-49	0.0192	41	0.0154	131	0.1348
-138	0.1424	-48	0.0200	42	0.0107	132	0.1501
-137	0.1320	-47	0.0188	43	0.0095	133	0.1616
-136	0.1214	-46	0.0156	44	0.0121	134	0.1703
-135	0.1110	-45	0.0121	45	0.0156	135	0.1754
-134	0.1032	-44	0.0095	46	0.0188	136	0.1779
-133	0.1021	-43	0.0107	47	0.0200	137	0.1753
-132	0.0977	-42	0.0154	48	0.0192	138	0.1681
-131	0.1211	-41	0.0215	49	0.0174	139	0.1581
-130	0.1007	-40	0.0267	50	0.0157	140	0.1503
-129	0.0773	-39	0.0297	51	0.0169	141	0.1331
-128	0.0560	-38	0.0309	52	0.0218	142	0.1138
-127	0.0372	-37	0.0307	53	0.0277	143	0.0916
-126	0.0200	-36	0.0296	54	0.0336	144	0.0637
-125	0.0137	-35	0.0262	55	0.0386	145	0.0490
-124	0.0243	-34	0.0220	56	0.0410	146	0.0321
-123	0.0378	-33	0.0176	57	0.0408	147	0.0530
-122	0.0499	-32	0.0130	58	0.0385	148	0.0783
-121	0.0601	-31	0.0096	59	0.0353	149	0.1163
-120	0.0679	-30	0.0105	60	0.0307	150	0.1493
-119	0.0741	-29	0.0122	61	0.0268	151	0.1847
-118	0.0790	-28	0.0152	62	0.0248	152	0.2178
-117	0.0831	-27	0.0173	63	0.0240	153	0.2541
-116	0.0859	-26	0.0195	64	0.0246	154	0.2879
-115	0.0880	-25	0.0207	65	0.0230	155	0.3214

-114	0.0899	-24	0.0206	66	0.0212	156	0.3536
-113	0.0889	-23	0.0207	67	0.0169	157	0.3844
-112	0.0874	-22	0.0197	68	0.0139	158	0.4138
-111	0.0843	-21	0.0184	69	0.0128	159	0.4415
-110	0.0769	-20	0.0180	70	0.0164	160	0.4677
-109	0.0672	-19	0.0163	71	0.0219	161	0.4924
-108	0.0552	-18	0.0143	72	0.0261	162	0.5143
-107	0.0415	-17	0.0140	73	0.0302	163	0.5311
-106	0.0270	-16	0.0123	74	0.0312	164	0.5362
-105	0.0140	-15	0.0120	75	0.0317	165	0.5538
-104	0.0096	-14	0.0122	76	0.0321	166	0.5656
-103	0.0179	-13	0.0151	77	0.0331	167	0.5787
-102	0.0243	-12	0.0182	78	0.0347	168	0.5905
-101	0.0301	-11	0.0358	79	0.0372	169	0.6016
-100	0.0350	-10	0.0369	80	0.0378	170	0.6110
-99	0.0370	-9	0.0381	81	0.0372	171	0.6204
-98	0.0395	-8	0.0391	82	0.0341	172	0.6252
-97	0.0417	-7	0.0399	83	0.0288	173	0.6326
-96	0.0439	-6	0.0402	84	0.0213	174	0.6388
-95	0.0463	-5	0.0404	85	0.0173	175	0.6431
-94	0.0451	-4	0.0401	86	0.0138	176	0.6477
-93	0.0446	-3	0.0400	87	0.0180	177	0.6516
-92	0.0426	-2	0.0391	88	0.0259	178	0.6676
-91	0.0377	-1	0.0385	89	0.0323	179	0.6691