

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Electrónico*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO

**CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA RECONFIGURABLE TIPO
PLANAR SOBRE UNA ESTRUCTURA DE TORRE
PENTAGONAL BASADA EN TÉCNICAS DE ORIGAMI**

AUTORES:

LUIS ANDRÉS MOROCHO MAITA

LEONIDAS BERNARDO PERALTA PERALTA

TUTOR:

ING. JUAN PABLO BERMEO

CUENCA - ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Luis Andrés Morocho Maita con documento de identificación N° 0105027932 y Leonidas Bernardo Peralta Peralta con documento de identificación N° 0105750442, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA RECONFIGURABLE TIPO PLANAR SOBRE UNA ESTRUCTURA DE TORRE PENTAGONAL BASADA EN TÉCNICAS DE ORIGAMI**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2019

Luis Morocho Maita
CI:0105027932

Leonidas Peralta Peralta
CI:0105750442

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA RECONFIGURABLE TIPO PLANAR SOBRE UNA ESTRUCTURA DE TORRE PENTAGONAL BASADA EN TÉCNICAS DE ORIGAMI**, realizado por Luis Andrés Morocho Maita y Leonidas Bernardo Peralta Peralta, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2019



Ing. Juan Pablo Bermeo Moyano

CI: 0102645884

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Luis Andrés Morocho Maita con número de cédula 0105027932 y Leonidas Bernardo Peralta Peralta con número de cédula 0105750442, autores del trabajo de titulación: **CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA RECONFIGURABLE TIPO PLANAR SOBRE UNA ESTRUCTURA DE TORRE PENTAGONAL BASADA EN TÉCNICAS DE ORIGAMI**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2019



Luis Morocho Maita

CI:0105027932



Leonidas Peralta Peralta

CI:0105750442

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a Dios por darme la capacidad y sabiduría necesaria, para alcanzar con éxito esta importante meta, que permitirá desenvolverme como un verdadero profesional. Agradezco a mi familia, cuyo apoyo ha sido constante e incondicional y ser un pilar importante en alcanzar este objetivo.

En segundo lugar, agradezco a mis formadores, en especial al Ing. Juan Pablo Bermeo, quienes han sabido transmitir sus conocimientos, logrando el cumplimiento de mi tesis con éxito

Luis Andres Morocho Maita

Primeramente, quiero expresar mi agradecimiento, a Dios por ser mi fortaleza en momentos de debilidad, por brindarme la salud, y permitirme haber llegado hasta este momento de mi formación profesional, también hago parte de este reconocimiento a todos los maestros que fueron parte de mi educación superior y a esta noble institución, sobre todo al Ing. Fernando Guerrero.

Finalmente agradezco a mis padres y hermanas, quienes han estado para mí en todo momento, aconsejándome y brindándome su apoyo, para poder seguir adelante.

Leonidas Bernardo Peralta Peralta

DEDICATORIAS

La persona que soy en la actualidad asido gracias a ustedes. Que han forjado mi camino día a día por el sendero correcto. Han trabajado muy duro, y sin importan si llegaban cansados de sus trabajos siempre tenían la mejor actitud para la familia. La ayuda brindada a formado base de gran importancia para conseguir que este sueño se haga realidad.

Muchas gracias este logro es para mis padres Lucia y Luis.

Luis Andres Morocho Maita

Quiero dedicar este trabajo de tesis a mis padres; Leonidas y Martha, quienes han sido pilar fundamental durante todo mi proceso de formación académica y como persona, ellos me han apoyado e inspirado para seguir adelante y me enseñaron que, a pesar de las caídas, lo importante es levantarse.

Leonidas Bernardo Peralta Peralta

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------|
| AGRADECIMIENTOS..... | I |
| DEDICATORIAS..... | II |
| ÍNDICE GENERAL..... | III |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | X |
| RESUMEN..... | II |
| INTRODUCCIÓN..... | XII |
| ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO..... | XIVIV |
| JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)..... | XV |
| OBJETIVOS..... | XVII |
| OBJETIVO GENERAL..... | XVII |
| OBJETIVOS ESPECÍFICO..... | XVII |
| | |
| CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 1 |
| 1.1 Antenas..... | 2 |
| 1.1.1 Definición..... | 2 |
| 1.1.2 Parámetros de las antenas..... | 2 |
| 1.1.2.1 Patrón de radiacion..... | 2 |
| 1.1.2.2 Ancho de banda..... | 3 |
| 1.1.2.3 Intensidad de radiación..... | 4 |
| 1.1.2.4 Directividad..... | 4 |
| 1.1.2.5 Impedancia..... | 5 |
| 1.1.2.6 Ganancia..... | 5 |
| 1.1.2.7 Eficiencia..... | 6 |
| 1.1.2.8 Parámetros de dispersión (S)..... | 6 |
| 1.1.3 Tipos de antenas..... | 8 |
| 1.1.4 Antenas planares tipo parche (patch) o microstrip..... | 10 |
| 1.1.5 Antenas fractales..... | 11 |
| 1.2 Origami aplicado a la ingeniería..... | 13 |
| 1.2.1 La técnica del origami..... | 13 |
| 1.2.2 Origami en la ingeniería..... | 14 |
| 1.2.3 Origami aplicado en el diseño de antenas..... | 16 |
| 1.3 Anillo resonante..... | 20 |
| 1.3.1 Constante dieléctrica efectiva por anillo resonante..... | 20 |
| 1.4 Línea de alimentación..... | 22 |

| | |
|--|---------|
| CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO | 25 |
| 2.1 Constitución de la antena | 25 |
| 2.1.1 Sustrato (papel kraft) | 25 |
| 2.1.2 Conductor (cinta de cobre) | 26 |
| 2.2 Análisis del sustrato | 27 |
| 2.2.1 Cálculos del Anillo resonador y Líneas de alimentación | 27 |
| 2.2.2 Simulación del anillo resonante en software HFSS | 28 |
| 2.3 Diseño de la antena | 30 |
| 2.3.1 Selección del diseño de la antena | 30 |
| 2.3.2 Boceto estructura de papel | 31 |
| 2.3.3 Configuración de la línea de cobre | 32 |
| 2.3.4 Dibujo de la antena | 33 |
| 2.3.5 Dibujo 3D de la antena automatizado mediante software | 36 |
| 2.4 Simulación de la antena | 50 |
| 2.4.1 Simulación de la antena dibujada empíricamente | 51 |
| 2.4.2 Simulación automatizada de la antena por Script de Microsoft Visual Basic (VBS) | 61 |
| CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 71 |
| 3.1 Construcción | 71 |
| 3.1.1 Anillo resonante | 71 |
| 3.1.2 Diseño del mecanismo de la antena | 74 |
| 3.2 Aproximación del patrón de radiación por teoría de arreglo de antenas .. | 80 |
| 3.2.1 Factor de arreglo | 80 |
| 3.2.2 Patrón de radiación en 3D | 86 |
| 3.3 Mediciones | 96 |
| 3.3.1 Constante dieléctrica efectiva ϵ_{eff} y constante dieléctrica relativa ϵ_r | 96 |
| 3.3.2 frecuencia de resonancia de la antena | 98 |
| 3.3.3 Ancho de banda de la antena | 102 |
| 3.3.4 Patrón de radiación de la antena | 104 |
| 3.4 Comparación con antenas del mercado | 109 |
| CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 111 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 114 |
| APÉNDICES | 117 |

| | |
|---|-----|
| APÉNDICE A: DIMENSIONES DE LA CAJA DEL MECANISMO | 117 |
| APÉNDICE B: REFERENCIAS DE CÓDIGO DE LA SECCIÓN 2.4.2 SIMULACIÓN AUTOMATIZADA DE LA ANTENA POR SCRIPT DE MICROSOFT VISUAL BASIC (VBS) | 119 |
| APÉNDICE C: TABLA DE BESSEL..... | 121 |
| APÉNDICE D: ALGORITMO IMPLEMENTADO | 121 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Patron de Radiación en tres dimensiones | 3 |
| Figura 2. Ancho de banda de una antena | 4 |
| Figura 3. Modelo para impedancia de una Antena. | 5 |
| Figura 4. Onda Incidente y Reflejada con dispositivo de dos Puertos..... | 7 |
| Figura 5. Configuraciones de Antenas de Cable..... | 9 |
| Figura 6. Configuraciones de Antenas de Apertura. | 9 |
| Figura 7. Configuración de Antenas de Reflexión..... | 10 |
| Figura 8. Antena Parche (Patch) o de Microstrip..... | 11 |
| Figura 9. Formas utilizadas de elementos patch. | 11 |
| Figura 10. Diferentes Iteraciones (k) del triángulo de Koch..... | 12 |
| Figura 11. Triángulo de Sierpinski con cinco iteraciones..... | 12 |
| Figura 12. Cisne Utilizando Técnica de origami. | 13 |
| Figura 13. Panel solar con método "Miura-ori". | 14 |
| Figura 14. Estructuras en Polímero | 15 |
| Figura 15. Telescopio de anteojos en estructura de origami..... | 15 |
| Figura 16. Origami ADN Nanorobot | 16 |
| Figura 17. Diseño de Antena Yagi Loop Desplegable. (a) Estado Retraído. (b) Estado Estendido..... | 17 |
| Figura 18. Grafica de Perdidas de Retorno correspondientes a la Simulación de la Antena. | 18 |
| Figura 19. Antena de Acordeón. | 18 |
| Figura 20. Grafica de Perdidas de Retorno correspondientes a la Simulación de la Antena en diferentes estados de la misma..... | 19 |
| Figura 21. Grafica de Perdidas de Retorno correspondientes a la Simulación de la Antena, en sus 2 estados..... | 19 |
| Figura 22. Antena Nojima..... | 20 |
| Figura 23. Anillo resonador planar vista a) superior b) de lado..... | 20 |
| Figura 24. Línea microstrip..... | 22 |
| Figura 25. Papel Kraft..... | 26 |
| Figura 26. Cinta de cobre..... | 26 |
| Figura 27. Parámetros del anillo resonante..... | 27 |
| Figura 28. Anillo resonador en software HFSS..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 29. Lumped Port 1. | 29 |
| Figura 30. Lumped Port 2. | 29 |
| Figura 31. Parámetro S21 obtenido por simulación del resonador. | 30 |
| Figura 32. Prototipo de la Torre Pentagonal hecha en papel kraft. | 31 |
| Figura 33. Boceto de origami correspondiente al diseño de Antena planteado. | 32 |
| Figura 34. Geometría de la cinta de cobre sobre la estructura origami. | 33 |
| Figura 35. Dibujo de un piso de la estructura de la antena planteada. | 34 |
| Figura 36. Dibujo de 3D de la estructura de la antena. | 35 |
| Figura 37. Renderizado del dibujo de la estructura de la antena en 3D y de la cinta de cobre que la envuelve. | 35 |
| Figura 38. Cinta de opciones de exportación del dibujo, desde AutoCAD | 36 |
| Figura 39. Diagrama de flujo del dibujo 3D de la antena. | 37 |
| Figura 40. Un piso de la torre pentagonal formada a partir de triángulos. | 37 |
| Figura 41. Interfaz gráfica en VBA, para asignar variables al dibujo de la antena. . | 38 |
| Figura 42. Experimentación de la medición del ángulo de desfase en función de la altura, de un piso de la antena | 39 |
| Figura 43. Grafica que representa la ecuación obtenida, de la relación entre altura y ángulo de desfase. | 40 |
| Figura 44. Planteamiento grafico del diseño de la estructura de la antena, desde el punto de vista geométrico | 40 |
| Figura 45. Grafica correspondiente a la ecuación de que relaciona altura y desfase, basado en análisis matemático | 43 |
| Figura 46. Programa encargado del proceso de Solevado en Visual Lisp | 45 |
| Figura 47. Acciones que representan el proceso que sigue el macro de “UnionEstructura” | 45 |
| Figura 48. Diferentes capas creadas durante la ejecución del programa | 46 |
| Figura 49. Representación gráfica de la cinta cobre sobre la estructura, considerando el lado del pentágono como L, y el ancho de la cinta de cobre como L1. | 47 |
| Figura 50. Un piso de la estructura con la cinta de cobre, en donde se diferencian los tipos de “líneas” que posee | 49 |
| Figura 51. Pasos para la exportación de archivos .SAT. | 50 |
| Figura 52. Importación del archivo .SAT en HFSS. | 52 |
| Figura 53. Comprobación de medidas del objeto. | 52 |
| Figura 54. Crear nuevo material. | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 55. Asignar propiedades y nombre del material. | 54 |
| Figura 56. Papel kraft dentro de la librería de materiales de HFSS..... | 54 |
| Figura 57. Asignar material a la línea de cobre. | 55 |
| Figura 58. Dirección de Lumped Port..... | 55 |
| Figura 59. Excitación por Lumped Port..... | 56 |
| Figura 60. Creación de Región para límites de radiación. | 56 |
| Figura 61. Dirección para establecer condiciones de contorno..... | 57 |
| Figura 62. Representa un límite abierto mediante condición de contorno..... | 57 |
| Figura 63. Asignación de una solución. | 58 |
| Figura 64. Asignación de barrido de frecuencia al setup de soluciones. | 58 |
| Figura 65. Análisis de la antena. | 59 |
| Figura 66. Generar Reporte del Parámetro S_{11} | 60 |
| Figura 67. Generar Reporte del Parámetro S_{11} | 60 |
| Figura 68. Insertar Esfera Infinita. | 61 |
| Figura 69. Generar Patrón de Radiación 3D. | 61 |
| Figura 70. Algoritmo para automatizar la simulación. | 62 |
| Figura 71. Variables de Comunicación..... | 63 |
| Figura 72. Creación de carpeta en la ruta específica dada por var4..... | 63 |
| Figura 73. Inicialización de HFSS y creación de un nuevo proyecto. | 63 |
| Figura 74. Importación de librería personal de materiales..... | 64 |
| Figura 75. Importación de archivos .SAT desde una dirección específica. | 64 |
| Figura 76. Resultado de asignar materiales y el cambio en las propiedades de la antena. | 66 |
| Figura 77. Reporte para el parámetro S_{11} por Script..... | 68 |
| Figura 78. Creación de esfera infinita por Script. | 68 |
| Figura 79. Reporte del patrón de radiación por Script. | 69 |
| Figura 80. Guardar el Proyecto desde Script. | 69 |
| Figura 81. Variables de rutas y Cambio de Nombres. | 70 |
| Figura 82. Anillo resonador dibujado en AutoCAD. | 72 |
| Figura 83. Corte con plotter de los elementos del anillo resonador..... | 73 |
| Figura 84. Anillo resonador en papel Kraft. | 73 |
| Figura 85. Diagrama de bloques del mecanismo de la antena. | 74 |
| Figura 86. Conexión entre la etapa de control y el motor..... | 74 |
| Figura 87. Diseño de los engranajes realizados en CAD. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 88. Modelo 3D del mecanismo..... | 77 |
| Figura 89. Diseño del sistema Husillo-Tuerca..... | 77 |
| Figura 90. Disposición de los componentes del mecanismo de la antena, en la caja de MDF..... | 79 |
| Figura 91. Antena origami acoplada al mecanismo..... | 79 |
| Figura 92. Patrón de la línea de cobre para cada piso de la antena..... | 80 |
| Figura 93. Tiempo de retraso entre elementos de la antena..... | 83 |
| Figura 94. Patrón de radiación de un solo elemento de la antena origami..... | 84 |
| Figura 95. Patrón del Factor de Arreglo..... | 85 |
| Figura 96. Patrón de radiación aproximado de la antena origami con siete elementos..... | 85 |
| Figura 97. Patrón de radiación de un solo nivel de la antena..... | 87 |
| Figura 98. Exportación de datos en hoja de cálculo de Excel..... | 87 |
| Figura 99. Elementos Correspondientes a los dos primeros niveles de la antena..... | 88 |
| Figura 100. Representación del campo radiado por dos elementos en sus coordenada esféricas y el ET | 89 |
| Figura 101. Triangulo base para encontrar R2 | 90 |
| Figura 102. Patrón de radiación de un elemento en Matlab..... | 92 |
| Figura 103. Patrón de radiación desplazado y rotado..... | 92 |
| Figura 104. Vista Isométrica del patrón de radiación aproximado..... | 93 |
| Figura 105. Vista frontal en el plano elevación del patrón de radiación aproximado..... | 93 |
| Figura 106. Vista posterior en el plano elevación del patrón de radiación aproximado..... | 94 |
| Figura 107. Vista frontal en el plano azimut del patrón de radiación aproximado..... | 94 |
| Figura 108. Vista posterior en el plano azimut del patrón de radiación aproximado..... | 95 |
| Figura 109. Viste inferior del Patrón de radiación aproximado..... | 95 |
| Figura 110. Parámetro S21 medido del resonador..... | 96 |
| Figura 111. Simulación del factor S11 de la antena origami..... | 98 |
| Figura 112. Resultados de la medición del parámetro S11 de la antena desde una altura de 131.6 mm hasta 154 mm..... | 99 |
| Figura 113. Resultados de la medición del parámetro S11 de la antena desde una altura de 159.6 mm hasta 187.2 mm..... | 99 |
| Figura 114. Comparación del S11 simulado y medido para alturas de 131,6 mm y 142,8 mm..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 115. Comparación del S11 simulado y medido para alturas de 176,4 mm y 187,2 mm. | 101 |
| Figura 116. Representación del Ancho de banda..... | 103 |
| Figura 117. Ancho de banda de la frecuencia 6.13 GHz con altura 131.6 mm | 103 |
| Figura 118. Ancho de banda de la frecuencia 4.7 GHz con altura 142.8 mm | 103 |
| Figura 119. Ancho de banda de la frecuencia 7.3 GHz con altura 176.4 mm | 104 |
| Figura 120. Patrón de Radiación para una altura de 131,6 mm. | 106 |
| Figura 121. Patrón de Radiación para una altura de 141,8 mm. | 106 |
| Figura 122. Patrón de Radiación para una altura de 176,4 mm. | 107 |
| Figura 123. Patrón de Radiación para una altura de 187,2 mm. | 108 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Medidas de Construcción del anillo resonador. | 28 |
| Tabla 2. Tabla correspondiente a las medidas tomadas del experimento | 39 |
| Tabla 3. Parámetros de Diseño de los Engranés. | 75 |
| Tabla 4. Características del motor a pasos. | 76 |
| Tabla 5. Parámetros necesarios para la medición y caculo de ϵ_{eff} y ϵ_r | 97 |
| Tabla 6. Resultado de medición y caculo para ϵ_{eff} y ϵ_r | 98 |
| Tabla 7. Valores de Bessel según el índice de modulación. | 102 |
| Tabla 8. Resultados de Ancho de Banda..... | 104 |
| Tabla 9. Resultados de Pruebas con altura=131,6 mm. | 106 |
| Tabla 10. Resultados de Pruebas con altura=141,8 mm. | 107 |
| Tabla 11. Resultado de Pruebas con altura=176,4 mm. | 107 |
| Tabla 12. Resultado de Pruebas con altura=187,2 mm. | 108 |

RESUMEN

A través de los años, la tecnología evoluciona y las múltiples necesidades demandan la construcción de dispositivos innovadores cuya fabricación puede requerir costos elevados y el uso de recursos complejos. En el ámbito de las comunicaciones inalámbricas se requiere la implementación de nuevos tipos de antenas que puedan adaptarse a diversas necesidades específicas, y como respuesta a este particular problema se crean las antenas reconfigurables. En este contexto, se plantea un nuevo tipo de antena de fácil construcción y bajo costo, que está basado en técnicas de origami y fue desarrollado inicialmente por el Ph.D Stavros Georgakopoulos [1].

El presente trabajo inicia con la revisión bibliográfica de antenas origami, necesario para plantear una antena que cumpla con las condiciones de reconfiguración. Se propone un diseño de antena planar sobre una estructura de torre pentagonal basado en la técnica del origami. Esta antena es capaz de moverse linealmente, plegándose y desplegándose para cambiar sus parámetros de radiación que la caracterizan como son: frecuencia de resonancia, ancho de banda y patrón de radiación. Posterior a la propuesta, se determina los materiales a ocupar en la elaboración de la antena, que son: papel Kraft para la estructura y cinta de cobre para el conductor. Para obtener resultados aproximados y contar con datos de referencia que permita comparar los resultados prácticos, se realizan simulaciones de la antena en las diferentes alturas utilizando el software HFSS. El simulador trabaja con análisis de elementos finitos y con características de los materiales utilizados, por lo tanto, al ser el papel Kraft un material nuevo en el software, previamente se empleó el método de anillo resonante obteniendo la constante dieléctrica efectiva requerida por el simulador para caracterizar el material. Las múltiples alturas que posee la antena son creadas a partir de un algoritmo en el software AutoCAD, automatizando el proceso de elaboración del modelo en 3D de la antena y exportando las características constructivas al simulador. La antena es construida y caracterizada mediante la medición de los principales parámetros que la definen. Finalmente, se comparan los resultados prácticos con los obtenidos en el simulador, confirmando la validez de los datos; asimismo, se puede determinar que la antena planar basada en técnicas de origami cambia sus características constitutivas en función de la altura en la que se encuentre, adquiriendo la propiedad de reconfigurabilidad.

INTRODUCCIÓN

El trabajo presenta la redacción del diseño y construcción de una antena reconfigurable, basada en técnicas de origami, la antena como tal, es una cinta de cobre adhesivo que envuelve una estructura de torre pentagonal hecha en papel Kraft, este diseño fue posible construirlo utilizando técnicas de doblado de papel.

Este tipo de antenas reconfigurables permiten adaptar sus parámetros de radiación al modificar su forma física, permitiendo así trabajar bajo diferentes condiciones de transmisión, sin necesidad de realizar algún ajuste complejo o cambio de equipos. En este diseño planteado, la estructura de torre, es capaz de plegarse o retraerse junto con la cinta de cobre, permitiendo así, cambiar sus parámetros. Otra ventaja que presenta, es su facilidad de construcción y bajo coste, al estar únicamente conformado por una cinta de cobre y una estructura de papel Kraft, sin embargo, el mecanismo planteado que permite la modificación física de la antena, es relativamente complejo y caro, debido a que no formo parte del enfoque de esta tesis.

El tema de las antenas origami es relativamente nuevo, en donde la mayoría de aportes han sido generados a cargo del Ph.D Stavros Georgakopoulos, que es investigador en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática en la Universidad Internacional de Florida. La finalidad de esta tesis con enfoque investigativo, es aportar más conocimiento a esta línea de investigación, que tiene como objetivo desarrollar antenas, simples, de bajo presupuesto y con capacidades únicas, como la reconfigurabilidad, y la portabilidad.

Para poder comprobar la eficacia de esta antena en función de nuestros objetivos, se consideraron varios parámetros como indicadores, los cuales fueron; ganancia, patrón de radiación, y ancho de banda, todos estos parámetros fueron previamente simulados en el software ANSYS HFSS, para posteriormente comprobarlos con mediciones reales, que se llevaron a cabo en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana. Cabe destacar que dichas mediciones estaban limitadas en cuanto a precisión o rango de operación, por los equipos que disponemos en la institución.

Este documento está dividido en 4 capítulos, en donde cada uno de estos se enfoca en una parte específica del desarrollo del proyecto.

Capítulo 1: Este capítulo corresponde a la Fundamentación Teórica, en donde se revisan varios conceptos como las antenas y su clasificación, el arte del origami, aplicaciones del origami dentro de la ingeniería, todo ello con la finalidad de sentar las bases sobre las antenas reconfigurables mediante el origami.

Capítulo 2: En el Marco Metodológico, se establece los materiales de construcción para la antena, y se describe el diseño y construcción de un anillo resonante usado para medir las propiedades dieléctricas del papel Kraft. También se explica todo el proceso de diseño y dibujo de la antena en 3D, así como el proceso que se llevó a cabo para poder simular la antena y obtener sus parámetros.

Capítulo 3: La Implementación y Análisis de Resultados, consiste en el desarrollo de toda la parte práctica, que explica desde la construcción del anillo resonante y construcción de la antena, junto con su mecanismo. Finalmente se muestran todos los resultados obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio realizadas.

Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones, en este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir del desarrollo del trabajo de titulación, en donde se demuestra que se cumplen los objetivos planteados. Por otra parte, se dan unas cuantas recomendaciones que pueden ser usadas en el caso de replicar este proyecto, o uno similar.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

En el mundo de las telecomunicaciones, constantemente se desarrollan innovaciones tecnológicas, siendo las más llamativas, aquellas que permiten un uso práctico o multifuncional de algún dispositivo o elemento, conservando e incluso mejorando sus características técnicas. Por tal motivo, el concepto de “Antena Reconfigurable” es atractivo en la actualidad, pues este dispositivo posee la capacidad de modificar sus parámetros según requiera la transmisión. La reconfiguración como característica propia de este tipo de artefactos, les otorga una ventaja sobre el resto de diseños. En función de las modificaciones en los requerimientos de los sistemas de telecomunicaciones, es preciso cambiar los elementos utilizados; sin embargo, al usar elementos reconfigurables no hace falta sustituirlos, sino que basta con adaptar sus características.

Las antenas reconfigurables han sido objeto de estudio durante varios años, gracias a ello, se han desarrollado algunas tecnologías que ofrecen una antena dinámica, que adapta sus parámetros según requiera la transmisión. Entre las más populares se tiene: antenas tipo array, antenas inteligentes, y antenas basadas en origami.

Para conseguir una antena origami, se integra la tecnología del diseño de antenas, con la técnica del doblado de papel conocida como origami, con lo cual se consigue una antena con capacidades únicas, capaz de cambiar la forma de su estructura física y junto a ello sus propiedades. Las capacidades que presenta una antena reconfigurable basada en origami, es la variación de parámetros como; directividad, ganancia y patrón de radiación, además de un funcionamiento multibanda [1], que le permite adaptarse a una frecuencia diferente cuando lo requiera.

Una antena basada en origami tiene algunas ventajas frente a otros tipos de antenas reconfigurables, como, por ejemplo, su bajo costo y su fácil construcción. Este tipo de antenas están conformadas únicamente por una delgada cinta de cobre, predispuesta sobre una figura origami hecha de papel, por lo tanto, el costo de fabricación disminuye en comparación con otros tipos de antenas, sin embargo, el desconocimiento de este tipo de antenas en el campo de las telecomunicaciones, hacen que sean muy poco estudiadas, a pesar que tiene un alto potencial para aplicaciones simples y de bajo presupuesto.

JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

Las telecomunicaciones han venido gradualmente destacando en la vida en diferentes campos como comunicaciones celulares, redes de sensores, comunicaciones de emergencia, aplicaciones de defensa, comunicaciones en regiones remotas y proyectos humanitarios en países en desarrollo en donde la comunicación inalámbrica es vital. Pero estos sistemas a menudo requieren reconfigurabilidad en sus parámetros de funcionamiento, con referencia en las antenas de transmisión y recepción para cada una de las diferentes necesidades que presente el sistema de comunicación.

Los conceptos y técnicas de origami en la actualidad han sido utilizadas en varias aplicaciones industriales además del enfoque matemático para el diseño de nuevas estructuras o figuras. Dichas figuras presentan patrones rígidos y de corrugación que las hacen potencialmente aplicables para espacios temporales o transformables. También encontramos su aplicación en la industria espacial donde los métodos para el empaque y despliegue de los diferentes sistemas utilizados por los centros de investigación y observación basan sus diseños en técnicas de origami. Otra de las ciencias beneficiada por el arte del origami es la medicina. Ante el desarrollo de una forma para agrandar arterias y venas obstruidas. Además, las estructuras basadas en origami han sido utilizadas para el diseño de antenas, las mismas poseen el atributo de ser reconfigurables como principal característica. Estas antenas cambian su estructura física como altura y diámetro al ejercer presión o fuerza sobre su cuerpo. El efecto de esta acción es la variación de los parámetros de radiación de la antena.

El desarrollo de este proyecto es de gran relevancia permitiendo la investigación del uso de técnicas de origami combinado con la teoría de antenas, que desembocara en el diseño y elaboración de una antena reconfigurable. Se propone un modelo innovador de una antena basada en la teoría del origami o “plegado de papel”, con el fin de aprovechar las ventajas que el viejo arte de origami brinda como es la facilidad de transporte, plegabilidad y bajo costo. La reconfiguración de la antena dará cambios a sus parámetros como son directividad, ganancia y patrón de radiación, además de un funcionamiento multibanda que le permite adaptarse a una frecuencia diferente cuando lo requiera. El desarrollo de este trabajo podría abrir una nueva línea de investigación dentro de la teoría de antenas y en muchos aspectos de la propia ingeniería.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Construir una antena reconfigurable tipo planar sobre una estructura de torre pentagonal basada en técnicas de origami.

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Realizar un estudio del arte sobre las antenas basadas en origami.
- Diseñar una estructura de torre pentagonal basada en técnicas de origami que permita la reconfiguración de la antena.
- Simular las distintas configuraciones de la antena para obtener valores de los parámetros (frecuencia de resonancia, ancho de banda, pérdidas de retorno (S11), patrón de radiación y ganancia) que caracterizan su comportamiento.
- Construir la antena diseñada según las especificaciones de reconfiguración.
- Comparar los parámetros medidos y simulados que definen el comportamiento de la antena diseñada.
- Validar el diseño de la antena propuesta, comparando sus valores de; ganancia, ancho de banda, y patrón de radiación, con valores de antenas comerciales.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta sección se revisa un elemento imprescindible dentro de la comunicación inalámbrica llamado antena. Las antenas son importantes en el constante desarrollo y evolución de las telecomunicaciones. Se inicia con la definición de antena y de las principales características que describen su comportamiento. La necesidad de difundir información a largas distancias es imprescindible el uso de antenas, lo que ha llevado al amplio desarrollo de diferentes tipos de antenas que permitan una comunicación inalámbrica de manera eficiente. Por consiguiente, en el presente capítulo, se repasa una clasificación de los tipos de antenas partiendo desde un simple cable, hasta las propuestas más revolucionarias, como lo son las antenas origami. Dentro del estudio de las antenas, se realiza una introducción sobre el origami aplicado a la ingeniería, con el fin de sentar las bases sobre las antenas reconfigurables mediante el origami, lo que nos permitirá alcanzar uno de los objetivos planteados en este proyecto.

1.1 ANTENAS

1.1.1 DEFINICIÓN

Diccionario de Webster define una antena como “un dispositivo generalmente metálico para radiar o recibir ondas de radio”. [2]

El IEEE establece una antena como "es pieza fundamental de un transmisor o un sistema de comunicación que está creado con el fin de enviar o receptor ondas electromagnéticas.[3]

Las antenas son usadas en varias aplicaciones. Por ejemplo, las comunicaciones de aeronaves, vehículos espaciales, barcos, vehículos terrestres, celulares inteligentes. En general en todo dispositivo que requiera comunicación inalámbrica.

En otros términos, la antena es un componente de paso entre el espacio libre y un dispositivo de que convierte una señal eléctrica en una onda electromagnética que puede desplazarse por el aire [2].

1.1.2 PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

1.1.2.1 PATRÓN DE RADIACIÓN

Una antena al irradiar campo magnético y eléctrico genera un lóbulo de radiación de radiación que se establece como "una expresión matemática o una representación de los niveles de radiación dentro de un límite para la antena en coordenadas espaciales.

En la mayor parte del tiempo, la radiación se determina en el campo lejano y se representa en función de las coordenadas direccionales. Además, en sus propiedades de radiación incluye intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización. El patrón de radiación se establece en dos o tres dimensiones de energía radiada en función de observación a lo largo de una superficie de radio constante. A menudo el patrón es graficado en una escala logarítmica es decir en decibeles (dB) esta puede detallar más la gráfica. Cuando el patrón se encuentra en tres dimensiones existe dos planos sobre los cuales se grafican

los puntos de radiación de energía de la antena: el plano azimut y el plano elevación. El plano azimut está en función del ángulo (φ), por otro lado el plano de elevación está en función de ángulo (θ) como se muestra en la Figura 1. En la figura considera el patrón de radiación en coordenadas esféricas donde: el radio de radiación se mide en (r), el diferencial del plano azimut ($d\varphi$), el diferencial del plano de elevación ($d\theta$), el diferencial de área esférica (dA) así como los vectores unitarios de la coordenadas esféricas ($\hat{a}_r, \hat{a}_\varphi, \hat{a}_\theta$). [2]

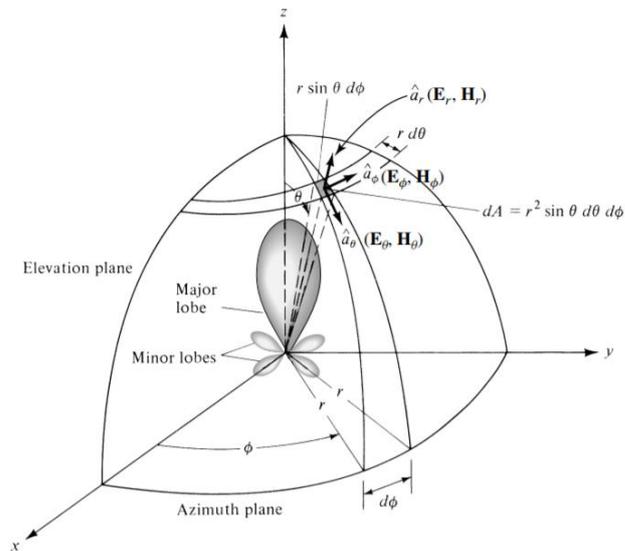


Figura 1. Patrón de Radiación en tres dimensiones

Fuente:[2]

1.1.2.2 ANCHO DE BANDA

El ancho de banda se describe como “el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena con respecto a sus características es satisfactorio”. Usualmente se define como la gama de frecuencias dentro de las cuales la ROE (Relación de Onda Estacionaria) no excede de un determinado valor comúnmente 1.5. Establecido como la separación entre dos idénticos puntos en el lado apuesto del pico máximo en la frecuencia de trabajo. [2]

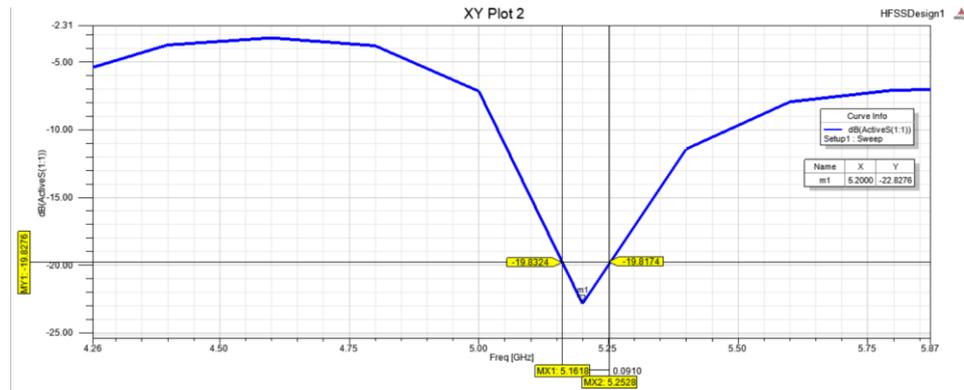


Figura 2. Ancho de banda de una antena

Fuente:Autor

1.1.2.3 INTENSIDAD DE RADIACIÓN

La intensidad de radiación es el vector de Pointing por la distancia al cuadrado, es decir que representa la densidad de la potencia radiada por ángulo sólido, tal que, si se integra en el ángulo que cubre la superficie de análisis, da como resultado la potencia que atraviesa dicha superficie. Su unidad es watio por esterrradián.

$$\vec{U} = R^2 \cdot \vec{\rho} [Wt \cdot Str] \quad (1)$$

1.1.2.4 DIRECTIVIDAD

La Directividad establece la relación de la intensidad de radiación promedio de la antena en todas las direcciones, con la intensidad de radiación en una dirección especifica. Por lo tanto, la directividad de una fuente isotrópica es igual a la relación de su intensidad de radiación en una dirección dada sobre la fuente isotrópico. La intensidad de radiación promedio es equivalente a la potencia total irradiada por la antena dividida por 4π [2], de tal forma que la directividad se puede expresar como:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2)$$

1.1.2.5 IMPEDANCIA

La impedancia de una antena se presenta en sus terminales o la relación de voltaje y corriente en los mismos sin carga. Los terminales de la antena forman un punto de interfaz entre los fenómenos de onda y el hardware del circuito de conexión, permitiendo la caracterización de la antena [2][3]. La impedancia para una antena al igual que otros circuitos convencionales se compone de una parte real e imaginaria y se defina como:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3)$$

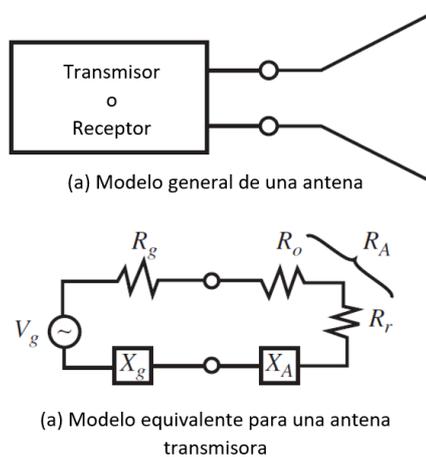


Figura 3. Modelo para impedancia de una Antena.

Fuente:[3]

1.1.2.6 GANANCIA

La ganancia describe el rendimiento de la antena tomando en cuenta la eficiencia de la misma y de sus capacidades direccionales, es una medida adimensional. Por lo tanto, la directividad y la ganancia se encuentran estrechamente relacionadas. Por otra parte, la directividad solo describe las propiedades direccionales de la antena es decir controla solo el patrón. La ganancia de una antena se define como "la relación de la intensidad de radiación, en una dirección específica, sobre la intensidad de radiación que se alcanzaría, si el nivel de potencia

aceptado por la antena es irradiado isotrópicamente”. El valor de la intensidad de radiación pertenece a la potencia isotrópica radiada es equivalente a la potencia de entrada a la antena dividida por 4π . Entonces la ganancia se puede expresar como:

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiacion}}{\text{total de potencia de entrada}} = 4\pi \frac{U}{P_{in}} \quad (4)$$

1.1.2.7 EFICIENCIA

La eficiencia de la antena determina las pérdidas en un circuito cuando la antena actual como transmisora o receptora, la eficiencia total de la antena se expresa como [3]:

$$e_o = e_r e_c e_d \quad (5)$$

Donde e_r es la eficiencia por reflexión debido a un mal acoplamiento entre la impedancia de la antena e impedancia de la guía de transmisión. La eficiencia e_c está relacionada con las pérdidas causadas por el efecto Joule. Por último esta e_d asociada por las pérdidas del dieléctrico siendo la eficiencia del dieléctrico [2].

1.1.2.8 PARÁMETROS DE DISPERSIÓN (S)

Los parámetros de dispersión o parámetros S son fáciles de medir y trabajar. Por consiguiente, su comprensión es sencilla y proporcionan gran información de una red. El parámetro S utiliza ondas normalizadas incidentes y ondas normalizadas viajeras reflejadas en cada puerto de la red. [4]

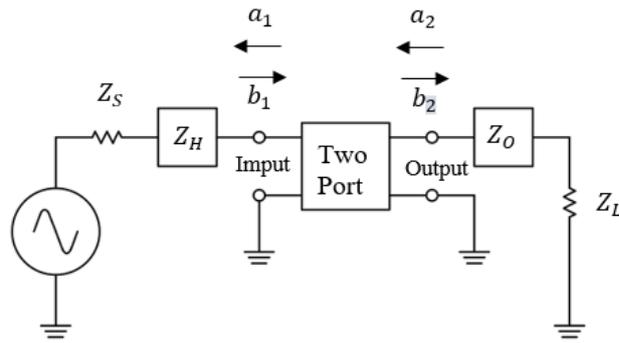


Figura 4. Onda Incidente y Reflejada con dispositivo de dos Puertos.

Fuente: Autor

La Figura 4 muestra un circuito compuesto de una fuente y una carga. Entre la fuente y la carga se inserta una red de dos puertos. Se dice tres aspectos para una onda viajera que se origina en la fuente. El primero ocurre cuando una parte de la onda de la fuente incide en el dispositivo de dos puertos (a_1), se refleja en (b_1) y otra parte se transmite a través del dispositivo de dos puertos. En el segundo una fracción de la señal se refleja luego de la carga y se convierte en incidente en la salida del dispositivo de dos puertos (a_2). Por último, una parte de la señal (a_2) se refleja desde el puerto de salida hacia la carga (b_2), mientras que una fracción se transmite a través del dispositivo de dos puertos. [4]

Los parámetros S se aplican para cualquier frecuencia. Estos se basan en diferentes grados de potencia medidos en los terminales del dispositivo de dos puertos[4]. Los parámetros S o de dispersión son cuatro S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} . A continuación se refiere a los parámetros S_{11} , S_{21} como:

S_{11} Este parámetro compara la cantidad de potencia reflejada con el nivel de potencia que se encuentra aplicada en el puerto de entrada del dispositivo. El S_{11} es conocido como "el coeficiente de reflexión de puerto de entrada" (Γ) y se define como: [4]

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (6)$$

S_{12} Este parámetro compara los niveles de potencia recibida en el puerto 1, con la enviada por el puerto 2. El S_{12} también es llamado “coeficiente de transmisión inversa” y se define como:[4]

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (7)$$

S_{21} Este parámetro compara la potencia recibida en el puerto de salida del dispositivo en comparación con la enviada por el puerto de entrada del dispositivo. El S_{21} también es llamado “coeficiente de transmisión directa” y se define como:[4]

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (8)$$

S_{22} Este parámetro compara los grados de potencia reflejada en el puerto 2, con la potencia que se envía del puerto 2. El S_{22} también es llamado “Coeficiente de reflexión de puerto de salida” y se define como:[4]

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (9)$$

1.1.3 TIPOS DE ANTENAS

- Antenas de Cable

Las antenas de cable son las más antiguas y siguen siendo utilizadas. Estas antenas pueden estar hechas de alambre sólido o conductores tubulares. Son relativamente simples de concepto, fáciles de construir y muy económicas. Existen muchas formas de antenas de cable como son: monopolo, dipolo, lazo cerrado y hélice, estas pueden ser utilizadas en automóviles, edificios, barcos, etc.[3] [2]

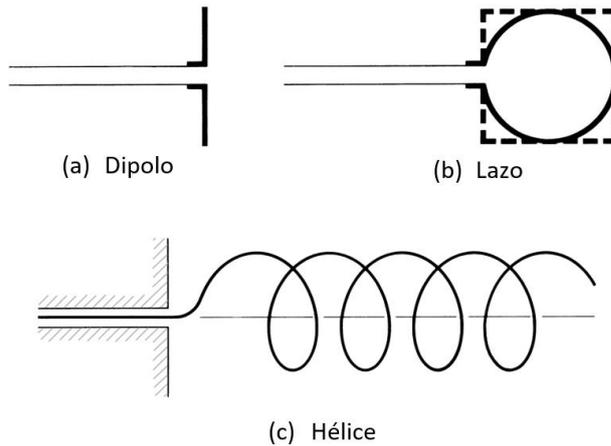


Figura 5. Configuraciones de Antenas de Cable.

Fuente:[2]

- Antenas de Apertura

La característica más importante de esta antena en su estructura es su abertura o apertura a través de la cual fluyen las ondas electromagnéticas. Las analogías son en la acústica es el megáfono. Además, la pupila del ojo humano es una abertura para ondas electromagnéticas de frecuencia óptica. En la radiofrecuencia las bocinas y los reflectores son ejemplo de antenas apertura. Las antenas apertura son de uso común en frecuencias UHF y superiores [3]. La siguiente figura muestra ejemplos de antenas de apertura.

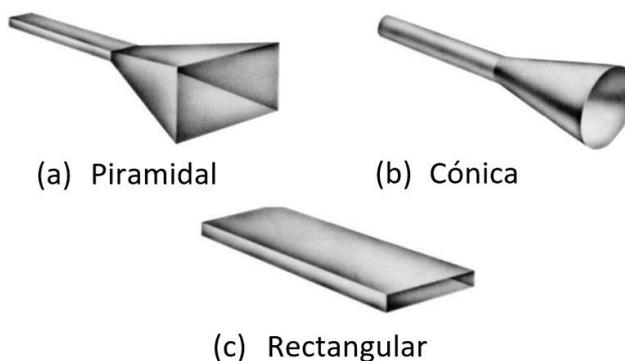


Figura 6. Configuraciones de Antenas de Apertura.

Fuente:[2]

- Antenas de Reflexión

Debido a la emergente necesidad de establecer comunicación a largas distancias, se consideraron en usar novedosas formas de antenas. Una forma muy común es el reflector parabólico. [2]

Las antenas reflectoras se caracterizan por ser antenas banda ancha. Son mucho más simples de construcción que arreglos de antenas. Una antena reflectora tiene un mejor diseño. Utiliza una alimentación simple.[5]

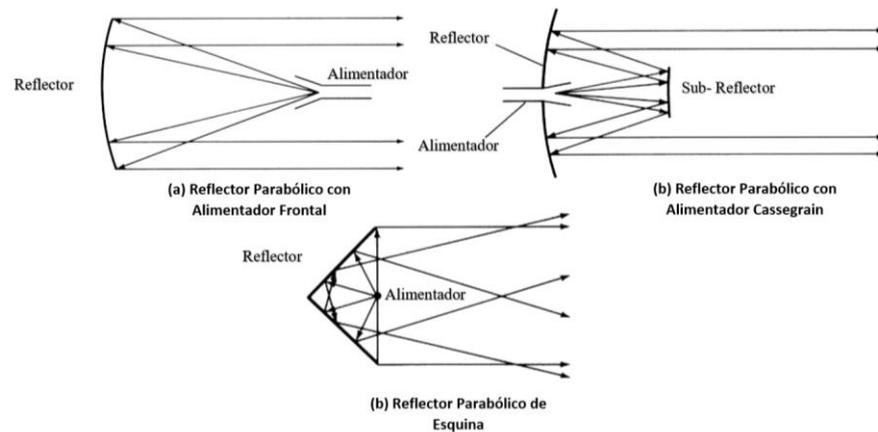


Figura 7. Configuración de Antenas de Reflexión.

Fuente:[2]

1.1.4 ANTENAS PLANARES TIPO PARCHES (PATCH) O MICROSTRIP

Estas antenas consisten en un parche conductor de cualquier geometría plana sobre un dieléctrico y un plano de tierra. También son llamadas antenas microstrip ya que para su alimentación es usada dicha tecnología. [2][5]

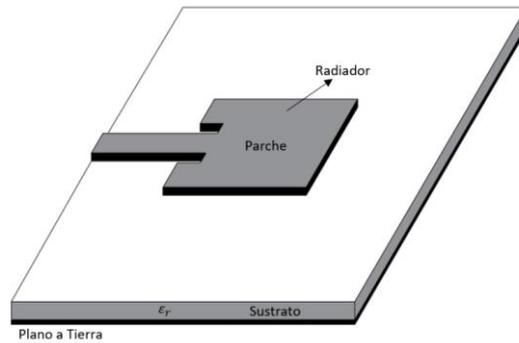


Figura 8. Antena Parche (Patch) o de Microstrip.

Fuente: [2]

El parche conductor puede llevar muchas diferentes configuraciones. Utilizando técnicas de circuito impreso para grabar las antenas en los sustratos. Son utilizadas en estaciones y dispositivos móviles, principalmente en frecuencias de microondas. Donde la dimensión de la antena, el coste, el peso, la eficiencia y la facilidad de instalación son su principal ventaja ante tipos de antenas tradicionales. [2][5][6]

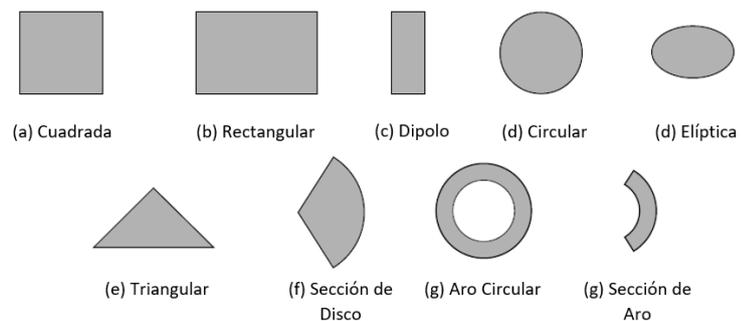


Figura 9. Formas utilizadas de elementos patch.

Fuente: [2]

1.1.5 ANTENAS FRACTALES

El principio de estas antenas proviene de fractales que existen en la naturaleza, es decir patrones que se encuentran en la naturaleza, por

ejemplo: pétalo, arboles, vegetación en general, copos de nieve y otros objetos que no son fácilmente descritos por la geometría tradicional. Estos fractales incorporan dos propiedades: la primera es la propiedad de relleno de espacio que se basa en curvas de relleno de espacio. La segunda es la propiedad de auto-similitud, en el cual un objeto similar es exactamente o aproximadamente similar a una parte de sí mismo. Las antenas fractales se basan en el número de iteraciones que se repite el patrón.[7][8]

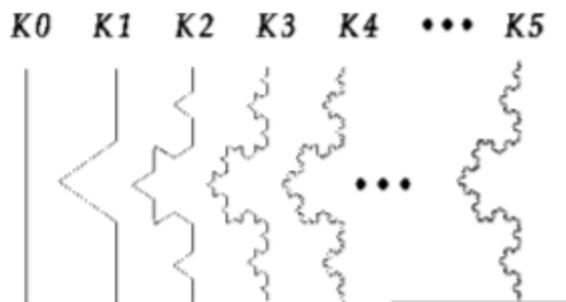


Figura 10. Diferentes Iteraciones (k) del triángulo de Koch.

Fuente:[7]

El diseño de antenas se beneficia de los fractales, estos pueden dar como resultados un ancho de banda del 10% al 40% de la frecuencia central de trabajo de la antena, además de patrones de radiación uniformes, es decir no contienen lóbulos de radiación parásitos y un contienen la propiedad de multi-banda, determinado por el número de iteraciones del patrón. [8]

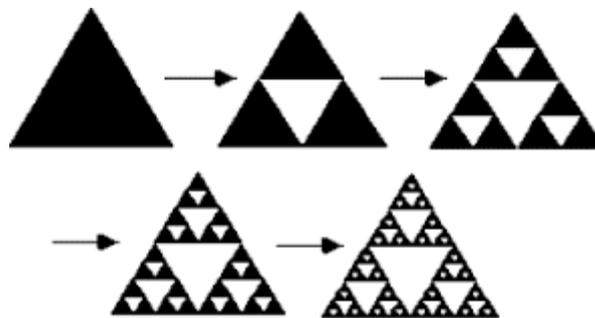


Figura 11. Triángulo de Sierpinski con cinco iteraciones.

Fuente:[8]

1.2 ORIGAMI APLICADO A LA INGENIERÍA

1.2.1 LA TÉCNICA DEL ORIGAMI

La papiroflexia es el ancestral arte japonés del doblado de papel más conocido como origami. Un trozo de papel puede ser doblado por un artista hasta obtener sorprendentes formas de estructuras o animales [9].

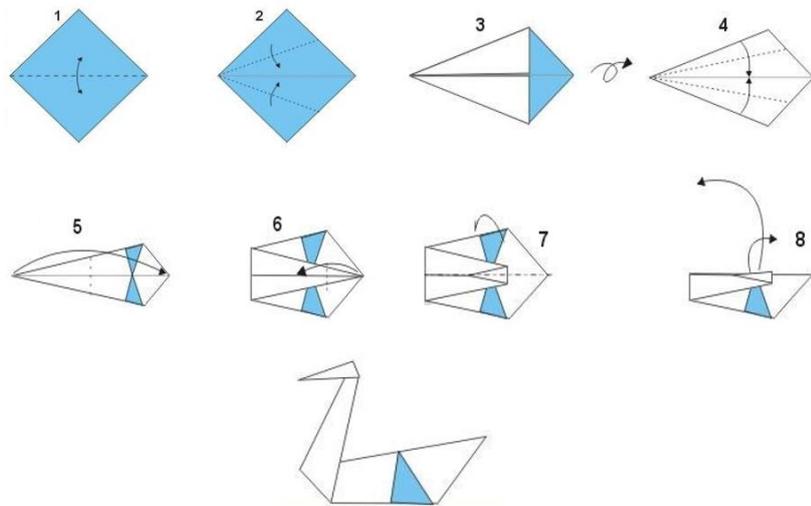


Figura 12. Cisne Utilizando Técnica de origami.

Fuente: Autor

El arte del origami ha tenido un cambio de concepto en los últimos 30 años, las personas atraídas por la papiroflexia crean complejos diseños, incrementado cada vez el nivel de dificultad en su elaboración, descubriendo nuevas reglas matemáticas que gobiernan el plegado de papel. Las reglas son trabajadas por artistas, matemáticos y científicos y desde entonces la técnica del origami ha sido utilizada en muchas aplicaciones industriales. [9][10]

1.2.2 ORIGAMI EN LA INGENIERÍA

El origami se ha aplicado recientemente a varias áreas como, bioquímica, arquitectura, robótica, astronomía y electromagnetismo. Algunas aplicaciones en la ingeniería son:

- **Paneles solares**

Los conceptos de Origami se usaron para empacar y desplegar un sistema solar matriz de energía en el buque de investigación llamado Space Flight Unit (SFU). El método de plegado se llama "Miura-ori". [10]

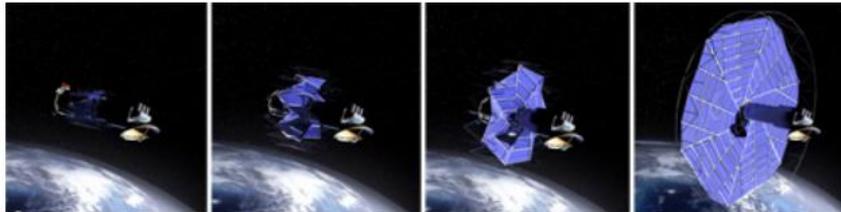


Figura 13. Panel solar con método "Miura-ori".

Fuente: [10]

- **Auto plegado de hojas de polímero**

Una técnica fue desarrollada por Michael Dickey donde las láminas de polímero se doblan automáticamente cuando se exponen a la luz. Las láminas de polímero se corrieron para obtener un patrón de líneas negras de pliegues en origami y se pliegan automáticamente cuando se exponen.

El negro absorbe más energía que los colores pálidos, por lo que las líneas negras se encogerán más rápido que las áreas blancas circundantes. Puede cambiar el ángulo del doblez cambiando el ancho de las líneas negras. [10]

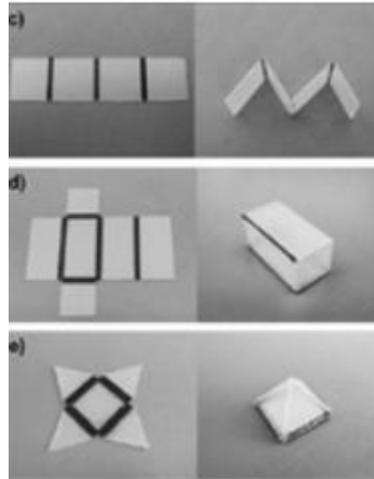


Figura 14. Estructuras en Polímero

Fuente: [10]

- **Telescopio espacial, anteojos**

The Eyeglass es una lente telescópica plegable diseñada por Robert Lang, que se puede empacar fácilmente en un transbordador espacial y desplegado cuando en el espacio mediante la utilización de principios y técnicas de origami. La estructura de origami se llama "paraguas". [11]

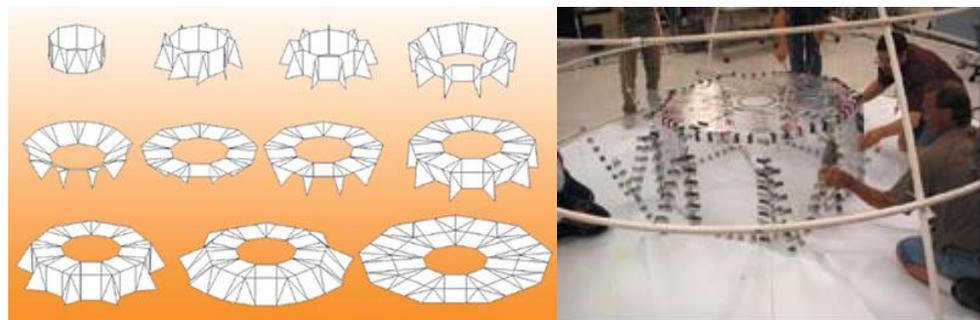


Figura 15. Telescopio de anteojos en estructura de origami

Fuente: [11]

- **Origami ADN Nanorobot**

El investigador del Wyss Institute (Harvard) Shawn Douglas y sus colegas han podido utilizar Origami ADN para crear formas tridimensionales, como cubos y cajas. Más importante aún, Douglas fue capaz de utilizar técnicas de ADN Origami para crear una jaula similar a una almeja que podría transportar y administrar medicamentos a células específicas.

La jaula tipo almeja (nanorobots) tiene "bloqueos" que se descomprimen cuando se encuentra una célula objetivo, liberando de ese modo las drogas localmente. [10]

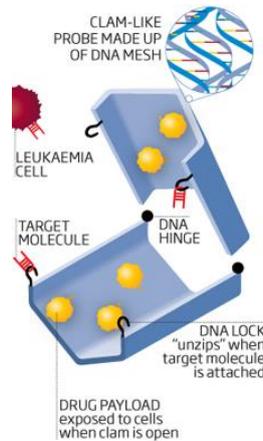


Figura 16. Origami ADN Nanorobot
Fuente:[10]

1.2.3 ORIGAMI APLICADO EN EL DISEÑO DE ANTENAS

- **Antena Desplegable Origami Yagi Loop**

La antena fue diseñada sobre una estructura spring, donde cada nivel de la spring es redondo y todos los niveles son paralelos. La estructura de resorte del origami es adecuado para diseñar la matriz de antenas de lazo Yagi. La gran ventaja de la spring de origami es que todo el spring y el cuerpo puede controlarse aplicando presión en cualquier nivel. [12]

La antena de bucle Yagi se encuentra en una base de spring de origami hecha de papel. La antena puede lograr una ganancia alta (> 10 dBi). En la figura siguiente se muestran 2 de los estados más opuestos, (a) cuando se encuentra contraída, (b) cuando la antena está extendida. Esta antena posee una alta ganancia, y con su capacidad de retracción, el autor la considera ideal para aplicaciones en estructuras espaciales. [13]

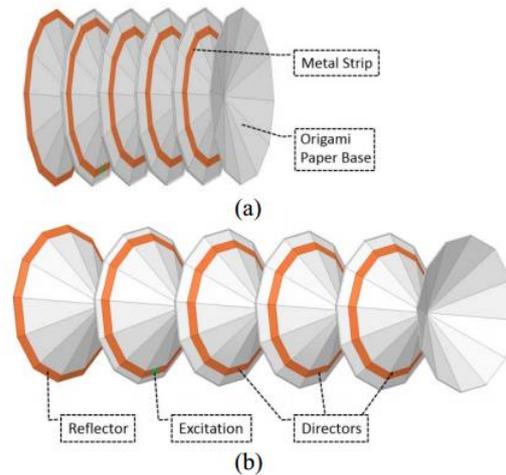


Figura 17. Diseño de Antena Yagi Loop Desplegable. (a) Estado Retraído. (b) Estado Estendido.

Fuente: [13]

- **Antena Helicoidal Cuadrifilar de Origami Reconfigurable**

Presenta una antena helicoidal cuadrifilar en un diseño de modo de origami que puede reconfigurarse para operar en diferentes modos y diferentes frecuencias que puede operar en modo normal en bandas UHF con una altura total, modo axial con polarización circular en la banda L y la banda S al plegar su altura. Al ser plegable es muy adecuada para aplicaciones satelitales y espaciales. Este diseño de antena posee una forma, que cumple en gran medida, la característica de resorte, en donde su altura varía según se requiera, a diferencia de otros tipos de antenas origami, esta posee varios conductores de cobre que rodean la figura de la antena, por lo tanto, la alimentación de esta se realiza mediante puertos lumped en fases de cuadratura. [14]

Mediante la siguiente grafica se puede apreciar, la variación del valor de frecuencia de resonancia, que varía desde los 0.5 GHz hasta los 3.2 GHz, únicamente variando el valor de la altura de la antena, nótese también que los gráficos que acompañan a los picos de resonancia, son el patrón de radiación de la antena, que varía desde una forma de dona, hasta una forma parecida al patrón de radiación de un monopolo.

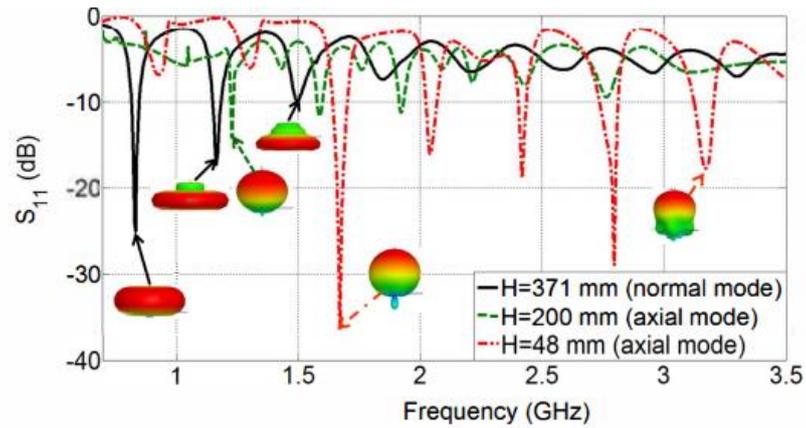


Figura 18. Grafica de Perdidas de Retorno correspondientes a la Simulación de la Antena.

Fuente: [14]

- **Antena Reconfigurable de Acordeón de origami**

Se basa en una estructura de acordeón, que puede ser doblado y desplegado a diferentes alturas proporcionando así rendimiento reconfigurable en términos de frecuencia de operación y ganancia que puede soportar diferentes servicios. Esta antena es adecuada para estructuras aerotransportadas y espaciales, así como las cargas útiles, ya que puede colapsar durante el lanzamiento (por lo tanto, minimiza su tamaño) y expandir después de que ha llegado a la órbita proporcionando así un rendimiento óptimo [15].

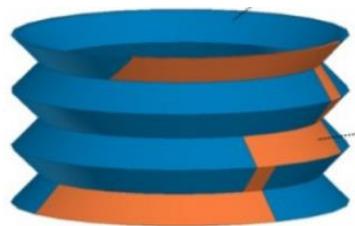


Figura 19. Antena de Acordeón.

Fuente:[15]

Para mostrar los resultados se presenta la gráfica de pérdidas de retorno S_{11} , en la cual se aprecia como picos negativos, las distintas frecuencias a las cuales trabaja la antena, según la altura asignada para la simulación.

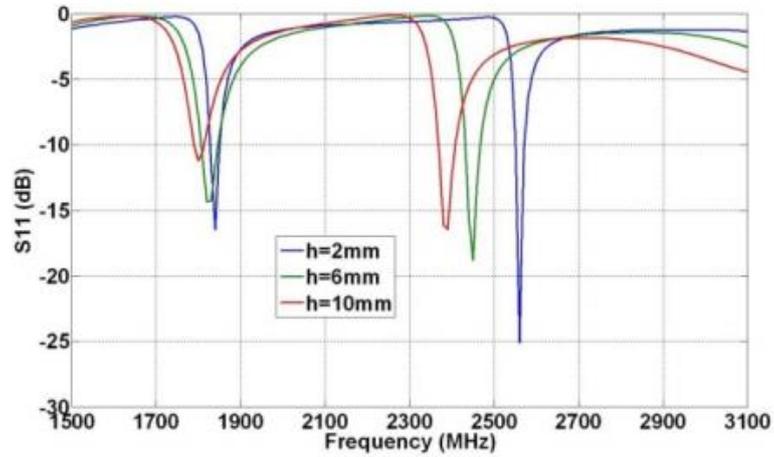


Figura 20. Grafica de Perdidas de Retorno correspondientes a la Simulación de la Antena en diferentes estados de la misma.

Fuente:[15]

- **Antena Reconfigurable Nojima Origami**

Se trata de una antena basada en una estructura popular de origami, conocida como Nojima, esta antena tiene dos modos de operación, cuando se encuentra doblada trabaja en un modo direccional, pero cuando está totalmente desplegada trabaja como antena omnidireccional, en la gráfica siguiente se muestran dos trazos, cada uno correspondiente con uno de los estados de trabajo de la antena, cuando se encuentra doblada trabaja a una frecuencia de 1.6 GHz, mientras que desdoblada trabaja a 0.66 GHz, y con un valor de ganancia adicional. [16]

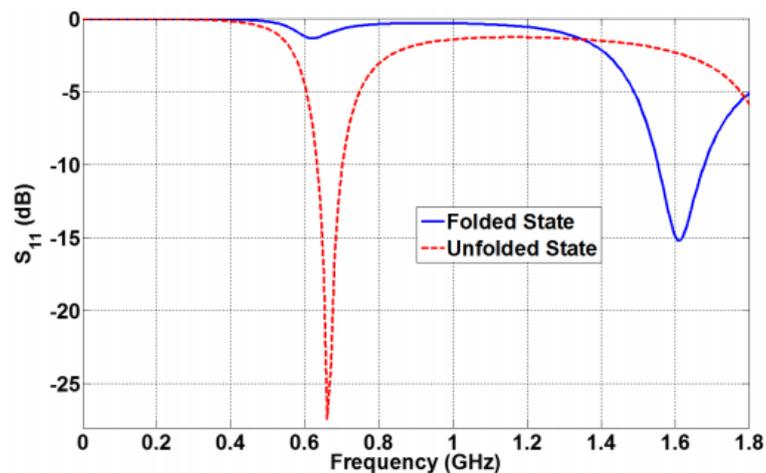


Figura 21. Grafica de Perdidas de Retorno correspondientes a la Simulación de la Antena, en sus 2 estados.

Fuente: [16]

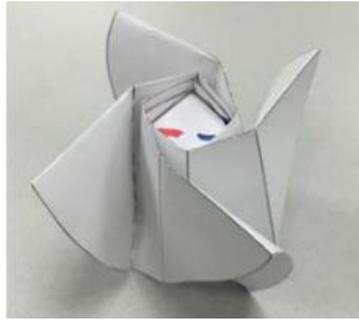


Figura 22. Antena Nojima.

Fuente: [17]

1.3 ANILLO RESONANTE

1.3.1 CONSTANTE DIELECTRICA EFECTIVA POR ANILLO RESONANTE

Mediante un circuito de anillo resonador, se pueden llevar a cabo mediciones de la constante dieléctrica efectiva de un material, utilizando una estimación de la atenuación de la transferencia de onda en la línea de Microstrip.

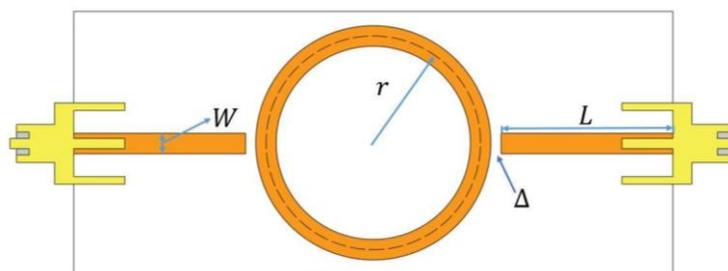


Figura 23. Anillo resonador planar vista a) superior b) de lado.

Fuente: Autor

Cuando la circunferencia media del resonador de anillo es igual a un múltiplo entero de una longitud de onda guiada, se establece la resonancia. Esto puede expresarse como:

$$L = 2\pi r \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{2}n\lambda_g \quad (11)$$

Para $n = 1,2,3,4 \dots$

Donde n es el número de modo, λ_g es la longitud de onda guiada, y r es el radio medio del anillo que es igual al promedio de los radios externo e interno. Esta relación es válida para el caso de acoplamiento flojo, ya que no tiene en cuenta la brecha de acoplamiento efectos. A partir de esta ecuación, se pueden calcular las frecuencias de resonancia para diferentes modos de λ_g . [18]

Para un resonador de anillo, λ_g . Puedo relacionarme con la frecuencia por:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (12)$$

Donde ε_{eff} es la constante dieléctrica efectiva, λ_g es longitud de onda espacio libre, λ_o es la frecuencia resonante.

La brecha de acople (Δ) “coupling gap” que es el espacio entre la línea de alimentación y el anillo resonante está dado por:

$$\Delta = 0.41 h \left(\frac{\varepsilon_{eff} + 0.3}{\varepsilon_{eff} - 0.285} \right) \left(\frac{\frac{W}{h} + 0.262}{\frac{W}{h} + 0.818} \right) \quad (13)$$

La dimensión de W se encuentra dada por la línea microstrip, de la cual se habla en el siguiente punto.

1.4 LÍNEA DE ALIMENTACIÓN

Definimos líneas de alimentación a conductores inmersos en un medio dieléctrico, para la propagación de tensiones y corrientes, considerando el tiempo de retardo de las ondas electromagnéticas tardan en propagarse de un punto a otro. [19]

1.4.1 LÍNEA MICROSTRIP

La línea Microstrip es la más destacada para usarse en líneas de transmisión plana; puede ser integrada fácilmente con otros componentes y dispositivos de microondas pasivos y activos.[18]

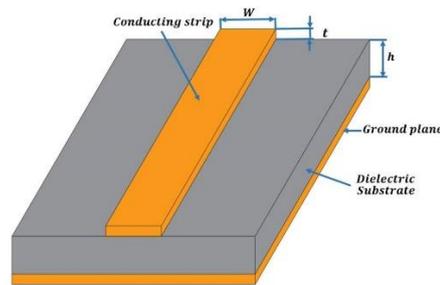


Figura 24. Línea microstrip.

Fuente: Autor

La geometría de una línea microstrip se muestra en la anterior figura, con un conductor de ancho W que está impreso en un sustrato dieléctrico de altura h y permitividad relativa ϵ_r . El ancho del conductor está dado por:

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{8e^{2A} - 2} \quad \text{para} \quad \frac{W}{h} < 2 \quad (14)$$

$$\text{Donde } A = \frac{Z_o}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right)} \quad (15)$$

La impedancia de la línea microstrip está definida por la altura h del sustrato, y el ancho del conductor W .

CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo establece los materiales para el sustrato como para el conductor, los cuales definen la constitución de la antena. Segundo se diseña un anillo resonante con el fin de medir las propiedades dieléctricas del sustrato.

El siguiente punto del capítulo se explica todo el proceso de diseño y dibujo de la antena en 3D, partiendo desde el análisis para la elección de las distintas configuraciones, también sobre el boceto del diseño de la antena empleado para su posterior construcción, y por último se detallan los métodos que se usaron para realizar el dibujo automatizado por software mediante ecuaciones, así como la forma de exportación del archivo gráfico 3D para su simulación.

2.1 CONSTITUCIÓN DE LA ANTENA

2.1.1 SUSTRATO (PAPEL KRAFT)

El sustrato a trabajar es papel Kraft. Este papel al estar hecho de pulpa de madera tiene un alto nivel de resistencia al desgarro y la tracción. Estas prestaciones hacen que el papel Kraft sea utilizado en el arte del origami. Por estos motivos, para la estructura de la antena basada en origami se emplea este papel.



Figura 25. Papel Kraft.

Fuente: Autor

2.1.2 CONDUCTOR (CINTA DE COBRE)

El cobre por su excelente conductividad eléctrica se distingue de otros materiales. Por ende, se designa al cobre como conductor para a la antena. Para una mayor facilidad de aplicación del cobre sobre la estructura, este se encuentra en forma de lámina o cinta autoadhesiva. La cinta de cobre posee un adhesivo acrílico que también es conductor eléctrico.



Figura 26. Cinta de cobre.

Fuente: Autor

2.2 ANÁLISIS DEL SUSTRATO

2.2.1 CÁLCULOS DEL ANILLO RESONADOR Y LÍNEAS DE ALIMENTACIÓN

Para el cálculo del anillo resonador es necesario establecer la frecuencia a la que se requiere trabajar. En este caso el resonador se diseña para operar a una frecuencia de 3GHz. Además, es necesario que exista un acople de impedancia entre el equipo de medición y el resonador, por lo tanto, se establece una impedancia para del resonador de $Z_o = 50 \Omega$. El papel Kraft posee un grosor $g = 0.16 \text{ mm}$, entonces se apilan diez hojas de Kraft llegando a obtener un espesor de $h = 1.6 \text{ mm}$ por simplicidad y factibilidad hacia el conector SMA.

El grosor $h = 1.6 \text{ mm}$ es requerido también para el cálculo del ancho de la línea microstrip W es decir de los alimentadores para el resonador.

Con los requisitos de frecuencia de resonancia, impedancia de resonador y el espesor de sustrato, ya establecidos. El siguiente paso es emplear las ecuaciones (10), (11), (12), (13), (14), (15), para obtener las medidas de construcción del anillo resonador.

En la siguiente figura se muestran los parámetros que definen el anillo resonante. Y en la tabla siguiente las medidas obtenidas para estos parámetros por las ecuaciones antes mencionadas.

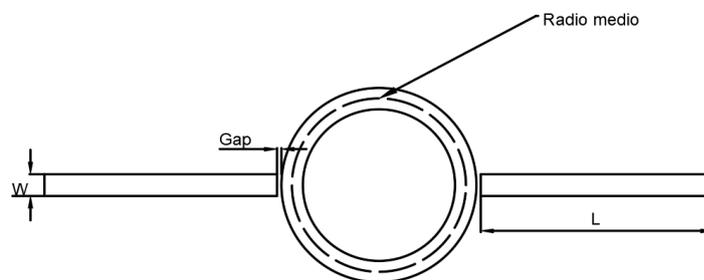


Figura 27. Parámetros del anillo resonante.

Fuente: Autor

Tabla 1. Medidas de Construcción del anillo resonador.

| Parámetro | Medida (mm) |
|---|----------------------|
| Radio medio (r) | 13.9442 |
| Ancho del conductor (W) | 6.8801 |
| Longitud de alimentador (L) | 25 |
| Brecha de acople (Δ) “ coupling gap” | 0.9211 |

2.2.2 SIMULACIÓN DEL ANILLO RESONANTE EN SOFTWARE HFSS

La simulación indica si el anillo resonante está trabajando a la frecuencia correspondiente al que fue diseñado, entonces en el software se construye el anillo con las características de los materiales a utilizar como es el sustrato de papel kraft con una altura $h = 1.6 \text{ mm}$ y la lámina de cobre que actúa de conductor con una altura de $t = 0.04 \text{ mm}$. Además de tomar en cuenta las medidas de la Tabla 1. Medidas de Construcción del anillo resonador.

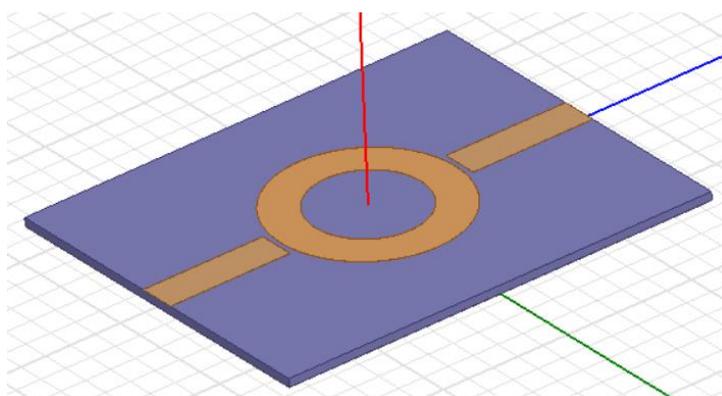


Figura 28. Anillo resonador en software HFSS.

Fuente: Autor

La asignación de lo Lumped Port se realiza colocando superficies de con una mayor área que los alimentadores. Esta superficie debe abarcar tanto el plano de tierra como la línea de alimentación del resonador. En efecto al tener dos líneas de alimentación se tendrá dos Lumped Port para la correcta simulación del resonador.

Para esta simulación se mide el parámetro S_{21} . Este parámetro mide los niveles potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la potencia enviada por el puerto 1.

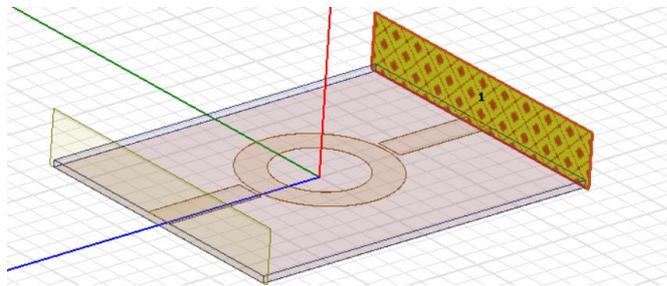


Figura 29. Lumped Port 1.

Fuente: Autor

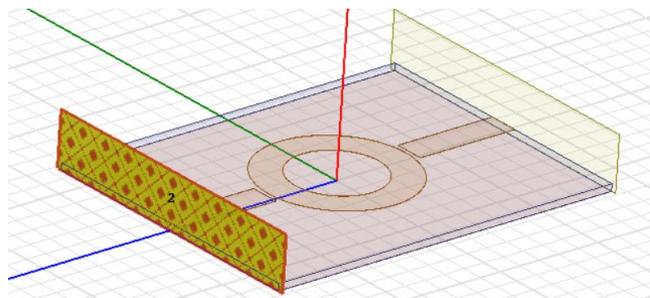


Figura 30. Lumped Port 2.

Fuente: Autor.

Como se observa en la siguiente figura, el parámetro S_{21} que brinda el software de simulación indica claramente que el anillo se encuentra resonando a una frecuencia de $3GHz$ a $-13.6716 dB$.

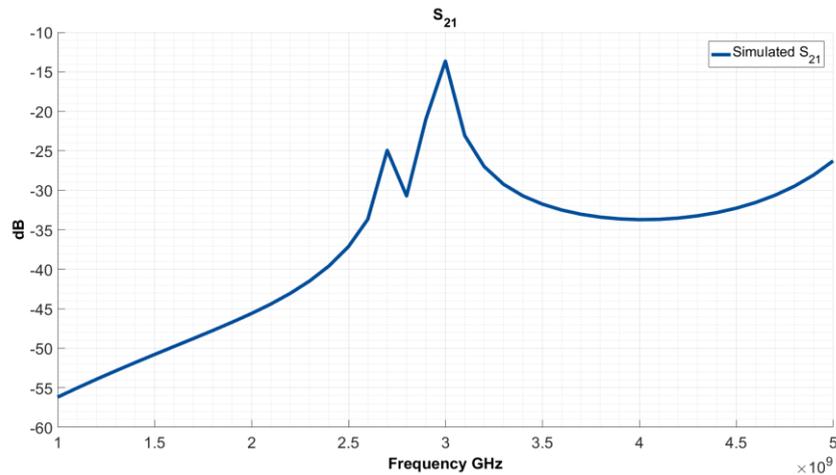


Figura 31. Parámetro S21 obtenido por simulación del resonador.

Fuente: Autor.

2.3 DISEÑO DE LA ANTENA

2.3.1 SELECCIÓN DEL DISEÑO DE LA ANTENA

En base a todos los modelos de antenas origami ya propuestos por otros investigadores, como el PHD. Stavros Georgakopoulos, se puede notar que la principal característica de estos diseños, es su forma de resorte (spring), que funciona, similar a un sistema telescópico, capaz de extenderse hasta varias de decenas de centímetros y retraerse hasta quedar prácticamente planos. Existen otros diseños de figuras origami empleados para antenas, que toman el nombre de antenas reconfigurables al poder realizar un cambio significativo en su estructura, pero son relativamente complejas.

Finalmente se optó por un diseño de estructura tipo resorte, que aparenta ser un prisma pentagonal, pero conformada por 7 secciones horizontales que están desfasadas, a las cuales llamaremos pisos, estos pisos tienen la capacidad de extenderse y retraerse, el modelo se conoce como “Torre Pentagonal”, el mismo cumple con la característica telescópica, ideal para una antena que se denomina reconfigurable.



Figura 32. Prototipo de la Torre Pentagonal hecha en papel kraft.

Fuente: Autor

2.3.2 BOCETO ESTRUCTURA DE PAPEL

Inicialmente se dibuja en 2D el boceto de la estructura de la antena, en el software de dibujo AutoCAD, el boceto tiene todas las líneas a seguir para el doblado, que se deben hacer para formar la estructura mediante origami.

El plano usado para la construcción de este diseño, consiste en una hoja formato A4 (210x297 mm), la misma tiene múltiples divisiones tanto de forma horizontal y de forma vertical, la parte horizontal se encuentra dividida en 6 segmentos de 35mm, y la parte vertical en 9 segmentos de 33mm. Mientras que las líneas horizontales son paralelas al plano, las líneas verticales se encuentran inclinadas en un ángulo de $70,53^\circ$. Finalmente se tiene una matriz de rombos alineados, a los cuales, les divide una línea que cruza por 2 de sus vértices opuestos.

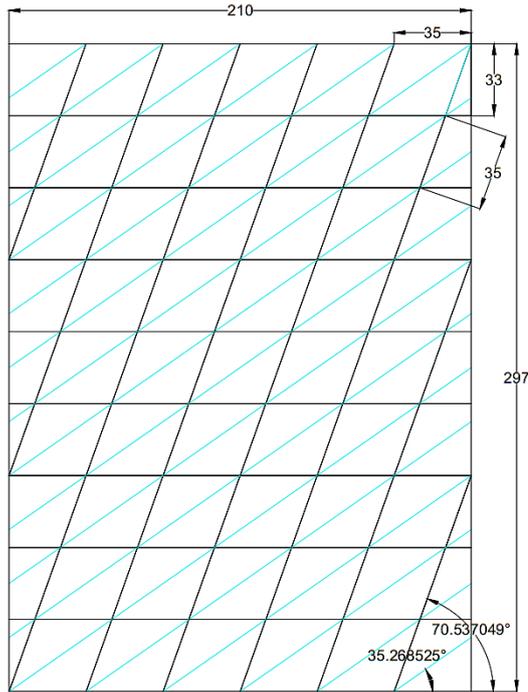


Figura 33. Boceto de origami correspondiente al diseño de Antena planteado.

Fuente: Autor

2.3.3 CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE COBRE

El diseño de la línea de cobre, que envuelve la estructura de la antena, fue propuesto de forma empírica, pero se consideró que su forma se asemejaba a una antena helicoidal, ya que consiste de una cinta plana de cobre, que envuelve la estructura de torre pentagonal.

El diseño elegido, fue el que mejor se adaptó a la forma de la estructura de la antena, ya que las espirales de una antena helicoidal pueden encontrarse más juntas o separadas unas de otras, sin afectar su forma principal, lo cual es una ventaja al aplicar este diseño a la figura origami elegida, en donde la estructura posee la característica de un resorte.

En la siguiente figura se presenta el patrón de la línea de cobre que está asentada sobre la hoja con la matriz para ser armada la torre pentagonal que la estructura final para la antena basada en origami.

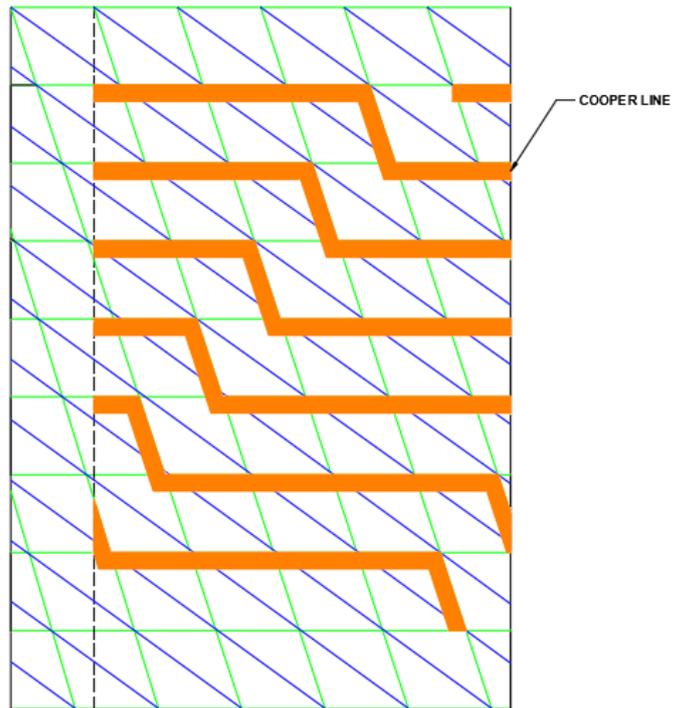


Figura 34. Geometría de la cinta de cobre sobre la estructura origami

Fuente: Autor

2.3.4 DIBUJO DE LA ANTENA

Estructura de la antena

Inicialmente se dibujó solo la estructura de la antena, de un único piso, todo esto se realizó de forma manual mediante polilíneas, en el software de dibujo AutoCAD. Para realizar este dibujo se considera un pentágono inscrito en una circunferencia de radio (r) sobre el plano XY , el mismo pentágono se dibuja, pero a una altura (h) y rotado (rt) en relación al centro. Los valores de altura y rotación están ligados por la geometría de la figura origami por lo que deben ser exactos. Por último, se dibujó las líneas que corresponden con los dobleces del origami.

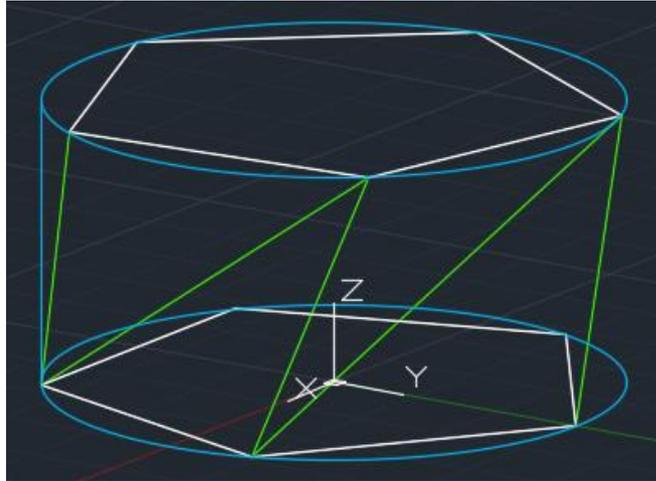


Figura 35. Dibujo de un piso de la estructura de la antena planteada.

Fuente: Autor

Dibujo 3D de la antena

Una vez completada la estructura, se debe considerar un grosor, el cual depende del papel kraft que es de 0.16mm, para lograr esto, se dibuja otra estructura de forma similar pero escalada, esto se consigue añadiendo el grosor deseado al radio (r) de la circunferencia que sirve para dibujar el pentágono.

El dibujo en 3D se mantiene como una estructura alámbrica, para lo cual es necesario realizar un proceso para convertirlo en un sólido 3D, para ello se tendrá que considerar cada cara plana como una superficie. Al tener dos superficies planas paralelas, se realiza un proceso de “Solevado” entre estas, y así se forma un sólido, el proceso se repite hasta completar toda la figura.

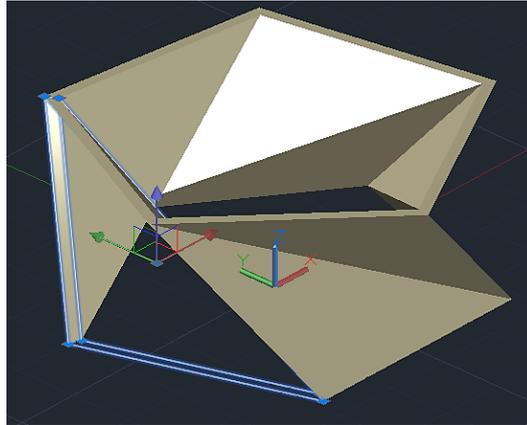


Figura 36. Dibujo de 3D de la estructura de la antena.

Fuente: Autor

Completado el sólido de la estructura, se procede a dibujar la línea de cobre, en base al boceto realizado en 2D, la cual; inicia desde la parte inferior de la torre, y llega hasta la parte superior del primer piso de la torre, siguiendo una arista lateral de la estructura, después envuelve la estructura hasta colocarse a una cara de distancia de la línea inicial. El ancho de la línea está dado por la impedancia de acoplamiento requerida, basado en una línea microstrip, que se calculó en el apartado 2.2.1.

Una vez dibujado un solo piso de la estructura de la antena y su línea de cobre, se copia todo el piso, para posteriormente pegarlo de manera apilada, como si fuera otro piso, se repite el proceso ($N=7$) veces, según los pisos requeridos.



Figura 37. Renderizado del dibujo de la estructura de la antena en 3D y de la cinta de cobre que la envuelve

Fuente: Autor

Exportación del archivo de dibujo

Al finalizar el dibujo, se tendrá una figura conformada por 2 solidos; la estructura y la línea de cobre, sin embargo, el formato de dibujo “.dwg”, no es compatible con el software de simulación usado. Para poder usar el dibujo de la antena en el software HFSS, se debe exportar como un archivo tipo “.SAT”, para ello se selecciona la opción de exportar en otros formatos, desde el menú de AutoCAD, luego se selecciona el formato “ACIS(*.sat)”, para finalmente seleccionar el área de dibujo a exportar.

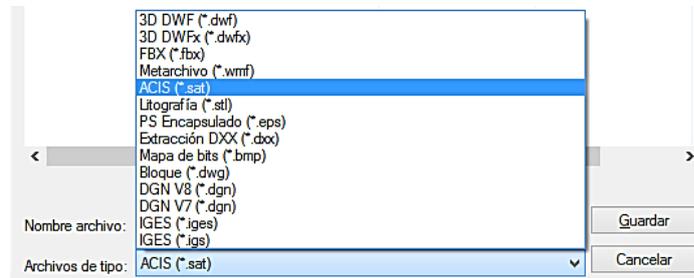


Figura 38. Cinta de opciones de exportación del dibujo, desde AutoCAD

Fuente: Autor

2.3.5 DIBUJO 3D DE LA ANTENA AUTOMATIZADO MEDIANTE SOFTWARE

Una antena reconfigurable basada en técnicas de origami, puede cambiar su forma, y al mismo tiempo cambiar sus parámetros, para ello, se requiere realizar una simulación para cada una de las formas posibles, a las cuales se les llamarán estados. Para cada una de las simulaciones se requiere un gráfico único, con las diferentes medidas y proporciones de la antena origami según su estado. Considerando esto, se optó por utilizar el software VBA (Visual Basic para Aplicaciones), en conjunto con AutoCAD, además de complementos como Visual Lisp y Macros.

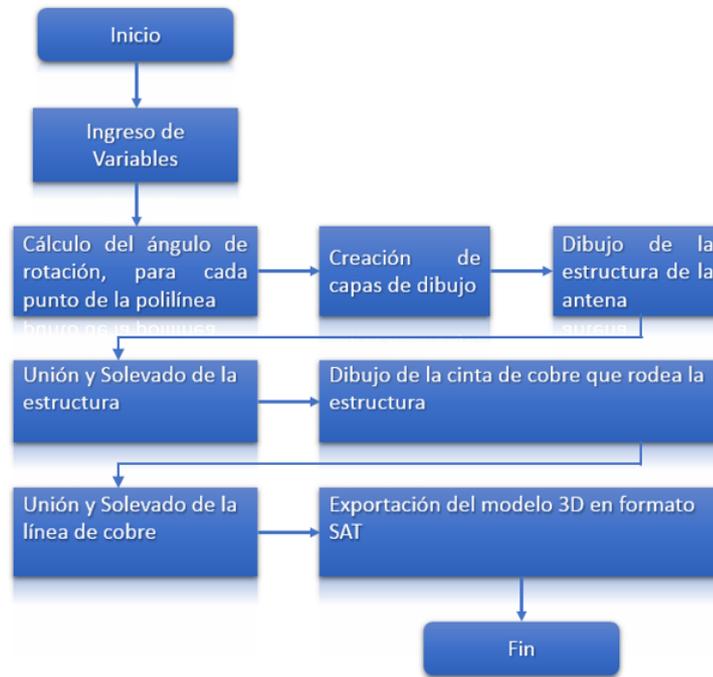


Figura 39. Diagrama de flujo del dibujo 3D de la antena.

Fuente: Autor

Dibujo de la estructura de la antena

Para dibujar la estructura de la torre pentagonal mediante código en VBA, se consideró inicialmente un solo piso, además que su forma se puede construir a partir de pequeños triángulos, según se muestra en la Figura 40. Un piso de la torre pentagonal formada a partir de triángulos.

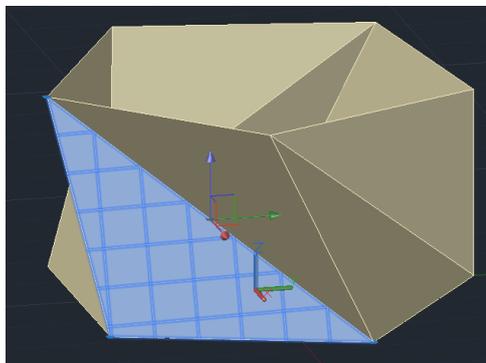


Figura 40. Un piso de la torre pentagonal formada a partir de triángulos.

Fuente: Autor

Considerando que el dibujo debe ser en tres dimensiones, se usó polilíneas en 3D, mediante coordenadas polares, de esta forma se pueden asignar variables para modificar las dimensiones del dibujo de la antena.

Primero se dibujó una interfaz gráfica, en donde se pondrán todos los valores iniciales que corresponden con medidas de la antena, como son; altura de la antena, tamaño según el lado, grosor del papel y del cobre, etc.

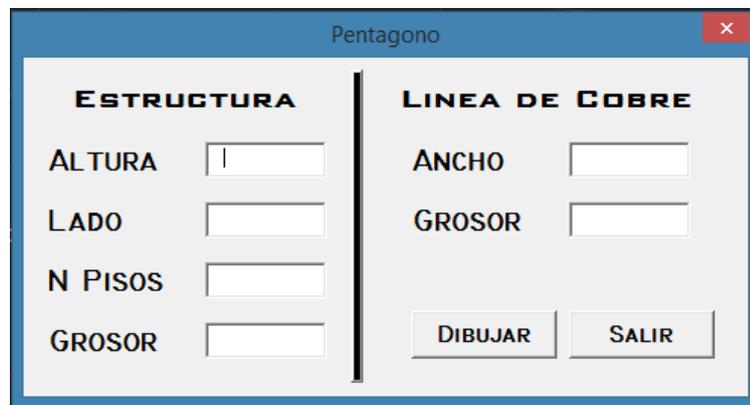


Figura 41. Interfaz gráfica en VBA, para asignar variables al dibujo de la antena.

Fuente: Autor

La programación parte de tomar los valores de la interfaz gráfica y almacenarlo en variables dentro del programa, en donde también se declaran otros valores de constantes como PI, y los ángulos que tiene un pentágono. Dentro del programa se consideró 2 variables principales, que son; el lado del triángulo que forma la torre, y la altura entre los pisos de la torre. En función de la variable de altura, se calcula la rotación o desfase, que tiene la torre, entre sus niveles o pisos.

Para obtener el valor de rotación, según la altura del piso de la torre, se realizó una medición practica en el modelo de origami, y también un análisis matemático.

Medición de rotación en función de la altura

El experimento realizado consistió, en considerar un solo piso de la estructura de origami, y en la parte superior se le colocó un graduador, a medida que extendíamos la torre, a una determinada altura, el graduador indicaba al ángulo de rotación, este proceso se realizó 5 veces, para 8 diferentes ángulos.



Figura 42. Experimentación de la medición del ángulo de desfase en función de la altura, de un piso de la antena

Fuente: Autor

Con todos los datos obtenidos, se los paso a una hoja de cálculo, en donde se realiza un promedio de los valores obtenidos, luego se aplica una gráfica del ángulo de rotación en función de la altura, para finalmente ajustar una ecuación (16) de cuarto grado, puesta a prueba en el código.

Tabla 2. Tabla correspondiente a las medidas tomadas del experimento

| | 0° | 5° | 10° | 15° | 20° | 25° | 30° | 40° |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Medición 1 | 3,3 | 6 | 9,8 | 15,3 | 18,15 | 22,2 | 25 | 28,6 |
| Medición 2 | 3,5 | 6 | 9 | 15,7 | 17,8 | 22,45 | 26 | 28 |
| Medición 3 | 3 | 7,4 | 9,9 | 17,2 | 18,15 | 23,7 | 25,8 | 30,2 |
| Medición 4 | 3,9 | 5,4 | 9,9 | 16,8 | 19,4 | 23,3 | 26,1 | 28 |
| Medición 5 | 3 | 6,6 | 9,75 | 17 | 20 | 24 | 27 | 29,8 |
| Promedio | 3,340 | 6,280 | 9,670 | 16,400 | 18,700 | 23,130 | 25,980 | 28,920 |

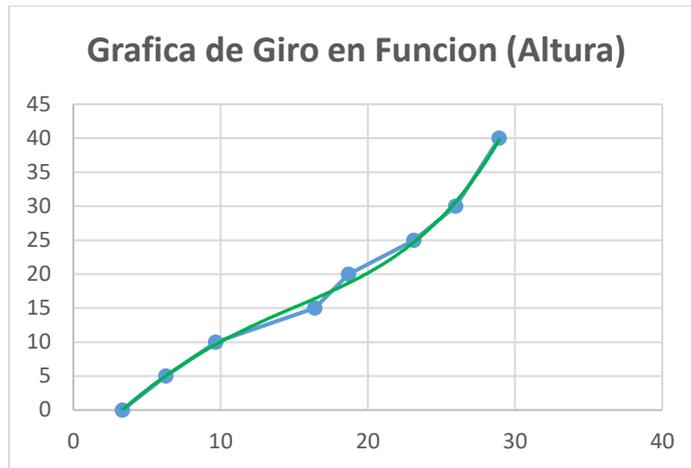


Figura 43. Grafica que representa la ecuación obtenida, de la relación entre altura y ángulo de desfase.

Fuente: Autor

$$y = 0,00007775x^4 - 0,00125487x^3 - 0,05054250x^2 + 2,24215562x - 6,85130935 \quad (16)$$

Análisis Matemático de la rotación en función de la altura

Otra forma de relacionar el ángulo de rotación según la altura de extensión de la antena origami, es mediante un análisis geométrico, para ello se plantea usar un sistema de coordenadas cilíndricas.

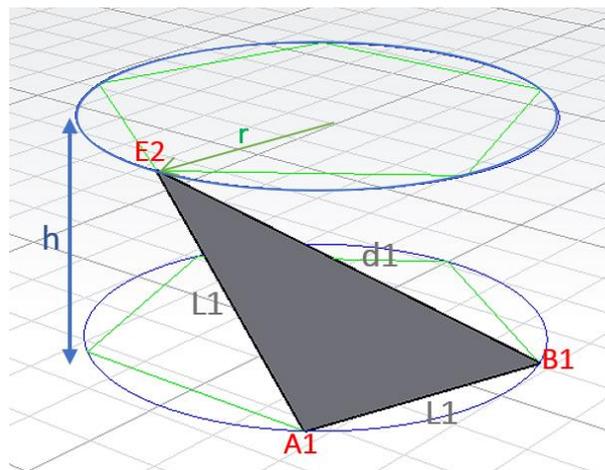


Figura 44. Planteamiento grafico del diseño de la estructura de la antena, desde el punto de vista geométrico

Fuente: Autor

Se considera un triángulo, el cual consta de 3 puntos; A1 (X_A, Y_A, Z_1) , B1 (X_B, Y_B, Z_1) y E2 (r, θ, Z_2) o E2 (X_{E2}, Y_{E2}, Z_2) .

Se considera la siguiente igualdad:

$$\sqrt{X_{E2}^2 + Y_{E2}^2} = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2} \quad (17)$$

$$X_{E2}^2 + Y_{E2}^2 = X_A^2 + Y_A^2 = X_B^2 + Y_B^2 = r^2$$

$$\therefore Y_{E2} = \mp \sqrt{r^2 - X_{E2}^2}$$

En coordenadas cilíndricas o cartesianas los valores en Z, son iguales, por lo que se considera que la única variable es la altura h, esto nos da que

$$Z_2 = Z_1 + h \quad (18)$$

Se puede considerar la siguiente ecuación, para despejar el valor de L1.

$$L1 = \sqrt{(X_{E2} - X_A)^2 + (Y_{E2} - Y_A)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}$$

$$L1^2 = (X_{E2} - X_A)^2 + (Y_{E2} - Y_A)^2 + h^2 \quad (19)$$

Teniendo despejado el termino Y_{E2} , de la primera relación geométrica, se lo reemplaza en la ecuación (19), para buscar términos semejantes y simplificarla, por lo que quedaría lo siguiente;

$$L1^2 = (X_{E2} - X_A)^2 + \left(\mp \sqrt{r^2 - X_{E2}^2} - Y_A \right)^2 + h^2 \quad (20)$$

$$L1^2 = X_{E2}^2 - 2X_{E2}X_A + X_A^2 + \left((r^2 - X_{E2}^2) - 2\left(\mp \sqrt{r^2 - X_{E2}^2} \right) Y_A + Y_A^2 \right) + h^2 \quad (21)$$

$$\mp \sqrt{r^2 - X_{E2}^2} * 2Y_A = -2X_{E2}X_A + X_A^2 - L1^2 + r^2 + Y_A^2 + h^2 \quad (22)$$

Factorizando la ecuación (22) se puede llegar a una expresión, la cual se le iguala a cero:

$$0 = 4r^2X_{E2}^2 - 4K * X_AX_{E2} + K^2 - 4Y_A^2r^2$$

Donde:

$$K = X_A^2 - L1^2 + r^2 + Y_A^2 + h^2 \quad (23)$$

La ecuación (23) queda planteada como una de segundo grado, la cual se puede resolver mediante la fórmula general:

$$X_{E2} = \frac{4K * X_A \mp \sqrt{16X_A^2K^2 - 4 * 4r^2 (K^2 - 4Y_A^2r^2)}}{2 * 4r^2} \quad (24)$$

Simplificando el termino y reemplazando K

$$X_{E2} = \frac{K * X_A \mp Y_A \sqrt{4r^2 - K}}{2r^2}$$

$$X_{E2} = \frac{X_A^2 - L1^2 + r^2 + Y_A^2 + h^2 * X_A \mp Y_A \sqrt{4r^2 - X_A^2 - L1^2 + r^2 + Y_A^2 + h^2}}{2r^2} \quad (25)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones de dos incógnitas de las coordenadas del punto E2, se utilizó el software Matlab.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{E2} = \frac{Y_A \left(\frac{-h^4 + 2h^2L1^2 - 2h^2r^2 - 2h^2X_A^2 - 2h^2Y_A^2 - L1^4 + 2L1^2r^2 + 2L1^2X_A^2 + 2L1^2Y_A^2 - r^4 + 2r^2X_A^2 + 2r^2Y_A^2 - X_A^4 - 2X_A^2Y_A^2 - Y_A^4 + h^2X_A - L1^2X_A + r^2X_A + X_A Y_A^2 + X_A^3}{2(X_A^2 + Y_A^2)} \right) + h^2X_A - L1^2X_A + r^2X_A + X_A Y_A^2 + X_A^3}{2(X_A^2 + Y_A^2)} \\ Y_{E2} = \mp \sqrt{r^2 - X_{E2}^2} \end{array} \right. \quad (26)$$

Al tener las coordenadas cartesianas del punto E2, en función de la altura y de los puntos A1 y B1, se pueden convertir en coordenadas polares, en función del radio y el ángulo. De esta forma se puede utilizar la ecuación, que será empleada en el programa para el dibujo, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\theta = \text{Tan}^{-1} (Y_{E2} / X_{E2}) \quad (27)$$

$$r = \sqrt{X_{E2}^2 + Y_{E2}^2} \quad (28)$$

Al considerar dibujar los lados de los triángulos, que forman el pentágono, con L=35mm, pero la gráfica mediante software se hace usando coordenadas polares, se requiere un valor de radio que se obtiene de la siguiente manera.

$$L = 2r \text{ Sen}(36)$$

$$r = \frac{L}{2 \text{ Sen}(36)} \quad (29)$$

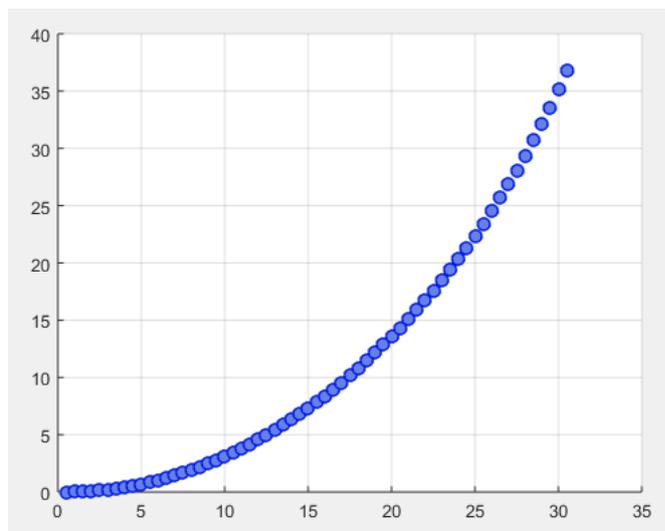


Figura 45. Grafica correspondiente a la ecuación de que relaciona altura y desfase, basado en análisis matemático

Fuente: Autor

Dentro de la programación en VBA, el código se basa en el principio de dibujar primero los triángulos correspondientes a la cara interna de la estructura, para ello se usa un tipo de variable conocida como “Acad3DPolyline”, que requiere una matriz de puntos, correspondientes a lo que se desee dibujar.

Estos puntos se definen en coordenadas (X, Y, Z), pero para simplificar el proceso, se usan coordenadas polares;

$$X = r * \text{Cos}(\theta) \quad (30)$$

$$Y = r * \text{Sen}(\theta) \quad (31)$$

$$Z = Z \quad (32)$$

Los valores de r y θ se encuentran utilizando las ecuaciones iniciales, las cuales van a depender del tamaño de la estructura y de la posición de esta.

Este proceso es repetitivo, hasta completar un piso mediante estos triángulos, para los pisos superiores únicamente se añade el valor de h en la coordenada Z , por lo que se puede realizar este gráfico usando el mismo código, mediante un bucle For.

Se debe considerar que el gráfico requerido debe ser en 3 dimensiones, por lo que se tiene que convertir en un sólido, para esto únicamente, realizamos una estructura de torre interna y otra externa, considerando la diferencia de tamaños de estas, como el grosor de una hoja de papel Kraft, es decir 0.16mm. Luego mediante un comando de “Solevado”, la estructura se une, formando un sólido.

El proceso de solevado, se realiza con una extensión del software de AutoCAD, conocido como Visual Lisp, el cual encuentra 2 polilíneas paralelas y ejecuta el comando, según los ajustes realizados.

```

(defun c:Solevado() (/ ss)
  ;;set loft-related system variables as desired.
  ;;consult Help to see what these do.
  (setvar "loftang1" 0)
  (setvar "loftang2" 0)
  (setvar "loftnag1" 0)
  (setvar "loftnag2" 0)
  (setvar "loftnormals" 0)
  (setvar "loftparam" 1)

  (prompt "Operacion de Solevado ")
  (setq ss (ssget))
  (command "._loft" ss "" ""))
)

```

Figura 46. Programa encargado del proceso de Solevado en Visual Lisp

Fuente: Autor

El dibujo de la estructura está conformado por varios triángulos en 3D, que conforman cada uno de los pisos, por lo que son unidos mediante el comando “Unión” el mismo que se realiza usando macros.

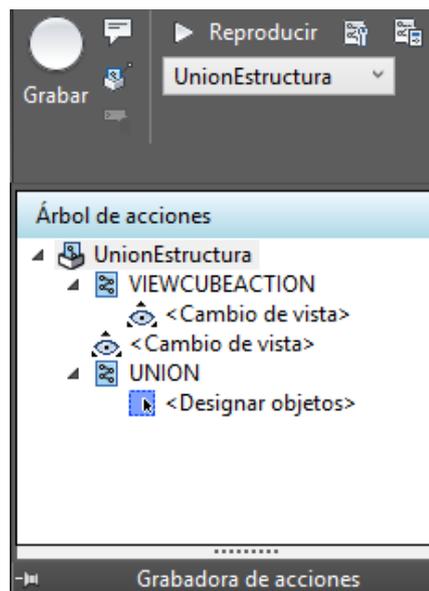


Figura 47. Acciones que representan el proceso que sigue el macro de “UnionEstructura”

Fuente: Autor

Al tener finalizado el dibujo de la estructura únicamente, se le asigna una capa, llamada “Estructura”, además se crean nuevas capas, a la primera se le llama “Cobre” y será usada en el dibujo de la cinta de

cobre que rodea la antena, la segunda capa es para el sustrato, que corresponde a la base de la antena, es decir una baquelita. Finalmente, para cada una de las capas se asignó diferentes colores para que se puedan diferenciar en el dibujo.



Figura 48. Diferentes capas creadas durante la ejecución del programa

Fuente: Autor

Dibujo de la cinta de cobre que rodea la estructura

Para realizar la gráfica de la línea conductora de cobre, que envuelve la estructura la antena, se tuvieron que considerar ecuaciones de la recta para poder asignarle un valor variable al ancho de dicha línea, dentro del programa. La ecuación de una recta en 3D, parte de aplicar la ecuación de la pendiente, considerando 2 puntos; (X_a, Y_a, Z_a) y (X_c, Y_c, Z_c) , que pertenecen a un punto final y un punto inicial del segmento.

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

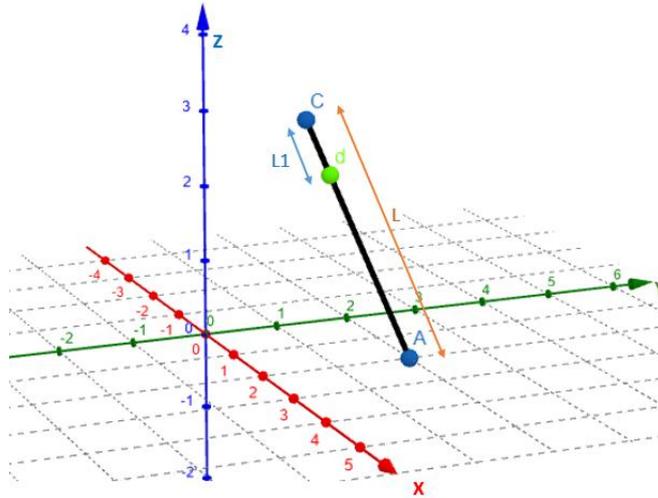


Figura 49. Representación gráfica de la cinta cobre sobre la estructura, considerando el lado del pentágono como L, y el ancho de la cinta de cobre como L1.

Fuente: Autor

Al ancho variable del grosor se le asigna un punto d, con una distancia L1

$$\frac{X - X_c}{X_a - X_c} = \frac{Y - Y_c}{Y_a - Y_c} = \frac{Z - Z_c}{Z_a - Z_c} \quad (33)$$

$$L = \sqrt{(X_a - X_c)^2 + (Y_a - Y_c)^2 + (Z_a - Z_c)^2} \quad (34)$$

$$L1 = \sqrt{(X_d - X_a)^2 + (Y_d - Y_a)^2 + (Z_d - Z_a)^2}$$

$$L - L1 = \sqrt{(X_d - X_c)^2 + (Y_d - Y_c)^2 + (Z_d - Z_c)^2}$$

En base a la ecuación (33) y con referencia a la Figura 49. Representación gráfica de la cinta cobre sobre la estructura, considerando el lado del pentágono como L, y el ancho de la cinta de cobre como L1. se puede sacar las siguientes igualdades:

$$\frac{Xd - Xc}{Xa - Xc} = \frac{Yd - Yc}{Ya - Yc} = \frac{Zd - Zc}{Za - Zc} = K \quad (35)$$

$$Xd - Xc = K(Xa - Xc)$$

$$Yd - Yc = K(Ya - Yc)$$

$$Zd - Zc = K(Za - Zc)$$

Entonces se tiene que:

$$L - L1 = \sqrt{K^2(Xa - Xc)^2 + K^2(Ya - Yc)^2 + K^2(Za - Zc)^2}$$

$$L - L1 = K\sqrt{(Xa - Xc)^2 + (Ya - Yc)^2 + (Za - Zc)^2} = KL \quad (36)$$

$$K = \frac{L - L1}{L} \quad (37)$$

Finalmente se despejan los valores de las coordenadas correspondientes a los puntos en donde se dibuja la cinta de cobre:

$$Xd = Xc + \frac{L - L1}{L}(Xa - Xc)$$

$$Yd = Yc + \frac{L - L1}{L}(Ya - Yc)$$

$$Zd = Zc + \frac{L - L1}{L}(Za - Zc)$$

Para poder aplicar esta ecuación al programa, se considera a L1 como el ancho de la cinta de cobre, L como la longitud de lado del pentágono, que sería de 35mm, mientras que las coordenadas corresponden con las coordenadas de los triángulos dibujados en la estructura.

Dentro del programa se utiliza un bucle For, para simplificar el código, de esta manera a medida que grafique un piso de la estructura, el paso siguiente será graficar la cinta de cobre que corresponde a ese piso. Se debe considerar que hay 3 diferentes tipos de “líneas”, las cuales serán dibujadas según sentencias de condición IF.

- Línea de subida (LS)
- Línea recta (LR)
- Línea de unión (LU)

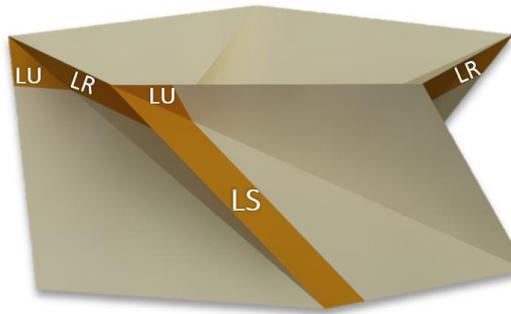


Figura 50. Un piso de la estructura con la cinta de cobre, en donde se diferencian los tipos de “líneas” que posee

Fuente: Autor

Una vez completado el dibujo, debe ser exportado en formato *.sat* para que el programa de simulación puede asignarle los parámetros correspondientes. La parte de la exportación se realizó mediante código, para hacerlo se siguen los siguientes pasos.

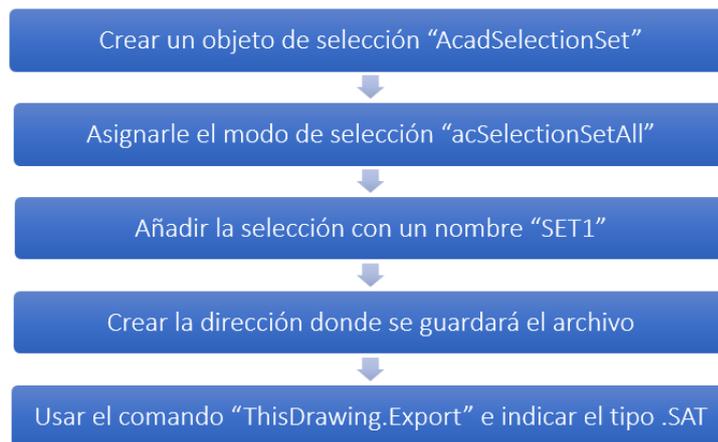


Figura 51. Pasos para la exportación de archivos .SAT.

Fuente: Autor

Una vez exportado el archivo, se guardará en la dirección establecida, con el formato SAT, de esa forma se puede crear una lista de archivos de ese tipo, con diferentes alturas de la antena.

El código que corresponde con todo el proceso de dibujo usando VBA, se muestra en el Apéndice D, Algoritmo 3: Automatización del dibujo de la antena.

2.4 SIMULACIÓN DE LA ANTENA

HFSS es un paquete de software que posibilita calcular el comportamiento electromagnético por elementos finitos de una estructura, este puede calcular: Cantidades básicas de campo electromagnético, Característica de impedancias, Parámetros (S) e impedancias de puerto específicas, primero requiere especificar las características del material para cada objeto de la estructura, seguido se necesita identificar los puertos en las superficies específicas, y por ultimo HFSS genera las soluciones de campo necesarias y las características de puerto asociadas además de los S-parámetros, por esta razón este software es muy utilizado en las telecomunicaciones para el diseño de antena.

El software facilita el desarrollo de la antena propuesta, al proporcionar los datos necesarios que caracterizan la misma. Primero se muestra una simulación de la antena dibujada empíricamente, esto quiere decir que todos los pasos realizados son asignados por el usuario, para llegar a obtener los resultados. Segundo se aplican un algoritmo para automatizar el proceso antes mencionado, optimizando el tiempo requerido en la preparación de la antena para la simulación, esto es necesario pues la antena posee múltiples estados que requieren ser simulados.

2.4.1 SIMULACIÓN DE LA ANTENA DIBUJADA EMPÍRICAMENTE

La simulación inicia con la **Importación del archivo**, seguido a esto se otorga **Propiedades de material** a los elementos generados por la importación. HFSS parte de la forma física de la antena y sus material, además requiere de algunos factores previos al análisis de la antena, entre estos tenemos primero la **Excitación** de la antena, en este caso se trabaja con **Lumped Ports** que calculan directamente los parámetros S, el segundo factor corresponde a los **Limites de Radiación**, este es empleado para Simular un problema abierto que permite que las ondas se irradian infinitamente hacia el espacio, absorbiendo la onda en el límite, por ultimo tenemos que generar una solución y, a este agregar un barrido de frecuencias (**Frequency Sweep**), cada uno de los parámetros resaltados se detallan a continuación:

Importación de archivo .SAT

El archivo .SAT generado desde AUTOCAD es importado al software HFSS, para esto se abre el menú MODELER de la barra de tareas del software y seleccionamos la opción importar, seguido seleccionamos el archivo deseado y presionamos abrir, esto se muestra en la Figura 52. Importación del archivo .SAT en HFSS.

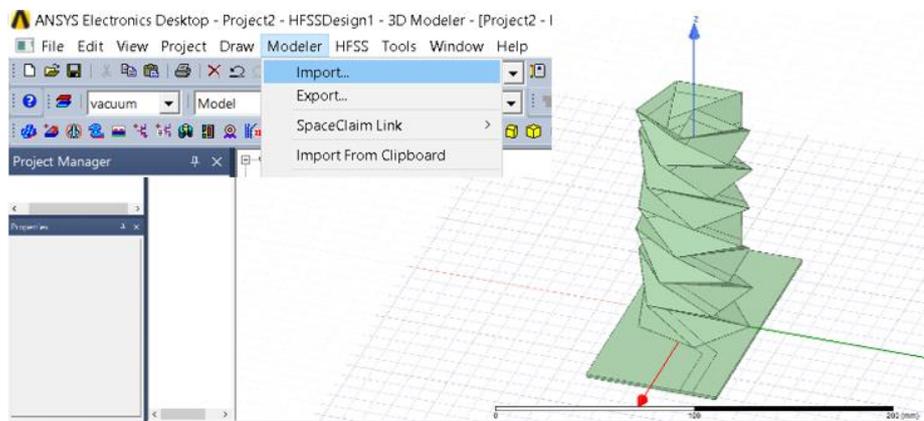


Figura 52. Importación del archivo .SAT en HFSS.

Fuente: Autor

Es necesario verificar la medidas el objeto importado, pues si no concuerda con las medidas establecidas del diseño, para este caso cada arista de la torre debe medir 35mm y se comprueba este valor en el software como se aprecia en la Figura 53. Comprobación de medidas del objeto., asegurando de esta manera que las demás partes que conforman las antenas estén correctas en sus tamaños.

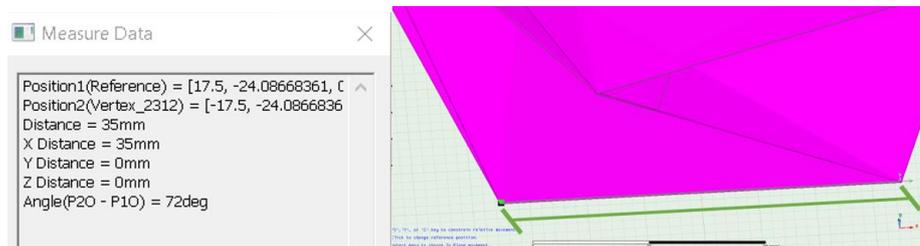


Figura 53. Comprobación de medidas del objeto.

Fuente: Autor

Asignación de propiedades de material a cada elemento de la antena

La antena propuesta está conformada por tres tipos de materiales. El primer material es cobre que se emplea en el plano a tierra y la línea de cobre, el segundo comprende al sustrato en este caso es papel kraft y por último se encuentra la baquelita o FR4. Por ende, a cada elemento de la antena deberá ser asignado uno de los materiales antes mencionados como corresponda.

El sustrato a utilizar es papel Kraft, pero el mismo no se encuentra dentro de las librerías de software, por esta razón se debe crear un nuevo material, para esto el software requiere de la permitividad dieléctrica del material que fue ya encontrada con el método de anillo resonante, estos parámetros se encuentran en la sección de 963.3.1. Para crear un nuevo material nos dirigimos al menú **MODELER** y seleccionamos **ASSIGN MATERIAL**, a continuación, elegimos **ADD MATERIAL** como se muestran la Figura 54.

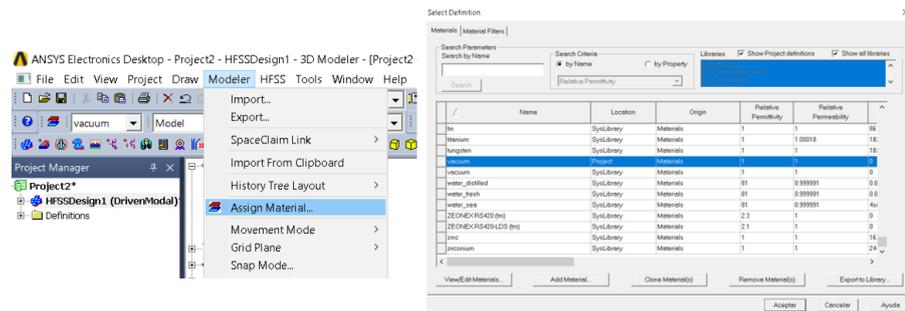


Figura 54. Crear nuevo material.

Fuente: Autor

En la ventana que se genera al seleccionar **ADD MATERIAL**, en esta ventana se colocan las propiedades del nuevo material, además de su nombre como se aprecia en la Figura 55.

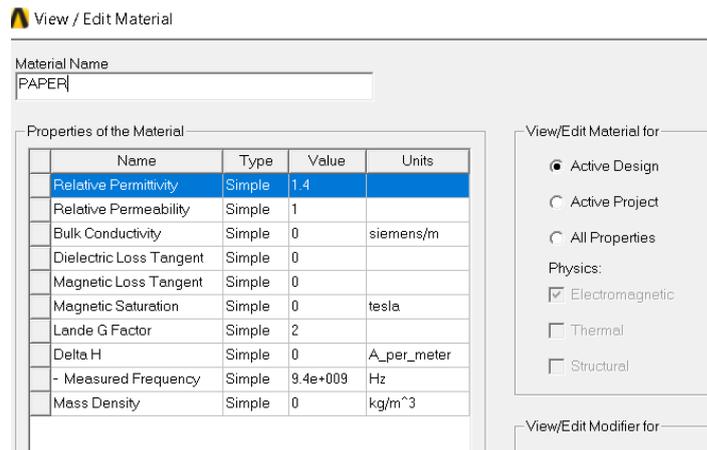


Figura 55. Asignar propiedades y nombre del material.

Fuente: Autor

La Figura 56 indica que el nuevo material se encuentra ya en la librería personal, es decir bastaría con importar este material a la librería del software para ser usada en cualquier archivo que se genere.

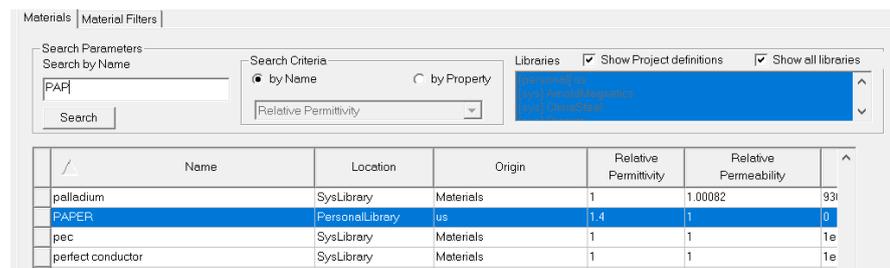


Figura 56. Papel kraft dentro de la librería de materiales de HFSS.

Fuente: Autor

Ahora la importación de la antena, genera cuatro objetos los cuales conforman toda la antena, a cada uno debemos asignar su correspondiente material, para esto primero seleccionamos el elemento deseado, segundo nos dirigimos al menú MODELER y seleccionamos ASSIGN MATERIAL, en esta ventana podremos buscar y seleccionar el material requerido por el elemento, en este caso seleccionamos el elemento de perteneciente a la línea de cobre por lo tanto el material dentro de la librería del software es cobre, esto se muestra en la Figura 57.

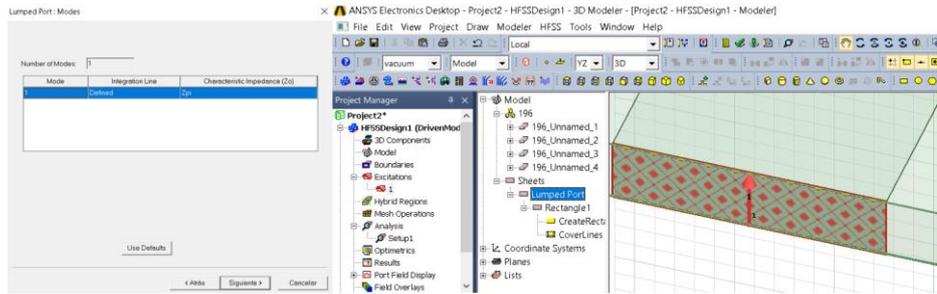


Figura 59. Excitación por Lumped Port.

Fuente: Autor

Límites de Radiación

El límite de radiación debe constituir una región cuadrada y convexa con respecto a la fuente de radiación, es decir la región debe encerrar a la antena con una separación u offset. HFSS dispone de una herramienta llamada **Crear Región** que facilita la contrucción, al seleccionar esta herramienta, tenemos una ventana en la cual se coloca el valor de porcentaje de offset con el que se requiere crear la región, esto se observa en la Figura 60.

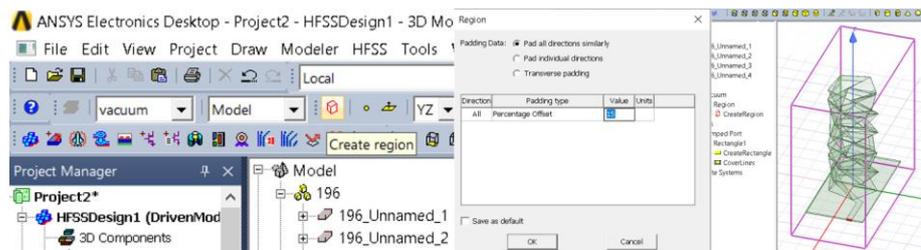


Figura 60. Creación de Región para límites de radiación.

Fuente: Autor

A la región creada se debe asignar como una condición de contorno, para esto seleccionamos la región y seguimos la dirección que se aprecia en la Figura 61. El resultado de esta región como condición se muestra en la Figura 62.

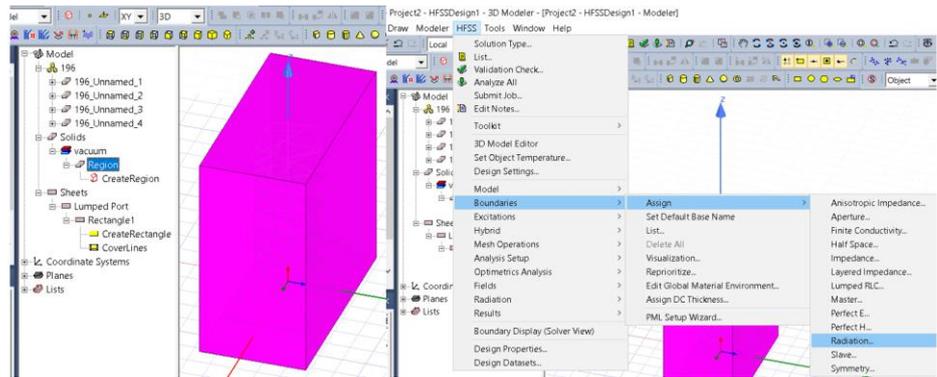


Figura 61. Dirección para establecer condiciones de contorno.

Fuente: Autor

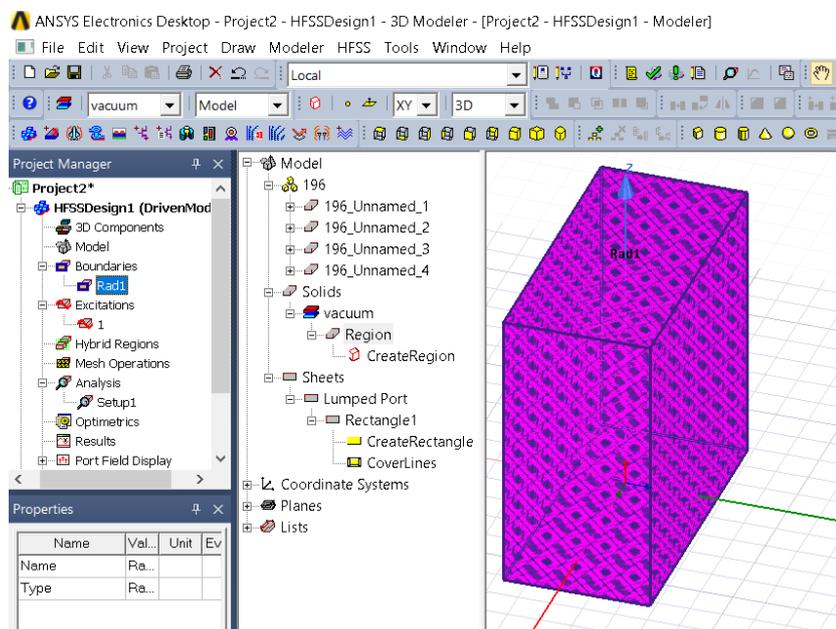


Figura 62. Representa un límite abierto mediante condición de contorno.

Fuente: Autor

Solución por barrido de frecuencias

Para generar los resultados es necesario configurar las soluciones, esto consta de crear un setup de soluciones en el cual se establece el rango de frecuencias, en las cuales requerimos el simulador analiza la respuesta de la antena, primero seleccionamos el icono **Add Solution Setup** dentro de la barra de herramientas del software, esto genera una ventana la cual muestra diversas opciones en la creación del setup, en

este caso solo damos en aceptar para crear, como se muestra en la Figura 63.



Figura 63. Asignación de una solución.

Fuente: Autor

Al setup de soluciones es necesario colocar un barrido de frecuencia, es decir indicar las frecuencias que requerimos sea analizada la antena, para esto seleccionamos el icono **Add Frequency Sweep** en la barra de herramientas del software, se genera una ventana en la cual asignamos la frecuencia inicial y la frecuencia final, además se establece el número de puntos de análisis que requieran ser analizados, esto se observa en la Figura 64.

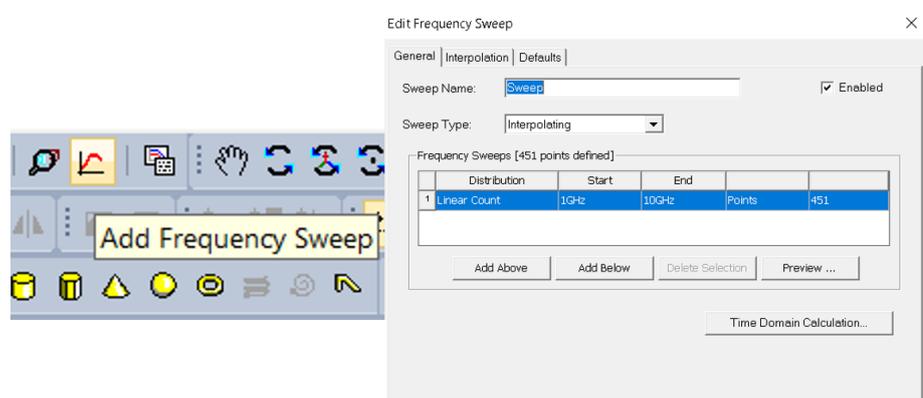


Figura 64. Asignación de barrido de frecuencia al setup de soluciones.

Fuente: Autor

Finalmente, con todos los parámetros ya listos, procedemos con la simulación seleccionando el icono **Analyze All**, como se muestra en la Figura 65. Análisis de la antena., en consecuencia, se debe esperar el

tiempo que requiera el software termine con la simulación, dando la repuesta o resultados de la antena para cada una de las frecuencias designadas en el rango.

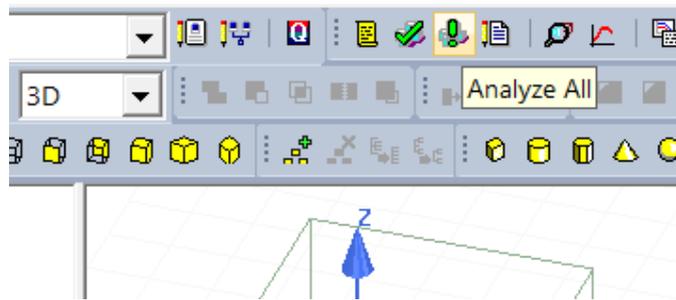


Figura 65. Análisis de la antena.

Fuente: Autor

Resultados de Simulación

Los resultados más importantes en cuanto a la simulación son el parámetro S_{11} y el patrón de radiación, por ser parte los parámetros que definen una antena, estos parámetros se encuentran en la opción de resultados dentro del diseño en la ventana de manejo de proyecto. A continuación, se detalla cómo obtener cada parámetro.

El parámetro S_{11} muestra las pérdidas de retorno de la onda reflejada en comparación a la onda incidente, es decir el S_{11} permite visualizar las frecuencias de resonancia de la antena como también sus pérdidas en decibelios, entonces este parámetro podemos obtener dando clic izquierdo y seleccionando **Create Fields Report**, seguido de **Rectangular Plot**, se genera una ventana en la cual escogemos en la categoría el parámetro S, en cantidad la opción $S(1,1)$ y por último en función seleccionamos dB, solo restaría con generar el reporte. Este proceso se aprecia en la Figura 66.

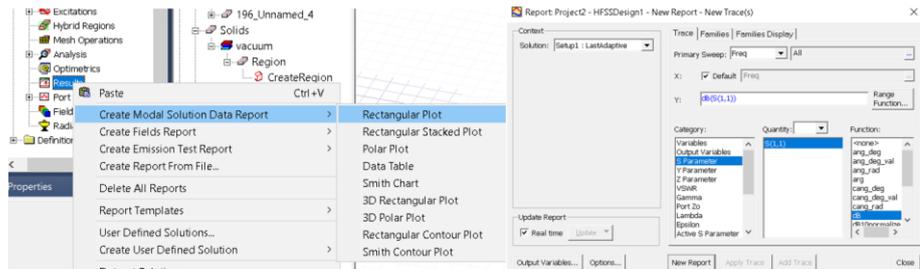


Figura 66. Generar Reporte del Parámetro S_{11} .

Fuente: Autor

El Patrón de Radiación que genera el software se encuentra en coordenada esféricas, por tal motivo es necesario generar un mallado de esfera que contenga el recorrido y el paso de los ángulos phi y theta, esta malla se establece en **Radiation**, damos clic izquierdo y escogemos **Inserte Far Field Setup**, seguido de **Infinite Sphere**, se abre una ventana para insertar el paso y alcance de cada Angulo antes mencionado y damos aceptar para generar el setup, esto se muestra mejor en la fig.

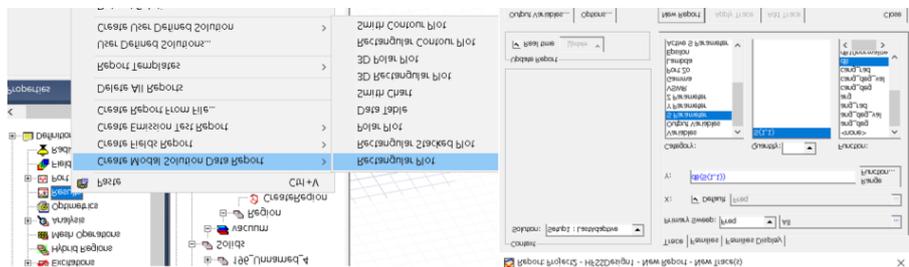


Figura 67. Generar Reporte del Parámetro S_{11} .

Fuente: Autor

El Patrón de Radiación que genera el software se encuentra en coordenada esféricas, por tal motivo es necesario generar un mallado de esfera que contenga el recorrido y el paso de los ángulos phi y theta, esta malla se establece en **Radiation**, damos clic izquierdo y escogemos **Inserte Far Field Setup**, seguido de **Infinite Sphere**, se abre una ventana para insertar el paso y alcance de cada Angulo antes mencionado y damos aceptar para generar el setup, esto se muestra mejor en la Figura 68.

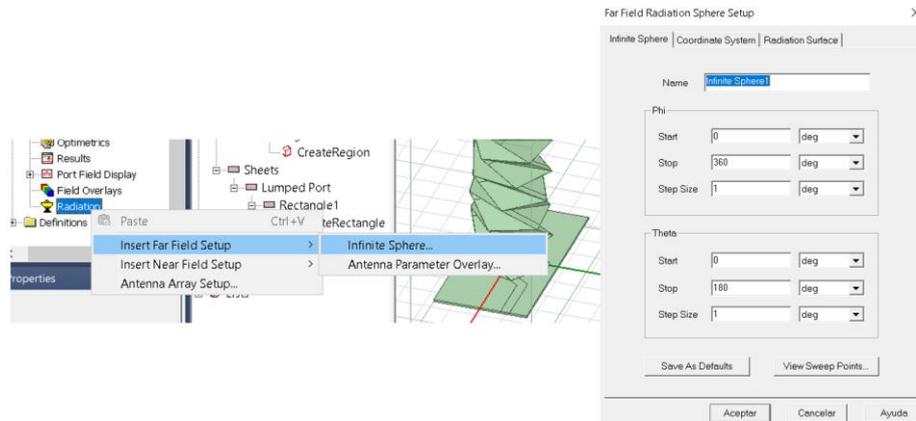


Figura 68. Insertar Esfera Infinita.

Fuente: Autor

El patrón de radiación se crea a partir de la esfera infinita y para generar el reporte del patrón de radiación en 3D seguimos la dirección como se muestra en la

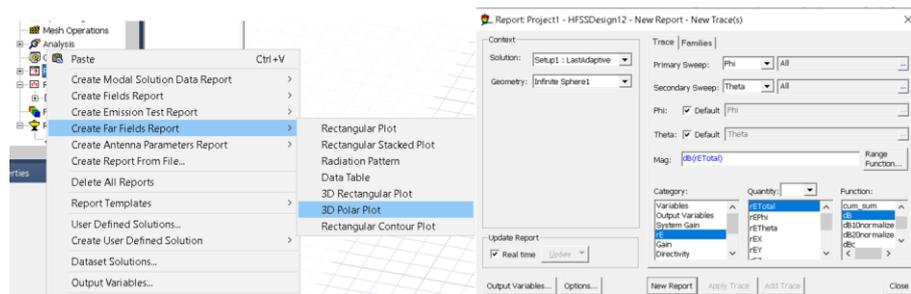


Figura 69. Generar Patrón de Radiación 3D.

Fuente: Autor

2.4.2 SIMULACIÓN AUTOMATIZADA DE LA ANTENA POR SCRIPT DE MICROSOFT VISUAL BASIC (VBS)

HFSS usa el lenguaje de Microsoft Visual Basic Scripting Edition (VBScript) para ejecutar una secuencia de comandos. VBScript es una forma rápida y eficaz de realizar tareas repetitivas, por lo tanto, es la mejor opción para minimizar el tiempo en la preparación de la antena para la simulación, pues la antena al comprender de múltiples estados a causa del cambio de su altura requiere análisis consecutivos.

El algoritmo empleado consiste en importar cada archivo que contiene una altura de la antena, existen varios archivos encontrados en una sola carpeta, seguido a cada elemento generado por la importación se le asigna sus materiales como también atributos de color y transparencia, luego realizar los factores requeridos para la simulación como son la excitación de la antena por lumped port , el límite de radiación y después tenemos que generar una solución con el barrido de frecuencias, finalmente tenemos la obtención de los reportes con los resultados de las simulaciones, además de que cada archivo sea guardado en una carpeta diferente.

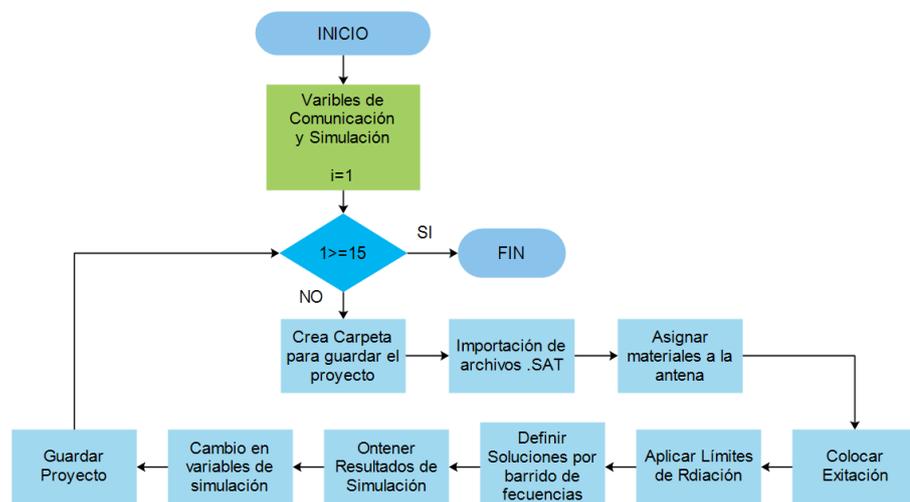


Figura 70. Algoritmo para automatizar la simulación.

Fuente: Autor

El código planteado inicia con la declaración de variables las cuales permiten la comunicación con HFSS desde el Scrip, es decir las variables dan acceso a cada una de las opciones que dispone el software, como se muestran la Figura 71. Segundo se crean carpetas dándoles el nombre de una altura de la antena que se va a simular con una ruta específica como se observa en la Figura 72, seguido se inicializa el software y crea un nuevo proyecto como se aprecia en la Figura 73,

hasta este paso corresponde a factores externos a los requisitos de simulación.

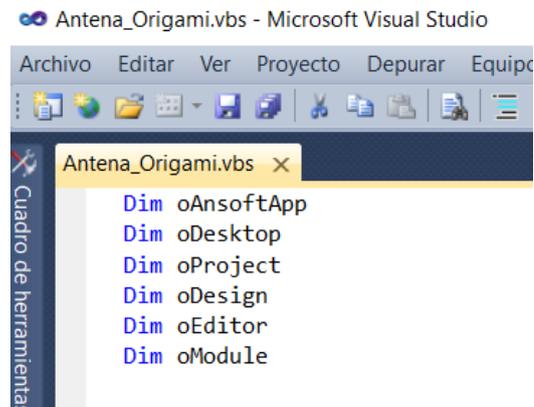


Figura 71. Variables de Comunicación.

Fuente: Autor

```
ruta="C:\Users\i7 MAX\Desktop\wa\188"
var4=ruta

set fso=createobject("scripting.filesystemobject")
fso.createfolder(var4)
```

Figura 72. Creación de carpeta en la ruta específica dada por var4.

Fuente: Autor

```
Set oProject = oDesktop.GetActiveProject()
Set oProject = oDesktop.NewProject
Set oDesign = oProject.InsertDesign("HFSS", "HFSSDesign12", _
"DrivenModal", "")
```

Figura 73. Inicialización de HFSS y creación de un nuevo proyecto.

Fuente: Autor

A continuación, se detallará la sección del código empleado para cada uno de los factores previos a la simulación como también la generación de los reportes con los resultados de la simulación, finalizando con el guardado de proyecto en su carpeta respectiva.

Importación de la librería personal de materiales

En la sección 2.4.1 en la asignación de propiedades de materia a cada elemento de la antena se creó el material de papel kraft, por esta razón solo se debe importar la librería personal a cada proyecto, para esto se inicia activando el proyecto con la extensión **SetActiveProject(“Project_Name”)**, seguido se asigna la importación a la librería de HFSS desde el administrados del proyecto como se muestra en la Figura 74.

```
Set oProject = oDesktop.SetActiveProject("Project2")
Set oDefinitionManager = oProject.GetDefinitionManager()
oDefinitionManager.ModifyLibraries "HFSSDesign12", Array("NAME:Personallib", "Materials:=", Array( _
"us"), Array("NAME:UserLib"), Array("NAME:SystemLib")
```

Figura 74. Importación de librería personal de materiales.

Fuente: Autor

Importación de los archivos SAT

Para la importación de los archivos primero debemos activar el Diseño y el editor de modelo 3D de HFSS con las extensiones **SetActiveDesign(“HFSSDesign”)** y **SetActiveEditor(“3D Modeler”)**, seguido se guarda en la variable *var2* la ruta de la carpeta donde se encuentran los archivos, finalmente se asigna a la variable **oEditor** la propiedad de importación con los diferentes parámetros de importación y con mayor énfasis en la variable que contiene la ruta como se observa en la Figura 75.

```
numero= "C:\Users\i7 MAX\Desktop\wa\188.sat"
var2=numero

Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("HFSSDesign12")
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")

oEditor.Import Array("NAME:NativeBodyParameters", "HealOption:=", 2, "CheckModel:=", _
false, "Options:=", "-1", "FileType:=", "UnRecognized", "MaxStitchTol:=", -1, "ImportFreeSurfaces:=", _
false, "SourceFile:=", var2)
```

Figura 75. Importación de archivos .SAT desde una dirección específica.

Fuente: Autor

Asignación de propiedades de material a cada elemento de la antena

Las propiedades de los materiales son asignados en el diseño y en el modelo 3D, por esta razón se debe activar sus respectivas extensiones como se mencionó anteriormente. La importación del archivo .SAT coloca a cada elemento que conforma la antena un nombre con el siguiente formato "nombre del archivo_Unnamed_ numero de elemento", un ejemplo se puede ver en la Figura 57, además para realizar cambios a cada uno de los elementos debemos asignar a la variable **oEditor** la extensión **ChangeProperty**, para realizar el cambio en la propiedades del elemento debemos tener en una variable el nombre de cada uno, estas variables serán *solido1*, la cual contiene a GND o plano a tierra y su material debe ser cobre, en la variable *solido2* posee la baquelita deberá poseer el material de FR4, para el *solido3* corresponde a la línea de cobre que evidentemente debe tener como material cobre, por ultimo tenemos el *solido4* el cual contiene al sustrato, es decir la estructura de la antena y debe comprender al material papel kraft insertado en HFSS, esto se aprecia de una mejor manera en Apéndice B. Figura B.1. También se realizan cambios en cuanto a color y transparencia de los materiales utilizados, esto para una mejor presentación visual de la antena, el resultado final se muestra en la Figura 76.

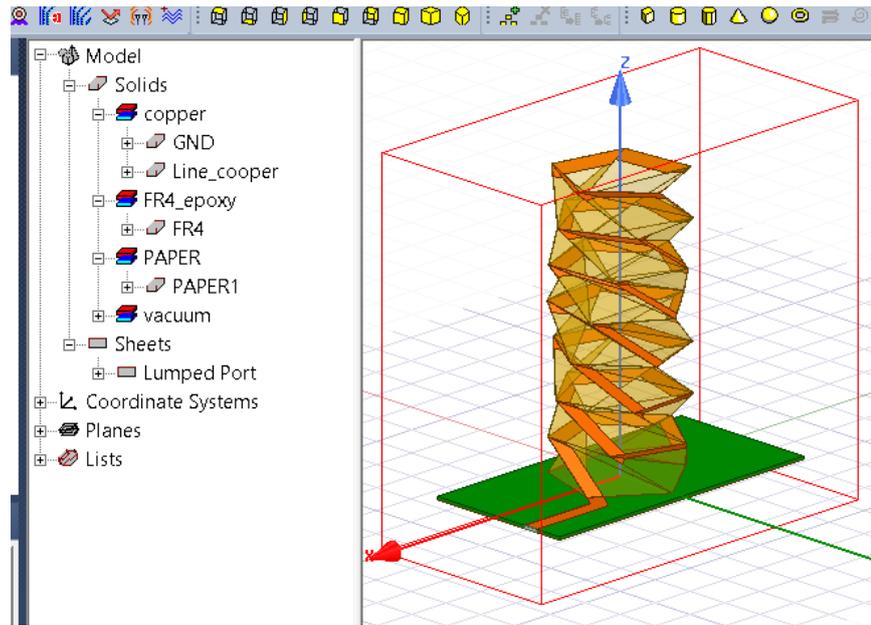


Figura 76. Resultado de asignar materiales y el cambio en las propiedades de la antena.

Fuente: Autor

Excitación por Lumped Port

Primero se crea una superficie que une el plano a tierra con la línea de cobre, para esto debemos activar el Diseño y el editor de modelo 3D de HFSS como presentamos anteriormente, además asignar a la variable **oEditor** la extensión **CreateRectangulo**, que genera una superficie rectangular con las medidas requeridas y a las coordenadas dadas, este objeto se crea con el nombre específico “*Rectangle1*”. Como Lumped Port se encuentra dentro de módulo **BoundarySetup**, por lo tanto, el mismo deberá activarse, seguido se otorga a “*Rectangle1*” como Lumped Port con la extensión **AssignLumpedPort** en la variable **oModule**, esto se observa de una mejor manera en el Apéndice B. Figura B.2.

Límites de Radiación

Para establecer el límite de radiación debe constituir una región cuadrada y convexa con respecto a la fuente de radiación, para realizar eso desde script, activaremos el Diseño y el editor de modelo 3D de HFSS como se presentó anteriormente, seguido se asigna la propiedad **CreateRegion** a la variable **oEditor** y en los atributos se debe especificar el offset para cada eje, es decir la separación que existirá entre la antena y la región, una vez creada la región el software la nombra como “*Region*”, el siguiente paso es asignarla a esta como límite de radiación, el mismo que se encuentra en el módulo **BoundarySetup**, en la variable **oModule** con la extensión **AssignRadiation** permite colocar dentro de sus atributos a “*Region*” para asignarla como límite de radiación, todo este proceso se muestra en el Apéndice B. Figura B.3.

Solución por barrido de frecuencias

Las soluciones constan de crear un setup de soluciones en el cual se establece el rango de frecuencias, en las cuales requerimos el simulador analiza la respuesta de la antena, para esto primero activaremos el Diseño y el editor de modelo 3D de HFSS como se presentó anteriormente, el módulo **AnalysisSetup** permite crear un setup con el nombre “*Sweep*” aplicando la extensión **InserSetup** a la variable **oModule**. Con el setup creado el siguiente paso es colocar el barrido de frecuencia con la extensión **InsertFrequencySweep** a la variable **oModule**, en los atributos de la extensión deberá ir el nombre, la frecuencia inicial y final conjuntamente con el número de puntos que se requiera entre esas frecuencias, esto se observa en el Apéndice B. Figura B.4.

Finalmente, con todos los parámetros ya listos, procedemos con la simulación desde el script esto requiere de la extensión **AnalyzeAll** a la variable **oDesign** como se muestra en el Apéndice B. Figura B.4, a consecuencia de esta acción se debe esperar el tiempo que requiera el

software termine con la simulación, dando la respuesta o resultados de la antena para cada una de las frecuencias designadas en el rango.

Resultados de Simulación

El parámetro S_{11} y el patrón de radiación son resultados más importantes en cuanto a la simulación, A continuación, se detalla cómo obtener cada parámetro desde script.

Para obtener los reportes debemos establecer el módulo **ReportSetup**, seguido en la variable **oModule** aplicamos la extensión **CreateReport** y dentro de sus parámetros el reporte en este caso es *“S Parameter Plot 1”*; además de asignar las variables para la componente **x** *“Freq”* y para la componente **y** *“dB(S(1,1))”*; esto se muestra en la Figura 77.

```
Set oModule = oDesign.GetModule("ReportSetup")
oModule.CreateReport "S Parameter Plot 1", "Modal Solution Data", _
"Rectangular Plot", "Setup1 : Sweep", Array("Domain:=", "Sweep"), Array("Freq:=", Array(_
"All")), Array("X Component:=", "Freq", "Y Component:=", Array("dB(S(1,1))")), Array()
```

Figura 77. Reporte para el parámetro S_{11} por Script.

Fuente: Autor

El siguiente parámetro requerido es patrón de radiación, pero obtener este parámetro primero debemos generar un mallado de esfera, este se encuentra en el módulo *“RadField”*; con la extensión **InsertFarFieldSphereSetup** y en sus parámetros debe constar el nombre *“Infinite Sphere1”*; el recorrido y el paso de los ángulos phi y theta, esto se aprecia en la Figura 78.

```
Set oModule = oDesign.GetModule("RadField")
oModule.InsertFarFieldSphereSetup Array("NAME:Infinite Sphere1", "UseCustomRadiationSurface:=", _
false, "ThetaStart:=", "0deg", "ThetaStop:=", "180deg", "ThetaStep:=", "1deg", "PhiStart:=", _
"0deg", "PhiStop:=", "360deg", "PhiStep:=", "1deg", "UseLocalCS:=", false)
```

Figura 78. Creación de esfera infinita por Script.

Fuente: Autor

El patrón de radiación se obtiene a partir de la esfera infinita creada anteriormente y para generar el reporte del patrón de radiación en 3D nos dirigimos al módulo **ReportSetup**, seguido en la variable **oModule** aplicamos la extensión **CreateReportT** y dentro de sus parámetros el primero debe ir el reporte que necesitamos en este caso *Re Plot 1* segundo debe ir la ruta *Far Fields* que indica donde se encuentra el reporte, adema se especifica que es grafico en *3D Polar Plot*, por último se indica el mallado a utilizar que es *Infinite Sphere1*, todo lo mencionado se observa en la Figura 79.

```
oModule.CreateReport "rE Plot 1", "Far Fields", "3D Polar Plot", _
"Setup1 : LastAdaptive", Array("Context:=", "Infinite Sphere1"), Array("Phi:=", Array( _
"All"), "Theta:=", Array("All"), "Freq:=", Array("6GHz")), Array("Phi Component:=", _
"Phi", "Theta Component:=", "Theta", "Mag Component:=", Array("dB(rETotal))), Array()
```

Figura 79. Reporte del patrón de radiación por Script.

Fuente: Autor

Guardado del Proyecto

Para finalizar con las simulaciones es necesario guarda cada proyecto en su respectivo nombre y carpeta, para esta acción colocamos en una variable en este caso es *var3* la ruta donde se encuentra la carpeta respectiva para cada simulación, para guardar el proyecto nos dirigimos con la extensión **SaveAS**, con el atributo de *var3* a la variable **oProject** y cerramos el proyecto, esto se muestra en la Figura 80.

```
Set oProject = oDesktop.SetActiveProject("Project2")
oProject.SaveAs var3, true
oProject.Close
```

Figura 80. Guardar el Proyecto desde Script.

Fuente: Autor

Fin del Script

El algoritmo se encuentra dentro de un bucle For, el cual permite repetir todo el proceso antes visto que requiere la simulación, además las variables "var2"; "var3"; "var4"; "solido1"; "solido2"; "solido3"; "solido4"; deben ir cambiando para cada simulación, dado que los archivos con los sólidos que conforman la antena tienen diferente nombre y también su simulación debe ser guardada en una carpeta con su respectivo nombre que está dado por la altura, para realizar todas estas acciones utilizando comandos de Script, estos permiten cambios en las variables mencionadas, ajustando las rutas de importación y grabado, además a los nombres de los sólidos que son importados y difieren de cada archivo, este último paso dentro del algoritmo se observa de una mejor manera en la Figura 81.

```
a=a+1
b=b+8
var2=Replace(numero, "188", b)
var3=Replace(guarda, "188", b)
var4=Replace(ruta, "188", b)

solido1=Replace(solido1, (b-8)&"_", b&"_")
solido2=Replace(solido2, (b-8)&"_", b&"_")
solido3=Replace(solido3, (b-8)&"_", b&"_")
solido4=Replace(solido4, (b-8)&"_", b&"_")
```

Figura 81. Variables de rutas y Cambio de Nombres.

Fuente: Autor

CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo de Implementación y Análisis de Resultados, consiste en la implementación del modelo simulado y realización de pruebas de medición para comparar el modelo teórico y sus simulaciones con el elemento implementado, se describe la construcción del anillo resonante, la construcción de la antena en conjunto con su mecanismo y la realización de pruebas para analizar los parámetros que definan el comportamiento de la antena acorde a las necesidades de diseño. Finalmente se muestran todos los resultados obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio realizadas.

3.1 CONSTRUCCIÓN

3.1.1 ANILLO RESONANTE

La construcción del anillo se realiza con papel Kraft para el sustrato y la lámina de cobre como el conductor para el anillo resonador. Los valores de los parámetros requeridos para el resonador son plasmados en CAD (Computer Aided Design). Primero se realiza una circunferencia con el radio medio (r). Segundo, se elaboran dos circunferencias concéntricas a la primera. Estas circunferencias tendrán un radio igual al radio medio menos la mitad del ancho del conductor

$(r - W/2)$ y radio medio más la mitad del ancho del conductor $(r + W/2)$. Seguido, los alimentadores del resonador son rectángulos, con una separación de brecha de borde (Δ) de la circunferencia mayor. Cada alimentador posee una longitud (L) y un ancho (W) que es el mismo ancho del conductor. En la siguiente figura se presenta el dibujo realizado con las medidas exactas para el correcto funcionamiento del resonador.

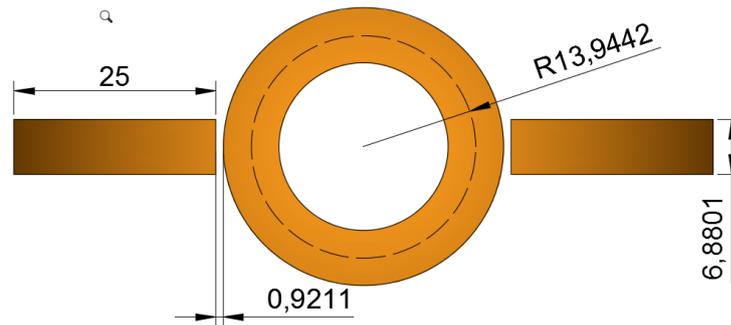


Figura 82. Anillo resonador dibujado en AutoCAD.

Fuente: Autor

El siguiente paso a seguir en la construcción es el cortado de la cinta de cobre. La cinta de cobre es cortada con la plantilla o dibujo antes realizado del resonador por una maquina plotter de corte. Esta máquina posee una precisión de 0.01 mm/paso permitiendo obtener un corte exacto para las dimensiones del anillo.

La siguiente figura muestra los anillos, alimentadores y plano a tierra realizados en la lámina de cobre con el plotter de corte.

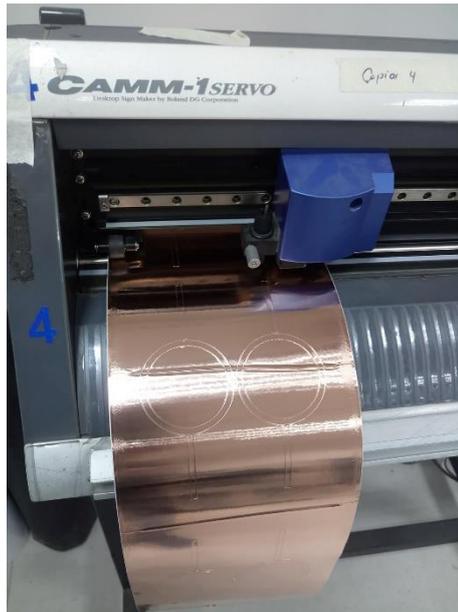


Figura 83. Corte con plotter de los elementos del anillo resonador.

Fuente: Autor.

Por ultimo tenemos el pegado de los elementos en cobre, como son los alimentadores y el anillo resonador sobre el papel Kraft. Este proceso se facilita ya que la cinta de cobre es autoadhesiva. Además, se sueldan los conectores SMA en cada extremo de los alimentadores.

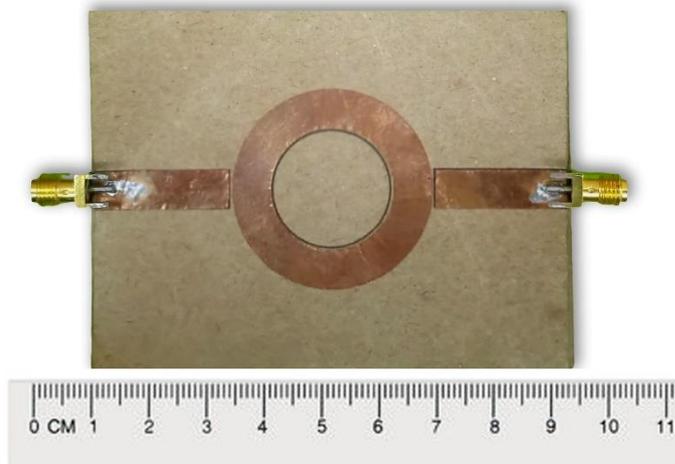


Figura 84. Anillo resonador en papel Kraft.

Fuente: Autor

3.1.2 DISEÑO DEL MECANISMO DE LA ANTENA

El diseño de antena origami propuesto cambia sus parámetros según a la altura de la estructura, por tal motivo se diseñó e implementó un mecanismo encargado de modificar su altura. Este mecanismo se basa en un sistema Husillo-Tuerca, mientras la tuerca se mantiene fija en la tapa superior de la estructura, el husillo gira mediante un motor, haciendo que la tuerca avance a lo largo del husillo al igual que la estructura, logrando así controlar la altura de esta. Este sistema está compuesto por 3 partes principales, tal como se muestra en la Figura 85, en los párrafos posteriores se describe cada elemento del sistema.

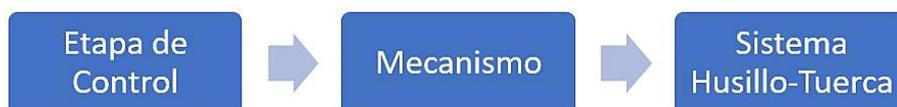


Figura 85. Diagrama de bloques del mecanismo de la antena.

Fuente: Autor

Etapa de Control

Para poder tener un control de la altura de la antena, se utilizó una placa Arduino UNO, el valor de la altura deseado puede ser modificado mediante el monitor serial, utilizando un computador. El programa tiene como variable de ingreso la altura, la misma que se puede modificar tiene una precisión en milímetros, la placa envía las señales requeridas por el driver para controlar el motor y obtener la altura requerida.

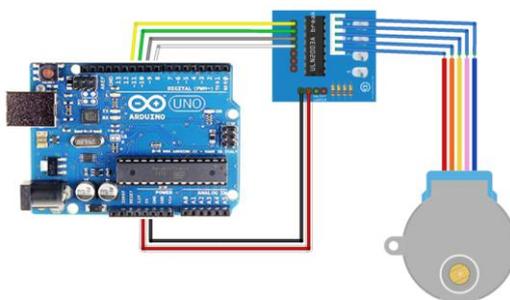


Figura 86. Conexión entre la etapa de control y el motor.

Fuente: Autor

Mecanismo

El mecanismo se usa para transmitir la rotación del motor hacia el eje del husillo, para ello utilizando un juego de engranes con una relación aproximada de 1 a 3.33333. Estos engranajes son usados con el fin de aumentar la velocidad de avance de la tuerca, para los engranajes se realizó los cálculos correspondientes de cada uno de sus parámetros, los cuales se muestran en la Tabla 3. El engranaje más grande se acopla directamente al rotor del motor a pasos, mientras que el otro se acopla a la base del husillo.

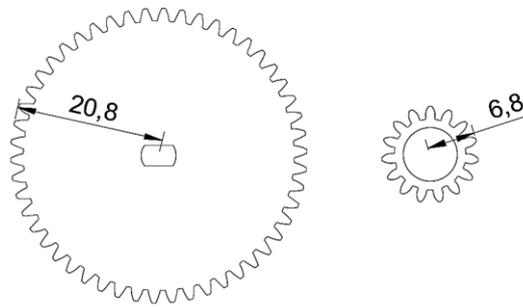


Figura 87. Diseño de los engranajes realizados en CAD.

Fuente: Autor

Tabla 3. Parámetros de Diseño de los Engranajes.

| Parámetro | Piñón (mm) | Engrane (mm) | |
|-----------|--------------------|--------------|------------|
| DE | Diámetro Exterior | 41,6 | 13,6 |
| DP | Diámetro Primitivo | 40 | 12 |
| W | Hueco del Diente | 1,31946891 | 1,31946891 |
| S | Espesor del Diente | 1,19380521 | 1,19380521 |
| r | Radio del Entalle | 0,20943951 | 0,20943951 |
| a | Addendun_Cabeza | 0,8 | 0,8 |
| b | Dendedum_Pie | 1 | 1 |
| Z | Numero Dientes | 50 | 15 |
| M | Modulo | 0,8 | 0,8 |
| Pc | Paso Circular | 2,51327412 | 2,51327412 |
| | Angulo de Presión | 20° | 20° |
| | Angulo de engrane | 7,2 | 24 |

El motor a pasos empleado para este proyecto es el 28BYJ-48, cuyas características se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del motor a pasos.

| Motor A Pasos Unipolar 28BYJ-48 | |
|--|----------|
| Voltaje | 5 V |
| Fases | 4 |
| Frecuencia | 100 Hz |
| Angulo de Paso | 5, 625° |
| # Pasos en 360° | 64 |
| Relación Velocidad | 1/64 |
| Velocidad Máxima | 15 r.p.m |

$$V_{max \text{ Rotor}} = 15 \text{ r.p.m}$$

$$V_{max \text{ Final}} = (15)(3.33333) = 50 \text{ r.p.m}$$

En base a los datos tanto del motor como de la relación de los engranajes se tendrá finalmente una velocidad final en el eje del husillo de **50 r.p.m.**

El mecanismo como tal queda conformado principalmente por el motor a pasos y por el juego de engranajes que están acoplados sobre una pieza de PLA impresa en 3D, este conjunto a su vez se acopla en una caja de madera que contiene todo el mecanismo encargado de controlar la altura de la antena.

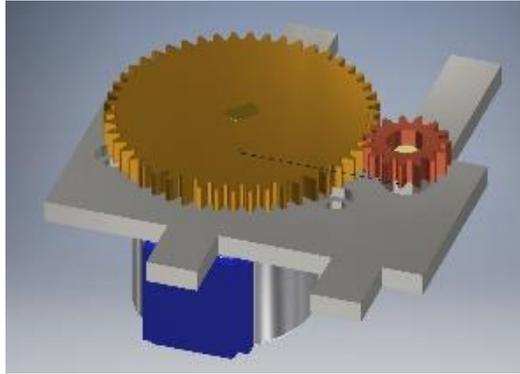


Figura 88. Modelo 3D del mecanismo.

Fuente: Autor

Sistema Husillo-Tuerca

Este sistema nos permite generar un movimiento vertical a partir de la rotación de un eje roscado (Husillo), sobre el cual se predispone una tuerca. El husillo y la tuerca, fueron realizados con un torno, utilizando como materia prima el grilon, el cual es un material flexible y resistente.

Cabe destacar que el husillo solo es de una entrada, y que su paso de rosca es de 5mm. Las medidas de estas piezas se muestran en la Figura 89. Diseño del sistema Husillo-Tuerca.

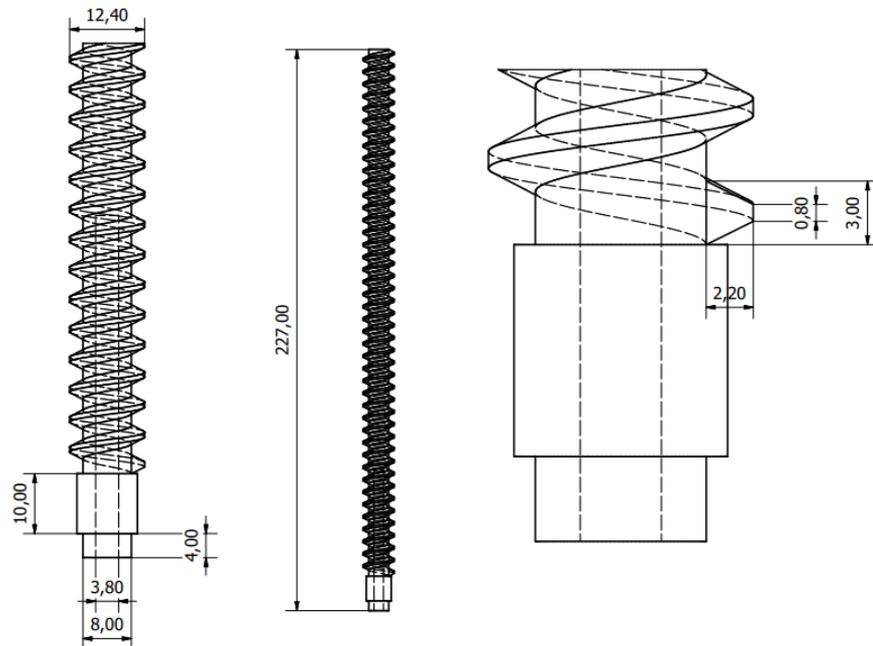


Figura 89. Diseño del sistema Husillo-Tuerca.

Fuente: Autor

Considerando los valores de construcción del husillo y de los engranes, se puede calcular la velocidad de avance de la torre, que se muestra a continuación:

$$\textit{Avance de Husillo} = \# \textit{ Entradas} * \textit{Paso}$$

$$\textit{Avance} = 1 * 5 = 5\textit{mm} \times \textit{Revolucion}$$

Con estos datos se puede calcular la velocidad de avance del Husillo y, por ende, de la torre:

$$\textit{Velocidad Vertical} = \textit{Avance} * \textit{Vmax}$$

$$\textit{Velocidad Vertical} = 5 * 50 = 250 \frac{\textit{mm}}{\textit{min}}$$

Es decir que para que la antena pueda llegar a extenderse por completo desde su estado retraído, tardara alrededor de 49.2 segundos, considerando un recorrido de 205mm.

$$\textit{Tiempo} = \frac{\textit{Recorrido}}{\textit{Velocidad}} = \left(\frac{205\textit{mm}}{250 \left(\frac{\textit{mm}}{\textit{min}} \right)} \right)$$

$$\textit{Tiempo} = 0.82 \textit{ min} = 49.2\textit{s}$$

Todo este sistema se acomoda sobre una caja de MDF (3mm), la misma se puede armar y desarmar gracias a muescas que tiene en los bordes de sus caras, las medidas se muestran en el Apéndice A. La tapa superior servirá de soporte para acoplar el plano de tierra de la antena, las dimensiones de la caja y la disposición de cada uno de los componentes se muestran en la Figura 90 y Figura 91.

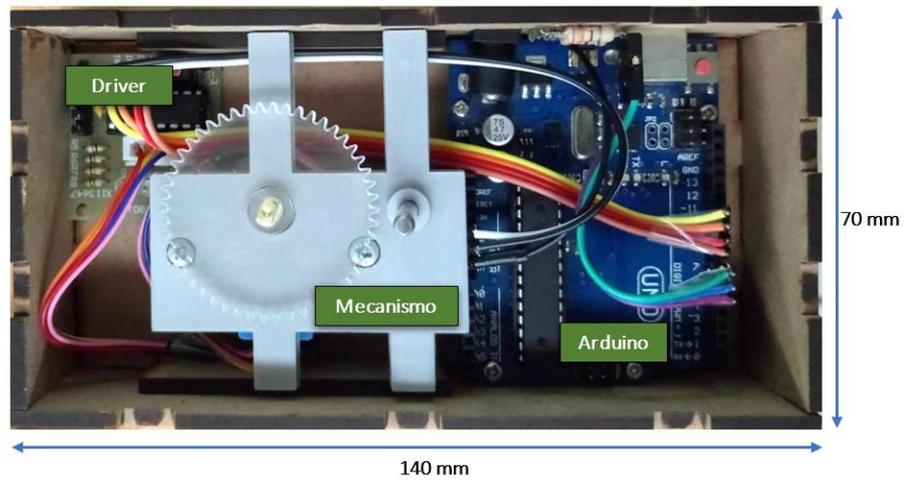


Figura 90. Disposición de los componentes del mecanismo de la antena, en la caja de MDF.

Fuente: Autor



Figura 91. Antena origami acoplada al mecanismo.

Fuente: Autor

3.2 APROXIMACIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN POR TEORÍA DE ARREGLO DE ANTENAS

3.2.1 FACTOR DE ARREGLO

El campo total de un arreglo de antenas de elementos idénticos se determina por el producto vectorial del Factor de Arreglo y el campo radiado por un solo elemento. Entonces, el factor de arreglo es el diagrama que representa la agrupación de elementos idénticos según su distribución geométrica y desfase entre elementos, es decir, que representa la adición vectorial de los campos radiados por los elementos individuales. Una ventaja del factor de arreglo es que se mantiene constante, aunque se cambie el elemento, siendo el nuevo campo de radiación el producto del factor de arreglo por el campo radiado del nuevo elemento.

La antena origami diseñada, está compuesta por siete pisos y en cada uno se encuentra el patrón de la línea de cobre que se muestra en la siguiente figura.

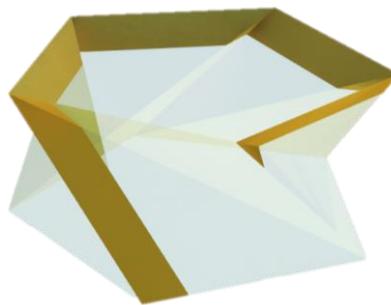


Figura 92. Patrón de la línea de cobre para cada piso de la antena.

Fuente: Autor

Se puede considerar como un elemento al patrón de la línea de cobre que se encuentra en cada piso, recalando que cada elemento se encuentra desfasado del anterior. Entonces se puede considerar a la antena como una matriz de elementos. Por ende, se permite aproximar el patrón de radiación para el número de pisos de la antena, partiendo de un solo piso y multiplicando por el factor de arreglo. El factor de arreglo en el presente diseño se define por:

$$F.A. = \frac{1}{N} \left(\frac{\text{Sen} \left(\frac{N}{2} * \psi \right)}{\text{Sen} \left(\frac{1}{2} * \psi \right)} \right) \quad (38)$$

$$\psi = k * d * \text{Cos}(\theta) + \beta \quad (39)$$

$$\text{Donde} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad y \quad \lambda = \frac{c}{fc} \quad (40)$$

$$\text{Entonces} \quad k = \frac{2\pi * fc}{c}$$

$$\psi = \frac{2\pi * fc}{c} * d * \text{Cos}(\theta) + \beta$$

Para las ecuaciones antes escritas (N) es el número de elementos que conforman el arreglo, (d) es la distancia de separación entre cada elemento y por último (β) es el ángulo de desfase que existe en la corriente entre dos elementos consecutivos.

El ángulo de desfase se obtiene en base al tiempo que demora en recorrer la corriente entre dos elementos consecutivos y la frecuencia que se encuentra la antena. Por esta razón, se calcula primero la longitud total del elemento y la velocidad de propagación en el cobre, para estimar el tiempo que tarde en recorrer dicha longitud, el cual se utilizó para calcular el desfase.

La longitud del elemento consta de cuatro lados iguales que recorren el contorno del pentágono de la antena formando un anillo,

más la diagonal que une cada elemento de los pisos, además se considera una distancia que existe entre el final del anillo y la diagonal de unión, como se muestra a continuación:

$$l = lado * 4 + diagonal + union \quad (41)$$

$$l = 35mm * 4 + 35mm + 6.2068mm = \mathbf{181.2 mm}$$

La permeabilidad dieléctrica y permitividad dieléctrica del cobre son $\mu_r = 0,999991$ y $\epsilon_r = 1$ que son base para el cálculo de la velocidad de propagación en ese medio.

$$Vp = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (42)$$

$$Vp = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{(0.999991)(1)}}$$

$$\mathbf{Vp \approx 3 \times 10^8}$$

Obtenida la velocidad de propagación en la línea de cobre, se calcula el tiempo (t) que un ciclo de corriente tarda en recorrer un elemento de la antena y se define como:

$$Vp = \frac{Espacio}{tiempo} \quad (43)$$

$$t = \frac{l}{Vp} = \frac{\left(\frac{140}{1000}\right)}{3 \times 10^8} = \mathbf{6.0402 \times 10^{-10} [Sg.]}$$

Para completar las variables que se encuentran en la ecuación del factor de arreglo, se requiere del ángulo de desfase (β), sabiendo que periodo de una onda sinusoidal es igual a $2\pi \text{ rad}$, se relaciona el periodo $T = 2\pi \text{ rad}$ con el tiempo que tarda la onda en recorrer un elemento para obtener su equivalente en radianes, como se muestra a continuación:

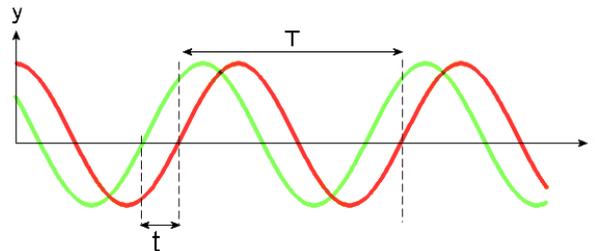


Figura 93. Tiempo de retraso entre elementos de la antena.

Fuente: Autor

$$\beta = \frac{t * 2\pi}{T} \quad (44)$$

Donde $T = \frac{1}{F_c}$

$$\beta = t * 2\pi * F_c = 6.0402 \times 10^{-10} * 2\pi * 6 \times 10^9$$

$$\beta = 22.77 \text{ Rad} = 1304.7 \text{ Grados}$$

Evaluando su equivalente dentro de un período resulta:

$$\beta = 3.9214 \text{ Rad} = 224.6833 \text{ Grados}$$

El software utilizado para la simulación de un elemento de la antena origami. Este permite obtener un patrón de radiación en un diagrama 2D que muestra la intensidad de los patrones de radiación de campo cercano. El patrón se encuentra en coordenadas polares, siendo (R) la distancia desde el origen, y theta (θ) el ángulo del eje x. El programa permite realizar una exportación de un archivo en hoja Excel de los

datos del patrón, este documento se compone de dos columnas, en la primera se encuentra el ángulo (θ), y la segunda columna contiene el valor de (R) correspondiente al ángulo.

El archivo es leído por el software Matlab y graficado en la correspondiente coordenada polar obteniendo la siguiente figura:

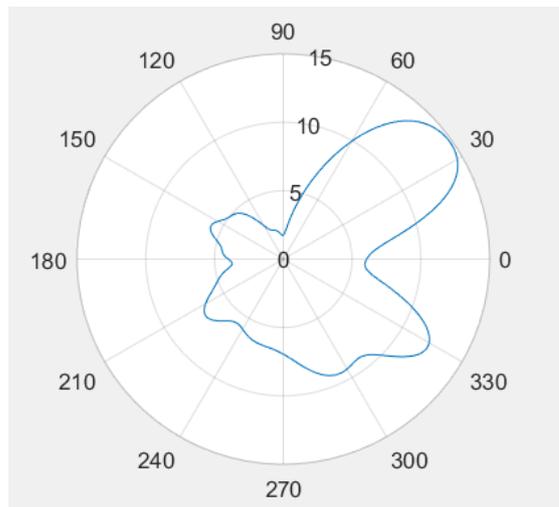


Figura 94. Patrón de radiación de un solo elemento de la antena origami.

Fuente: Autor

El siguiente paso es obtener el patrón del factor de arreglo, esto se consigue con la ecuación del factor de arreglo, variando el ángulo theta de su ecuación. Los ángulos designados para theta en el factor de arreglo tienen que ser igual a los ángulos proporcionados por el simulador de la antena. De igual manera esto se realiza en Matlab obteniendo el siguiente resultado como se muestra a continuación:

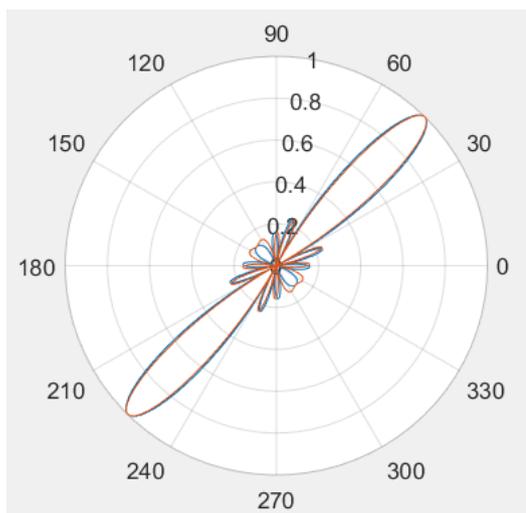


Figura 95. Patrón del Factor de Arreglo.

Fuente: Autor

La antena origami está formada por siete elementos. Entonces su patrón de radiación total es la adición vectorial de los campos radiados por cada elemento. El factor de arreglo permite tener una aproximación a esta radiación total, basada en la multiplicación del factor de arreglo y el patrón de radiación de un solo elemento. El número de elementos ya antes mencionados y con una misma separación entre ellos, es decir para el valor de separación (d) entre elementos será de 25 mm y el número (N) de elementos es igual a siete, obteniendo la siguiente figura:

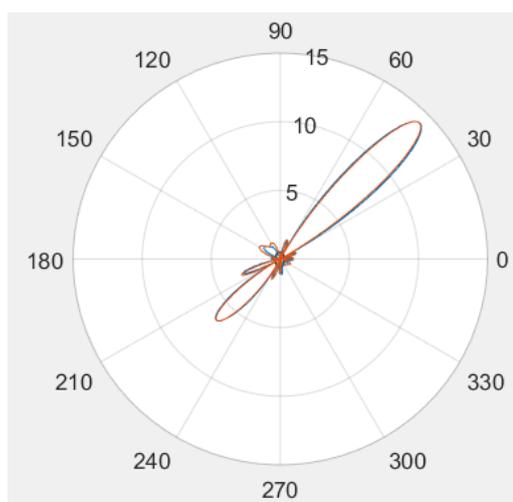


Figura 96. Patrón de radiación aproximado de la antena origami con siete elementos

Fuente: Autor

Al obtener el patrón de radiación utilizando el factor de arreglo y la radiación de cada elemento, se puede decir que el mismo no establece un resultado adecuado, ya que en la ecuación y el concepto del factor de arreglo no incluye la rotación que existen en cada elemento en la antena origami. Por esta razón se analiza un patrón de radiación en 3D en el cual se pueda ejecutar esta rotación, proceso que se describe en el siguiente punto.

3.2.2 PATRÓN DE RADIACIÓN EN 3D

El patrón de radiación obtenido por la simulación de un solo nivel de la antena planar basada en origami, se establece en tres dimensiones, este patrón muestra el campo eléctrico (E) radiado, multiplicado por una distancia radial (r), el patrón se encuentra en escala logarítmica es decir en decibeles (dB) detallando la gráfica. Existe dos planos sobre los cuales se grafican los puntos de radiación de energía de la antena: el plano azimut que se encuentra en función de ángulo (φ) y por otro lado el plano de elevación que está en función de ángulo (θ). El software de simulación permite extraer los datos del patrón de radiación de un elemento, estos son exportados en formato de hoja de cálculo de Excel en tres columnas, donde se encuentran los valores de campo eléctrico radiado (rE) para cada ángulo de PHI y THETA.

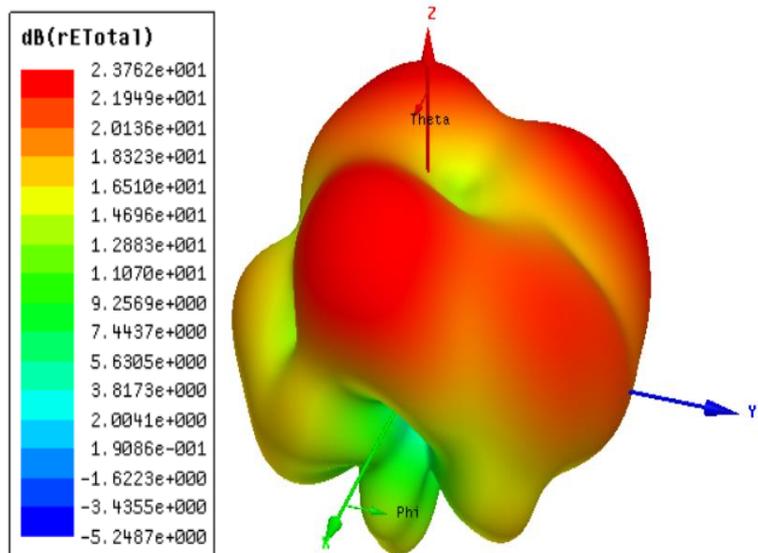


Figura 97. Patrón de radiación de un solo nivel de la antena.

Fuente: Autor

| | A | B | C |
|----|----------|------------|-------------|
| 1 | Phi[deg] | Theta[deg] | dB(rETotal) |
| 2 | 0 | 0 | 15.6501 |
| 3 | 1 | 0 | 15.6501 |
| 4 | 2 | 0 | 15.6501 |
| 5 | 3 | 0 | 15.6501 |
| 6 | 4 | 0 | 15.6501 |
| 7 | 5 | 0 | 15.6501 |
| 8 | 6 | 0 | 15.6501 |
| 9 | 7 | 0 | 15.6501 |
| 10 | 8 | 0 | 15.6501 |
| 11 | 9 | 0 | 15.6501 |
| 12 | 10 | 0 | 15.6501 |
| 13 | 11 | 0 | 15.6501 |
| 14 | 12 | 0 | 15.6501 |
| 15 | 13 | 0 | 15.6501 |
| 16 | 14 | 0 | 15.6501 |

Figura 98. Exportación de datos en hoja de cálculo de Excel.

Fuente: Autor

La antena origami se compone de siete niveles y cada nivel posee la misma forma de la cinta de cobre, entonces cada elemento de cinta de cobre irradia un campo eléctrico (E), los mismo que se pueden sumar cada uno de sus campos para obtener el campo eléctrico total de la antena es decir el patrón de radiación aproximado, esto se define como:

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_7 \quad (45)$$

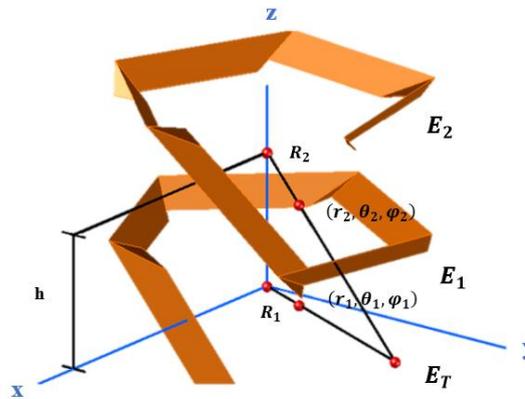


Figura 99. Elementos Correspondientes a los dos primeros niveles de la antena.

Fuente: Autor

El patrón de radiación total (E_T) se obtiene a partir de la sumatoria de los campos radiados por un solo elemento de la antena, considerando su desplazamiento, rotación y desfase. Cada elemento individual sufre una rotación de un ángulo (φ) según se desplace una altura (h), esta altura es la existente entre cada nivel de la antena, el proceso se realiza de manera sucesiva con el fin de obtener (E_1), (E_2), ... , (E_7) para su posterior suma, aproximando el patrón de radiación total de la antena.

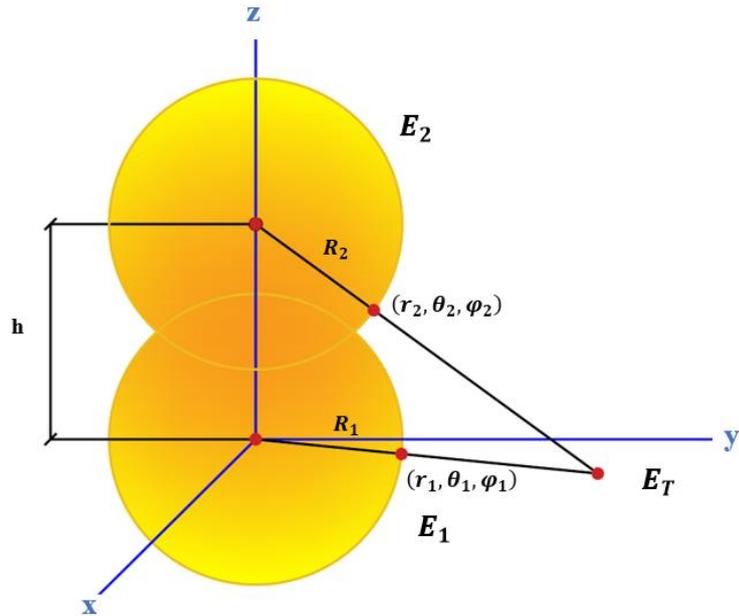


Figura 100. Representación del campo radiado por dos elementos en sus coordenadas esféricas y el E_T .

Fuente: Autor

El elemento simulado proporciona los datos de (rE) que es el campo eléctrico radiado donde (r_1) es el radio en ese punto del campo en su coordenada representado como (E_1) en el anterior gráfico. Primero se realiza el desplazamiento con una altura (h) de ese campo, a causa de esto el radio (r_1) no es el mismo que describe el nuevo campo (E_2) desplazado para el (E_T) , entonces se requiere del cálculo del radio (r_2) y el ángulo (θ_2) . Para esto se basa en el triángulo que se forma entre los radios y el desplazamiento que es la altura entre niveles de la antena como se muestra a continuación:

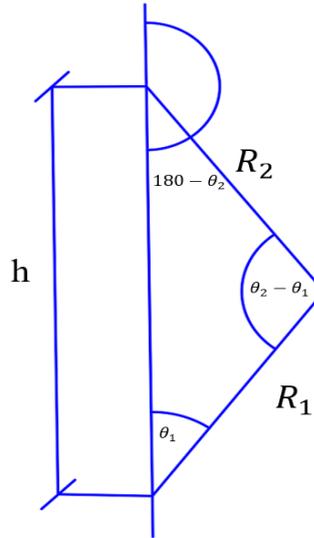


Figura 101. Triangulo base para encontrar (R_2).

Fuente: Autor

El radio R_2 para el campo E_2 se encuentra a partir del triángulo de la anterior grafica aplicando ley de cosenos y se aprecia como:

$$R_2 = \sqrt{R_1^2 + h^2 - 2 R_1 h * \cos(\theta_1)} \quad (46)$$

Para el cálculo se requiere el valor de $R_1 = r_1$, pero el software proporciona (rE), entonces a r_1 se plantea con un valor de 1 es decir $r_1 = 1$ y reemplazando en la anterior ecuación tenemos:

$$R_2 = \sqrt{R_1^2 + h^2 - 2 h * \cos(\theta_1)}$$

Donde $R_2 = r_2$

Para encontrar (θ_2) se aplica les se senos al triangulo de la anterior grafica como se muestra:

$$\frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{h} = \frac{\sin \theta_1}{R_2} \quad (47)$$

Despejando θ_2 se tiene:

$$\theta_2 = \theta_1 + \sin^{-1}\left(\frac{h \sin(\theta_1)}{R_2}\right)$$

Finalizando el cálculo de r_2 y θ_2 requerido a causa del desplazamiento, el siguiente paso es rotar el patrón en el plano azimut es decir sumar una constante dada por el desplazamiento al ángulo (φ) es decir:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \text{rotacion} \quad (48)$$

El patrón de radiación del elemento tratado se encuentra ya desplazado y rotado, por último se realiza la suma de los campos E_1 y E_2 , entonces se obtiene el campo total radiado por dos elementos de la antena partiendo de un solo elemento, sin embargo la antena consta de siete elementos que deberían realizar todo el proceso antes visto, para esto se realiza un algoritmo en MATLAB que es capaz de ejecutar el desplazamiento y rotación correspondiente a cada nivel de la antena. El algoritmo inicia con la importación de los datos proporcionados por el software de simulación, este es un archivo en hoja de cálculo que proporciona los datos del campo eléctrico radiado (rE) para cada ángulo de PHI y THETA, el mismo es graficado verificando la correcta lectura de los datos.

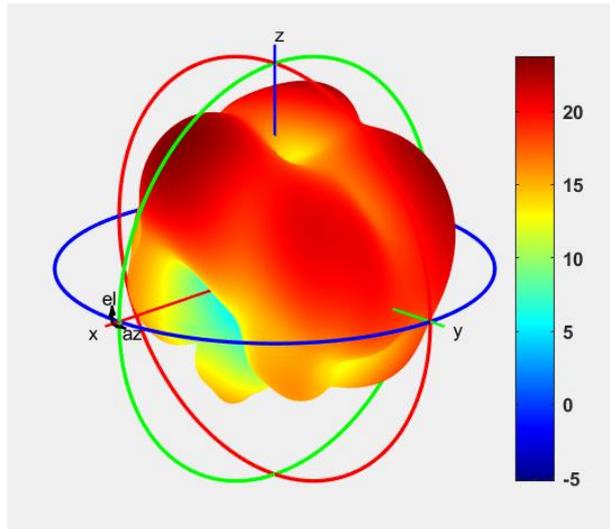


Figura 102. Patrón de radiación de un elemento en Matlab.

Fuente: Autor

Con el patrón de radiación correctamente graficado el algoritmo se realiza el desplazamiento requerido y aplica una rotación, además de aplicar la suma de los campos. Para visualizar se aplica el algoritmo para dos elementos como se muestra en la siguiente gráfica:

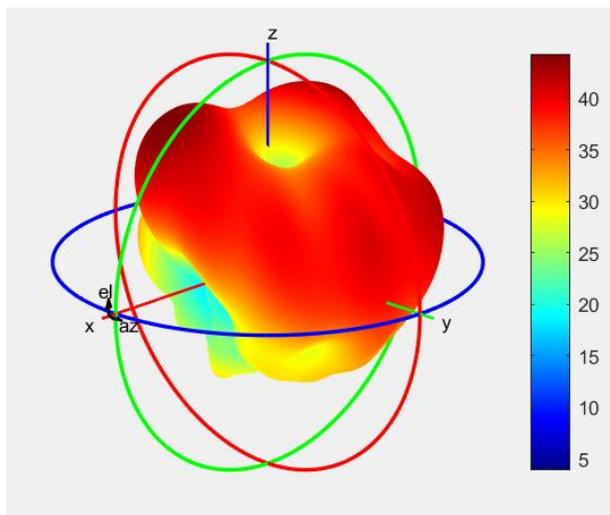


Figura 103. Patrón de radiación desplazado y rotado.

Fuente: Autor

Por ultimo ejecutamos el algoritmo para los siete elementos y con un desplazamiento de 25.2 mm entre los niveles, es decir la antena en su totalidad tendrá una altura de 176.4 mm, el resultado aproximado del patrón de radiación para esta altura de la antena se presenta en las siguientes figuras:

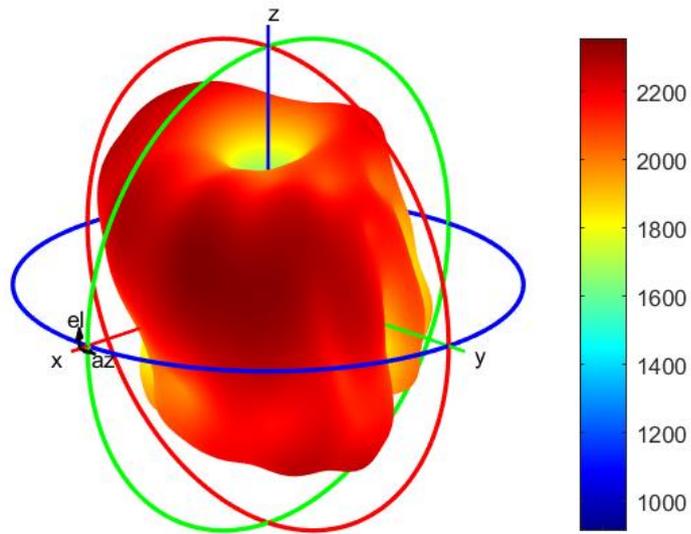


Figura 104. Vista Isométrica del patrón de radiación aproximado

Fuente: Autor

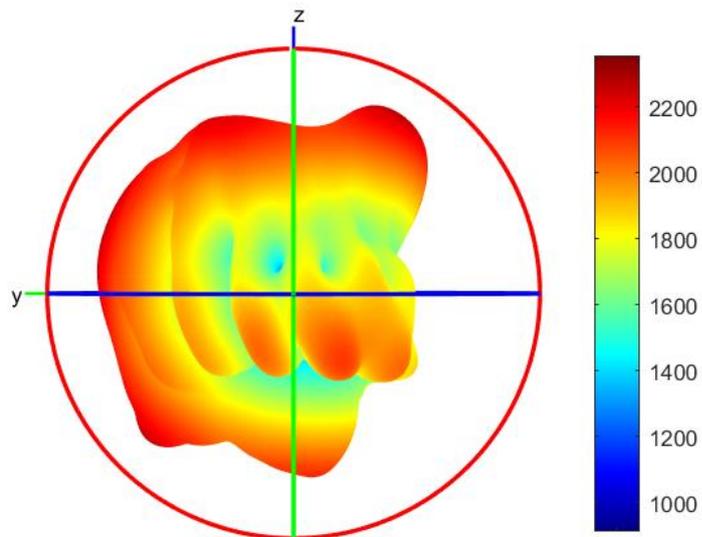


Figura 105. Vista frontal en el plano elevación del patrón de radiación aproximado

Fuente: Autor

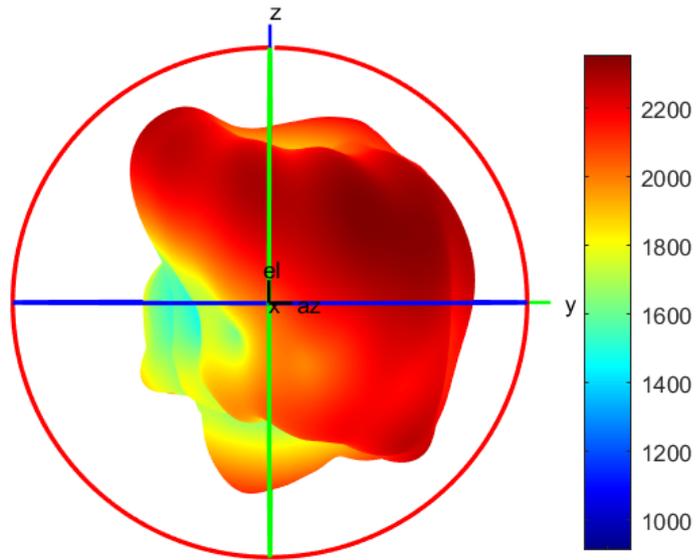


Figura 106. Vista posterior en el plano elevación del patrón de radiación aproximado

Fuente: Autor

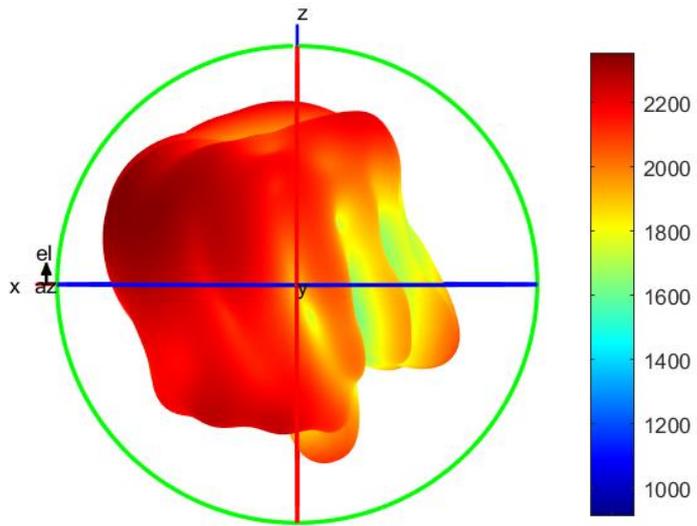


Figura 107. Vista frontal en el plano azimut del patrón de radiación aproximado

Fuente: Autor

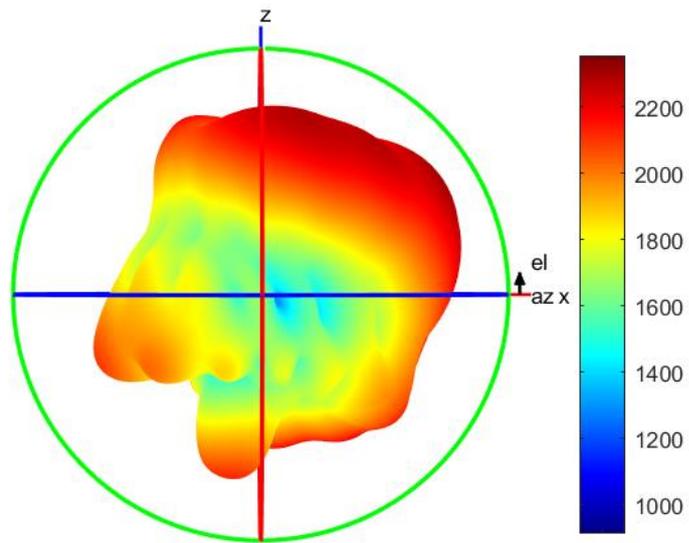


Figura 108. Vista posterior en el plano azimut del patrón de radiación aproximado

Fuente: Autor

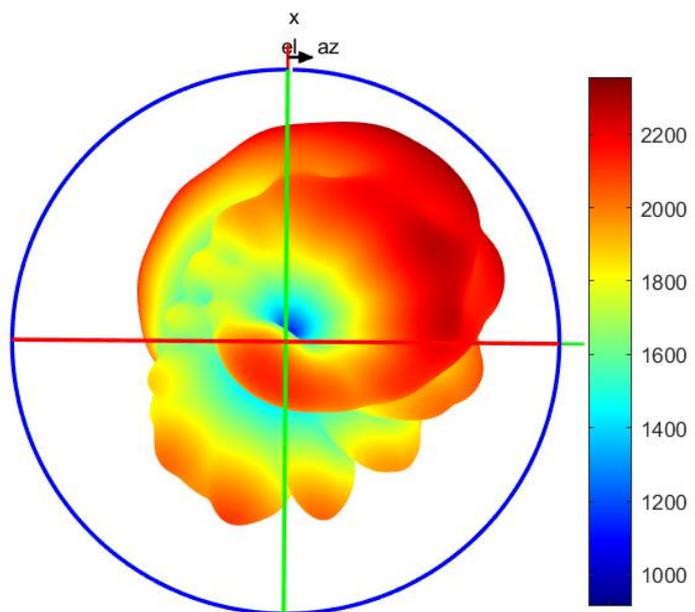


Figura 109. Viste inferior del Patrón de radiación aproximado.

Fuente: Autor

3.3 MEDICIONES

3.3.1 CONSTANTE DIELECTRICA EFECTIVA ϵ_{eff} Y CONSTANTE DIELECTRICA RELATIVA ϵ_r

La constante dieléctrica efectiva se obtiene en base a la longitud λ_g del anillo y de la frecuencia de resonancia medida λ_o del anillo resonador. Entonces es necesario medir la frecuencia de resonancia del anillo. Esta medición se hace con el equipo PXI de NATIONAL INSTRUMENTS, este realiza un barrido de frecuencias y obtiene una gráfica donde se muestra la potencia recibida en el puerto dos en comparación a la enviada en el puerto uno para cada frecuencia, es decir el parámetro S21.

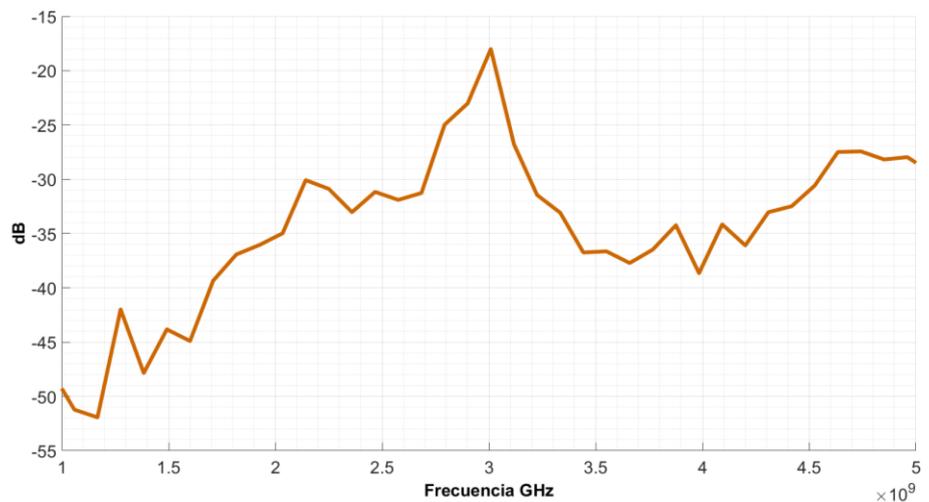


Figura 110. Parámetro S21 medido del resonador.

Fuente: Autor

En la anterior figura se muestra la frecuencia de resonancia del anillo, a partir de esa frecuencia se calcula su longitud de onda y con la longitud del anillo se lleva a cabo la medición de la constante dieléctrica efectiva del sustrato en este caso el papel Kraft con la siguiente relación [18]:

$$\sqrt{\varepsilon_{eff}} = \frac{\lambda_o}{\lambda_g} \quad (49)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_g} \right)^2$$

Al obtener la constante dieléctrica efectiva del sustrato ε_{eff} , por consiguiente este valor nos permite calcular la constante dieléctrica relativa ε_r del sustrato esencial que es la requerida por el software HFSS para la asignación de un material nuevo dentro de su librería de materiales. La ε_r se calcula despejando esta contante de la siguiente ecuación [20]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (50)$$

Basados en las ecuaciones (49) y (50) se presenta los parámetros necesarios para la medición y cálculo de ε_{eff} y ε_r . Además de los resultados obtenidos en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Parámetros necesarios para la medición y caculo de ε_{eff} y ε_r .

| Parámetros | Medida (mm) |
|---|---------------|
| Radio medio (r) | 13.9442 |
| Ancho del conductor (W) | 6.8801 |
| Longitud de onda guiada (λ_g) | 0.0876 |
| Frecuencia resonante. (λ_o) | 0.1000 |

Tabla 6. Resultado de medición y caculo para ϵ_{eff} y ϵ_r .

| Parámetros | Resultado estimado |
|---|--------------------|
| Constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff}) | 1.3027 |
| Constante dieléctrica relativa (ϵ_r) | 1.4000 |

3.3.2 FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LA ANTENA

Parámetro S11 de la antena origami simulado

En la Figura 111, se observa los resultados de la simulación correspondiente al coeficiente de reflexión S11, para las diferentes alturas iniciando a 131,6 mm a un paso de 5,6mm, hasta llegar a la altura de 204,4 mm. Las frecuencias de operación de la antena se encuentran en 4,7 GHz, 6,06 GHz y 7,32 GHz, además es notorio el cambio de la ganancia en estas frecuencias en consecuencia a la altura de la antena, es decir cuando la antena se encuentra retraída a una altura de 131,6 mm y crece, el parámetros S11 muestra que la ganancia en 6,06 GHz y 7,32 GHz es baja, por otra parte aumenta en 4,7GHz, al contrario, si la antena está desplegada a una altura de 204,4 mm y se retrae, el parámetro S11 indica un aumento de ganancia en 6,06 GHz y 7,32 GHz, disminuyendo para 4,7 GHz

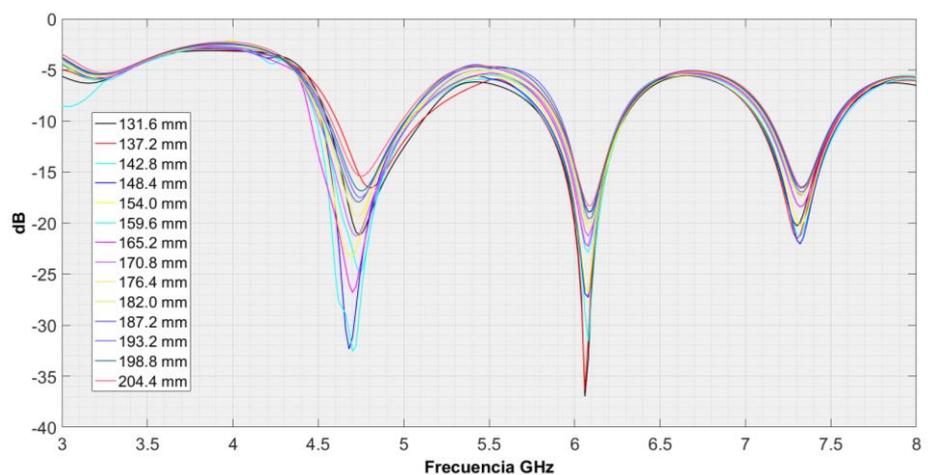


Figura 111. Simulación del factor S11 de la antena origami.

Fuente: Autor

Parámetro S11 de la antena origami medido

Para obtener resultados reales del comportamiento de la antena en este caso el parámetro S11, se consigue con el equipo Analizador Vectorial de Redes "Vector Network Analyzer" (VNA) previo a su calibración. Realizando mediciones a diferentes alturas se consideraron los resultados con mayor relevancia, los cuales se aprecien en la Figura 112 y Figura 113.

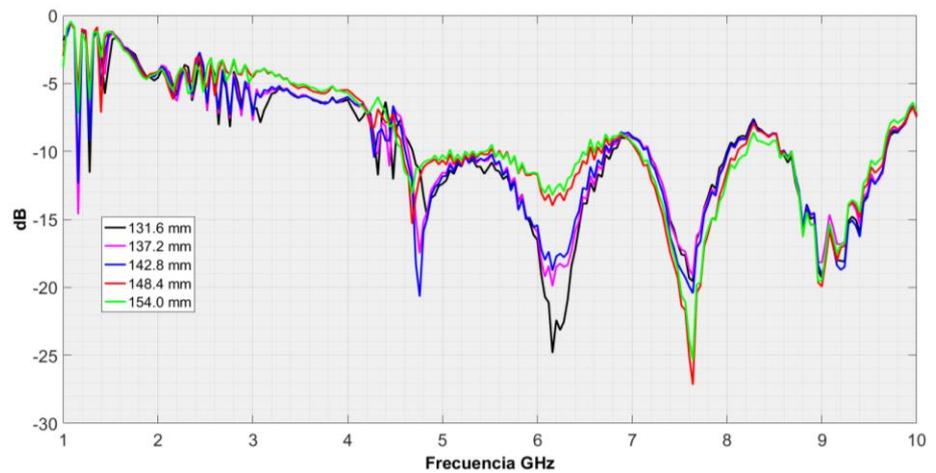


Figura 112. Resultados de la medición del parámetro S11 de la antena desde una altura de 131.6 mm hasta 154 mm.

Fuente: Autor

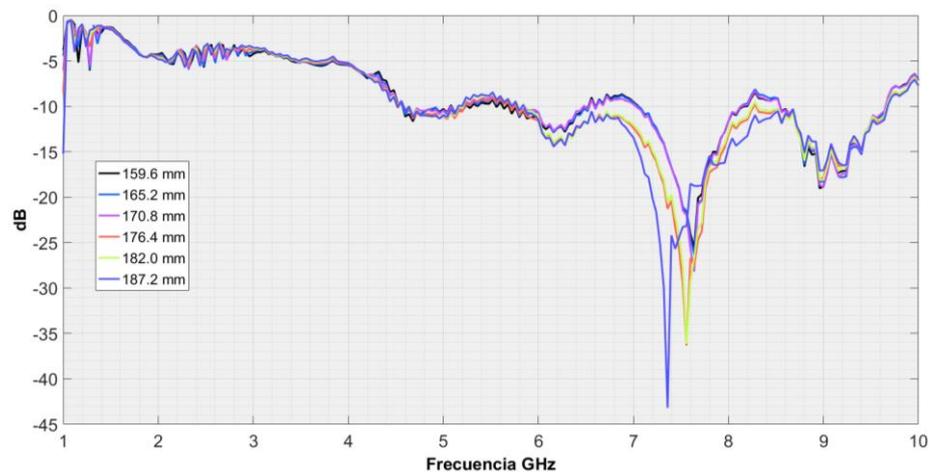


Figura 113. Resultados de la medición del parámetro S11 de la antena desde una altura de 159.6 mm hasta 187.2 mm.

Fuente: Autor

En Figura 112, en la altura de 131,6 mm tenemos como la mayor resonancia una frecuencia de 6 GHz, esta se tomara como referencia ya que al partir de esta altura, y al seguir desplegando la antena su mayor frecuencia de resonancia pasa a ser en 4,7 GHz para 142, 8 mm de altura, si la antena continua creciendo la mayor frecuencia de resonancia para a ser 7,32 GHz en una altura de 154mm. Además, al incrementar de altura el ruido en el parámetro S11 contiene una mayor atenuación.

La antena origami al encontrarse desplegada a más de una altura de 154 mm suprime las frecuencias que se encuentra por debajo de los 7 GHz, como también un desplazamiento de la frecuencia de resonancia cuando la antena continúa desplegándose hasta una altura de 187,2 mm.

Comparación del parámetro S11 de la antena origami medido y simulado

En base a los resultados descritos anteriormente, se realiza una comparación entre las gráficas simuladas y medidas del parámetro S11 en las alturas más destacadas que provocan cambios significativos en la antena.

Los cambios que existen a causa del desplegado de la antena ocurren en frecuencia y ganancia correspondientes al parámetro S11. Las alturas seleccionadas para la comparación son: 131.6 mm, 142.8 mm, 176.4 mm y 187.2 mm, estas se visualizan en la Figura 114 y Figura 115.

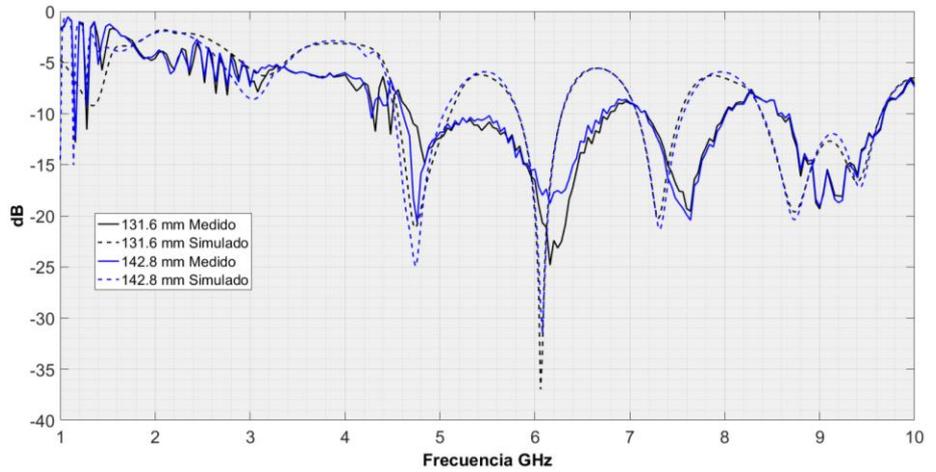


Figura 114. Comparación del S11 simulado y medido para alturas de 131,6 mm y 142,8 mm.

Fuente: Autor

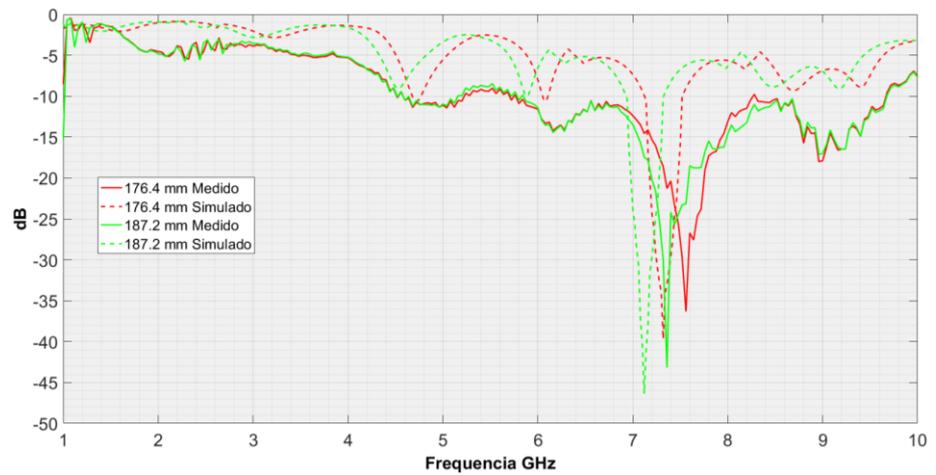


Figura 115. Comparación del S11 simulado y medido para alturas de 176,4 mm y 187,2 mm.

Fuente: Autor

En las Figura 114 y Figura 115 es notable la gran similitud entre los resultados medidos y simulados, con lo cual podemos validar los datos obtenidos mediante el VNA.

3.3.3 ANCHO DE BANDA DE LA ANTENA

El ancho de banda de operación de una antena, es un rango de frecuencias sobre el cual, la antena mantiene una eficiencia según un estándar específico. Sin embargo, existe diversas definiciones del ancho de banda, lo cual implica que no hay una fórmula exacta para determinarlo, depende del criterio del diseñador y de la función de la antena.

Para nuestro caso, se optó por considerar ancho de banda, al rango de frecuencias que corresponden a un 90% de potencia de la señal, este concepto parte desde el análisis de una señal modulada en FM, en donde se eligen algunos índices de modulación (B), y cada uno de ellos representan un valor de ganancia, mediante funciones de Bessel. El valor de J, escogido es el más próximo a cumplir el 90%, según la tabla de Bessel, véase en **Apéndice C: Tabla de Bessel**

Tabla 7. Valores de Bessel según el índice de modulación.

| Índice B | Valor J | Valor Bessel | Ganancia (dB) |
|----------|---------|--------------|---------------|
| 0,5 | 2 | 0,03060402 | -15,14221474 |
| 1 | 2 | 0,11490348 | -9,396667991 |
| 5 | 6 | 0,13104873 | -8,825671775 |
| 10 | 11 | 0,12311653 | -9,096836405 |

El índice de modulación es la relación entre el ancho de banda, usado a transmitir, y todo el espectro disponible.

$$\beta = \frac{fd}{fm}$$

El valor de la Ganancia corresponde a la siguiente fórmula:

$$Ganancia [dB] = 10 \log(Valor Bessel)$$

Según la Tabla 7, se tomará el valor promedio de -10 dB, para evaluar el ancho de banda en las gráficas S11 obtenidas mediante el VNA, en donde, desde la frecuencia central se considera -10dB de ancho de banda, tal como se muestra en la Figura 116.

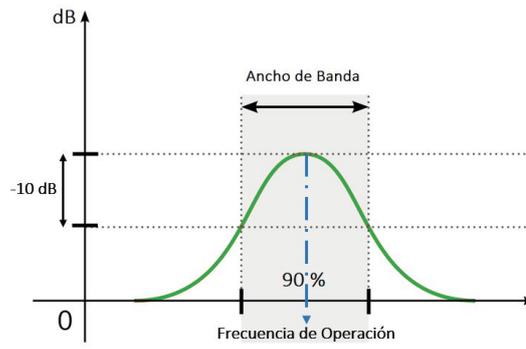


Figura 116. Representación del Ancho de banda.

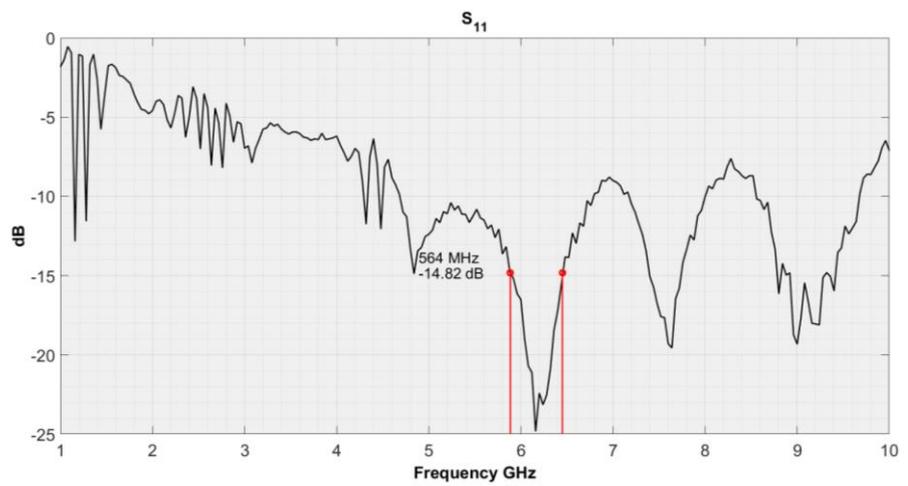


Figura 117. Ancho de banda de la frecuencia 6.13 GHz con altura 131.6 mm

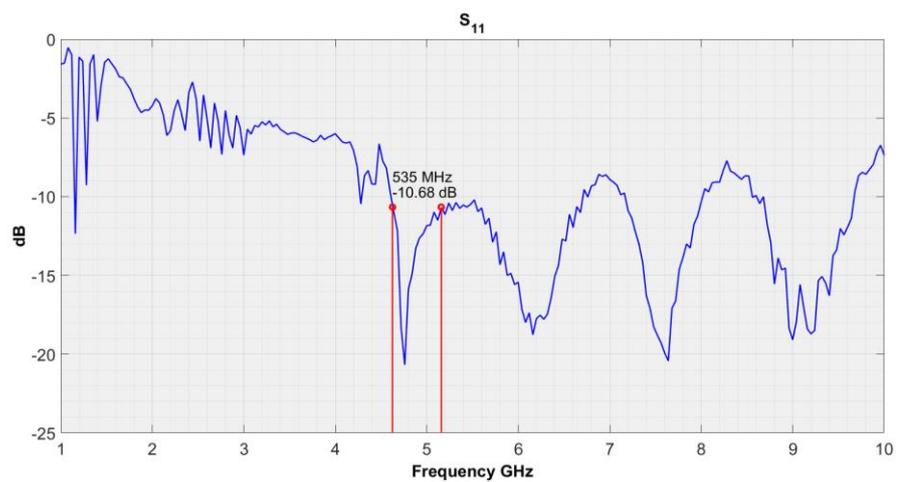


Figura 118. Ancho de banda de la frecuencia 4.7 GHz con altura 142.8 mm

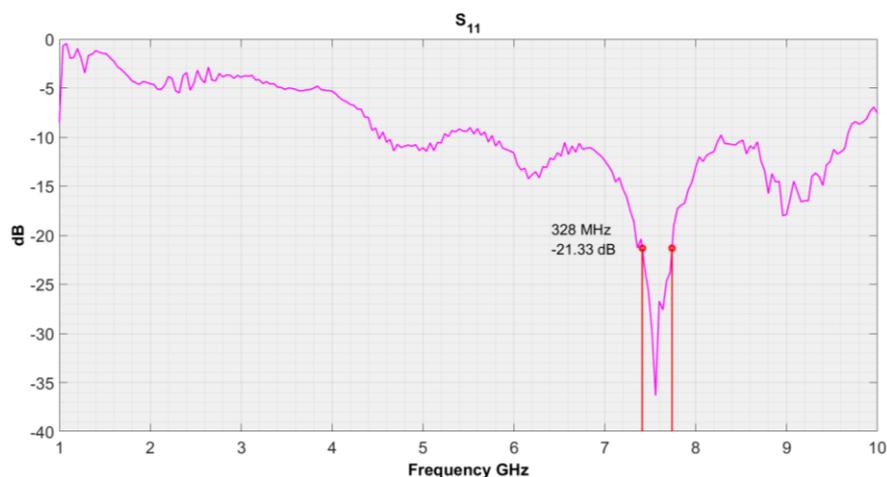


Figura 119. Ancho de banda de la frecuencia 7.3 GHz con altura 176.4 mm

Tabla 8. Resultados de Ancho de Banda.

| Altura | Frecuencia | Ancho de Banda |
|----------|------------|----------------|
| 131.6 mm | 6.13 GHz | 564 MHz |
| 141.8 mm | 4.7 GHz | 535 MHz |
| 176.4 mm | 7.3 GHz | 328 MHz |

3.3.4 PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA

El proceso de medición para obtener el patrón de radiación, consiste en transmitir una señal a través de la antena origami, a la frecuencia de operación la cual fue 4.7 GHz con una potencia de 0 dBm, se utilizó esta frecuencia debido a que el equipo de medición tiene 6 GHz de frecuencia máxima. Para poder recopilar los datos que conforman el patrón de radiación, se utilizó una antena tipo bocina como receptora, la misma capta la potencia transmitida en cada grado de giro, correspondiente al eje Theta, para establecer una tabla con la potencia captada en todos los 360 grados, con pasos de un grado, la misma que nos permite obtener una gráfica del patrón de radiación de forma radial, y comparando con el patrón obtenido por simulación.

A continuación, se muestra los patrones de radiación medidos y simulados en las alturas de mayor relevancia como son 131.6mm, 141.8mm, 176.4mm y 187.2mm, además estos son evaluados con tres diferentes pruebas, estas pruebas son Factor de Diferencia, Factor de Similitud y prueba de Chi-Cuadrado, las mismas que determinan si los patrones se pueden considerar iguales.

La prueba de factor de diferencia refleja la diferencia acumulada entre los dos patrones de radiación medido y simulado en los 361 puntos que comprenden los patrones, si el valor obtenido de esta prueba es más cercano a 0, indica que las gráficas no contienen diferencia, siendo el valor crítico 15, como máximo valor para la diferencia acumulada entre los dos patrones, es decir que el resultado debe ser menor a este valor crítico.

Para la prueba de factor de similitud es una función recíproca de la raíz cuadrada media de la suma de las distintas cuadradas en los 361 puntos que comprenden los patrones, el valor obtenido por esta prueba mientras más se acerque a 100, quiere decir que los patrones son similares, por lo tanto, el valor crítico es 50 para una diferencia máxima del 10 % y el resultado deberá ser mayor al mismo.

La prueba por chi-cuadrado es una prueba de estadística que genera un valor a través de la comparación de una distribución observada con una distribución esperada, si dicho valor es menor que el nivel de significación, la prueba es considerada válida y la hipótesis nula de que son similares. Para este caso, el valor crítico para un nivel de significancia del 10 %, con 360 elementos (N-1 grados de libertad) es 396,47.

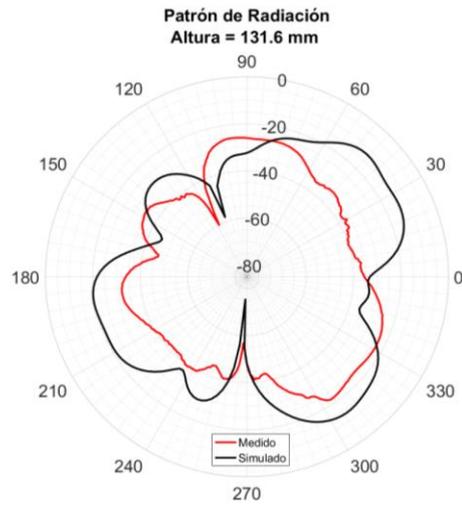


Figura 120. Patrón de Radiación para una altura de 131,6 mm.

Fuente: Autor

Tabla 9. Resultados de Pruebas con altura=131,6 mm.

| Prueba | Valor Critico | Valor de la prueba | Resultado |
|----------------------|---------------|--------------------|----------------|
| Factor de Similitud | 50 | 97.66 | Son Iguales |
| Factor de Diferencia | 15 | 8.70 | Sin diferencia |
| Chi-Cuadrado | 396,47 | 39.48 | Se Acepta |

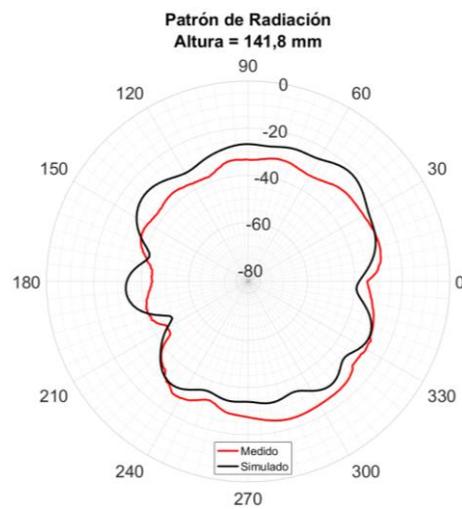


Figura 121. Patrón de Radiación para una altura de 141,8 mm.

Fuente: Autor

Tabla 10. Resultados de Pruebas con altura=141,8 mm.

| Prueba | Valor Critico | Resultado | Resultado |
|----------------------|---------------|--------------|----------------|
| Factor de Similitud | 50 | 98.25 | Son Iguales |
| Factor de Diferencia | 15% | 7.98% | Sin diferencia |
| Chi-Cuadrado | 396,47 | 93.05 | Se Acepta |

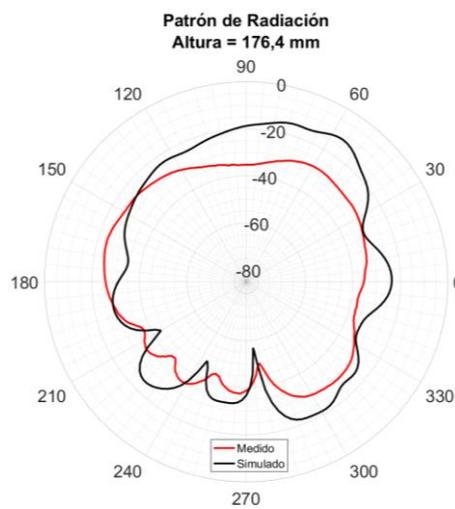


Figura 122. Patrón de Radiación para una altura de 176,4 mm.

Fuente: Autor

Tabla 11. Resultado de Pruebas con altura=176,4 mm.

| Prueba | Valor Critico | Resultado | Resultado |
|----------------------|---------------|---------------|----------------|
| Factor de Similitud | 50 | 98.532 | Son Iguales |
| Factor de Diferencia | 15% | 9.02 | Sin diferencia |
| Chi-Cuadrado | 396,47 | 293.24 | Se Acepta |

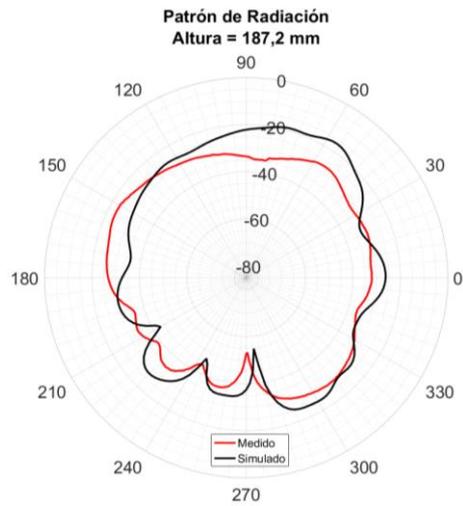


Figura 123. Patrón de Radiación para una altura de 187,2 mm.

Fuente: Autor

Tabla 12. Resultado de Pruebas con altura=187,2 mm.

| Prueba | Valor Critico | Resultado | Resultado |
|-----------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|
| Factor de Similitud | 50 | 98.70 | Son Iguales |
| Factor de Diferencia | 15% | 7.53% | Sin diferencia |
| Chi-Cuadrado | 396,47 | 184.25 | Se Acepta |

3.4 COMPARACIÓN CON ANTENAS DEL MERCADO

| | GANANCIA | | ANCHO DE BANDA | | PATRÓN DE RADIACIÓN |
|---|--------------------|---------|--------------------|---------|---------------------|
| ANTENA ORIGAMI | ALTURA DE 131,6 mm | 6.17 dB | ALTURA DE 131,6 mm | 564 MHZ | |
| | ALTURA DE 176,4 mm | 5.16 dB | ALTURA DE 176,4 mm | 328 MHZ | |
| ANTENA R&S HE600 | 10 dB | | 1 GHz | | |
| ANTENA R&S AD016MC COMPACT BROADBAND | 2 dB | | 1 GHz | | |
| ANTENA WB-5600S | 1 dB | | 4 GHz | | |

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La frecuencia de resonancia del anillo es de igual valor tanto en la simulación mediante el software HFSS, como en las mediciones realizadas en la práctica, lo que indica que la estimación de la constante dieléctrica mediante el anillo resonante tiene un alto grado de confiabilidad, todo esto se sustenta en base a las ecuaciones descritas en la sección 1.3 anillo resonante, que permitieron el diseño del anillo. Para realizar los cálculos se requirieron los parámetros: frecuencia de operación y espesor de la base de papel Kraft. Las mediciones realizadas del parámetro S21 posibilitaron el cálculo del ϵ_r para el papel Kraft, dando como resultado un valor de 1.4 como se muestra en la Tabla 6.

El objetivo general propuesto fue obtener una antena reconfigurable, para esto se diseñó una antena basada en la técnica del origami, utilizando una estructura de torre pentagonal, la misma que es capaz de plegarse y desplegarse a diversas alturas conseguido por un sistema de movimiento lineal Husillo-Tuerca, en consecuencia, este movimiento proporciona cambios en las propiedades de radiación de la antena como son: frecuencia de resonancia, patrón de radiación y ancho de banda, esto se muestra en la sección 3.3 Mediciones, en base a estos resultados de simulación en el software HFSS y los datos obtenidos con equipos de medición, se puede atribuir que las características constitutivas de la antena origami planteada se pueden configurar en función de su altura, lo que implica una antena reconfigurable.

Las simulaciones y las mediciones practicas realizadas en el desarrollo de la antena reconfigurable, indican que las frecuencias de resonancia de la antena se encuentran en 4.7 GHz, 6.06 GHz y 7.32 GHz como se aprecia en la Figura 111, Figura 112 y Figura 113. Cuando la antena se encuentra a una altura de 131.6 mm el parámetro S11 muestra una ganancia de -25 dB en la frecuencia de resonancia de 6.06GHz, mientras que para las demás frecuencias su ganancia no posee mayor significancia. Si la antena se establece a una altura de 142.8 mm, indica una ganancia de -21dB y la frecuencia de resonancia está posicionada en 4.7 GHz, por otra parte, el resto de frecuencias de resonancia son afectadas en su ganancia. Al encontrarse la antena a una altura de 187.2 mm tiene una ganancia de -43 dB a una frecuencia de resonancia de 7.32 GHz, no obstante, las frecuencias de 4.7GHz y 6.06GHz presentan un valor de ganancia despreciable. Estos resultados indican la presencia de una variación no lineal entre la ganancia y la altura de la estructura de la antena.

Los patrones de radiación descritos por la antena origami, se encuentra en cuatro diferentes alturas que se muestran desde la Figura 120 a la Figura 123, los mismos son distintos en consecuencia al cambio de la altura en la estructura de la antena. Los datos de los patrones de radiación son expuestos a tres diferentes pruebas, comparando entre los valores simulados y medidos. Las evaluaciones de Factor de similitud (valor crítico mínimo de 50 para un error del 10%), Factor de diferencia (valor crítico máximo de 15 para una diferencia media del 10%) y Chi-cuadrado (con un nivel de significación del 10%) fueron realizadas según se indican en las Tabla 9 Tabla 10 Tabla 11 y Tabla 12, con los resultados obtenidos, se puede afirmar que los patrones de radiación simulados son similares, no tienen diferencia y se puede ajustar los patrones de radiación medidos.

Para el análisis de los diferentes parámetros de la antena, se optó por utilizar el software Ansys HFSS, el mismo que es capaz de predecir el comportamiento de un dispositivo de radiofrecuencia mediante elementos finitos, dando la certeza que los resultados obtenidos sean mucho más precisos. Mediante las diferentes medidas realizadas al comparar las diferentes simulaciones realizadas, tal como se muestran en la sección 3.3 Mediciones, indican un alto grado de similitud entre los valores medidos y simulados por software usado.

Si la antena origami se encuentra a una altura menor de 100 mm, la respuesta en frecuencia del parámetro S11 no contiene una estabilidad, es decir, la frecuencia de resonancia es muy fluctuante, esto debido a que las líneas de cobre de cada piso se juntan entre ellas, produciendo interferencias. Se recomienda elegir un patrón para las líneas de cobre diferente, que disminuya este efecto para bajas alturas.

El uso de papel para el desarrollo de la antena origami abre un canal para trabajos futuros en aplicaciones de microondas de estructura flexible, desechables y de muy bajo costo, por lo que, se recomienda el uso de este papel que contribuye con la reducción del impacto ambiental, producto de la manufactura de circuitos impresos, fabricados en PCB.

Al realizar la antena con una estructura de papel Kraft, tiene una gran ventaja en cuanto a flexibilidad y resistencia, sin embargo, sus prestaciones como sustrato no son tan buenas como las del FR4, por tanto, se recomienda para trabajos futuros, realizar un estudio más amplio sobre diferentes tipos de papel o polímeros que tengan mejores características, incluso considerar como opciones a materiales flexibles e impermeables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Florida International University, “Stavros V. Georgakopoulos, Ph.D.” [Online]. Available: <https://emlab.fiu.edu/about/people/directors/stavros-v-georgakopoulos-ph-d/>. [Accessed: 08-Nov-2018].
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory 3rd*. 2005.
- [3] Warren L. Stutzman Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design 3rd*, vol. 39, no. 5. 2008.
- [4] G. I. Athanasopoulos, S. J. Carey, and J. V. Hatfield, *Circuit design and simulation of a transmit beamforming ASIC for high-frequency ultrasonic imaging systems*, vol. 58, no. 7. 2011.
- [5] T. Milligan, *Modern Antenna Design, 2nd Ed*. 2005.
- [6] C. Tanaka, “An Exploration of Teacher Motivation: A Case Study of Basic School Teachers in Two Rural Districts in Ghana,” *Master Thesis, Univ. of Sussex*, vol. 100, no. 7, pp. 2169–2180, 2010.
- [7] S. Banas and R. K. Bansal, “Design and Analysis of Fractal Antennas based on Koch and Sierpinski Fractal Geometries,” *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 2, no. 6, pp. 2110–2116, 2013.
- [8] M. Lince and I. Electr, “Antenas Fractales:Un Paso en la Evolución de las Telecomunicaciones.”
- [9] T. H. (Wester N. E. University), “Origami : plegado de papel y matemáticas,” p. 2015, 2015.
- [10] L. J. Fei and D. Sujana, “Origami Theory and its Applications : A Literature Review,” *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Soc. Manag. Econ. Bus. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 113–117, 2013.
- [11] L. Livermore, “Simulating the Cosmosin Transition (A Giant Leap For Space Telescopes),” no. March, 2003.
- [12] S. Yao, X. Liu, S. V. Georgakopoulos, and M. M. Tentzeris, “A novel

- reconfigurable origami spring antenna,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 2, pp. 374–375, 2014.
- [13] S. Yao, X. Liu, J. Gibson, and S. V. Georgakopoulos, “Deployable origami Yagi loop antenna,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 2015–Octob, pp. 2215–2216, 2015.
- [14] X. Liu, S. V. Georgakopoulos, and M. Tentzeris, “A novel mode and frequency reconfigurable origami quadrifilar helical antenna,” *2015 IEEE 16th Annu. Wirel. Microw. Technol. Conf. WAMICON 2015*, pp. 3–5, 2015.
- [15] S. Yao, X. Liu, S. V. Georgakopoulos, and M. M. Tentzeris, “A novel tunable origami accordion antenna,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, pp. 370–371, 2014.
- [16] S. Yao, X. Liu, and S. V. Georgakopoulos, “Study and design of Nojima origami conical spiral antenna,” *2016 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. APSURSI 2016 - Proc.*, pp. 1431–1432, 2016.
- [17] S. Yao, X. Liu, and S. V. Georgakopoulos, “A mode reconfigurable Nojima origami antenna,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 2015–Octob, pp. 2237–2238, 2015.
- [18] N. Shebani, “Design Curves of Microstrip Ring Resonator Design Curves of Microstrip Ring Resonator,” no. November, 2016.
- [19] J. B. Temes, *Circuitos de microondas con Líneas de transmisión*, 1996th ed. Barcelona, 1996.
- [20] D. M. U. of M. at A. Pozar, *Microwave Engineering*, Fourth Edi. 2011.

APÉNDICES

APÉNDICE A: DIMENSIONES DE LA CAJA DEL MECANISMO

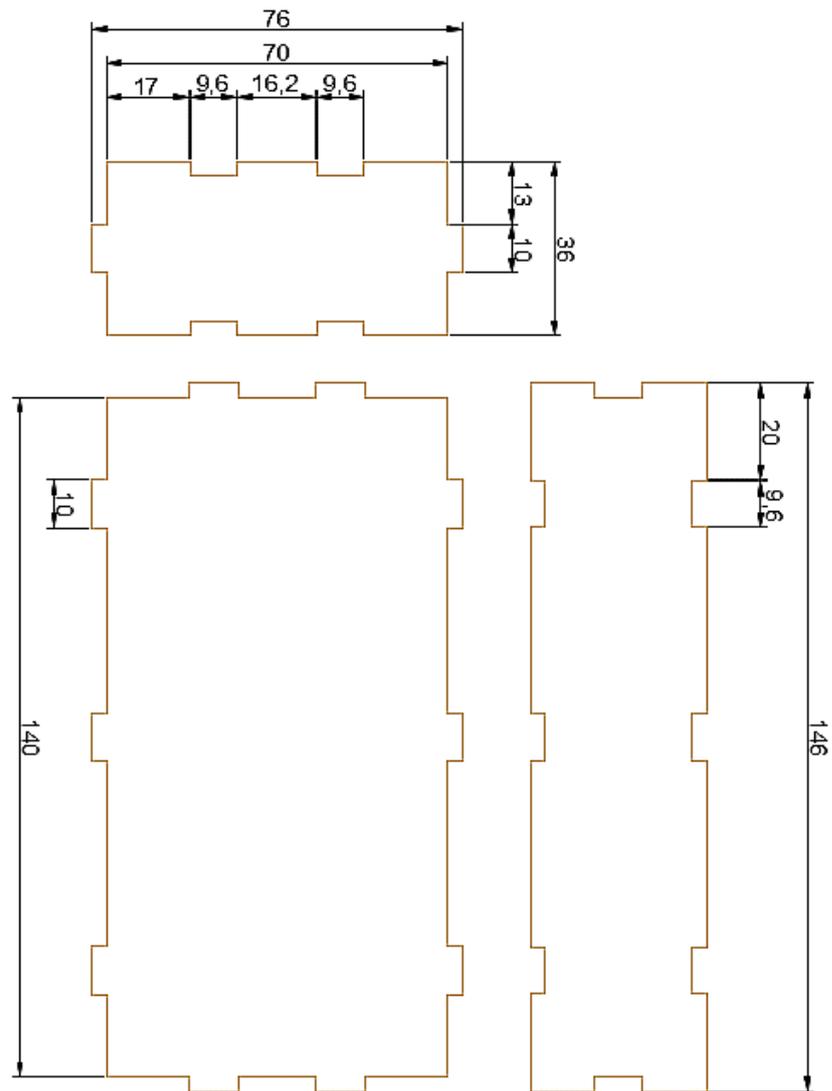


Figura A.1 Dimensiones de la caja

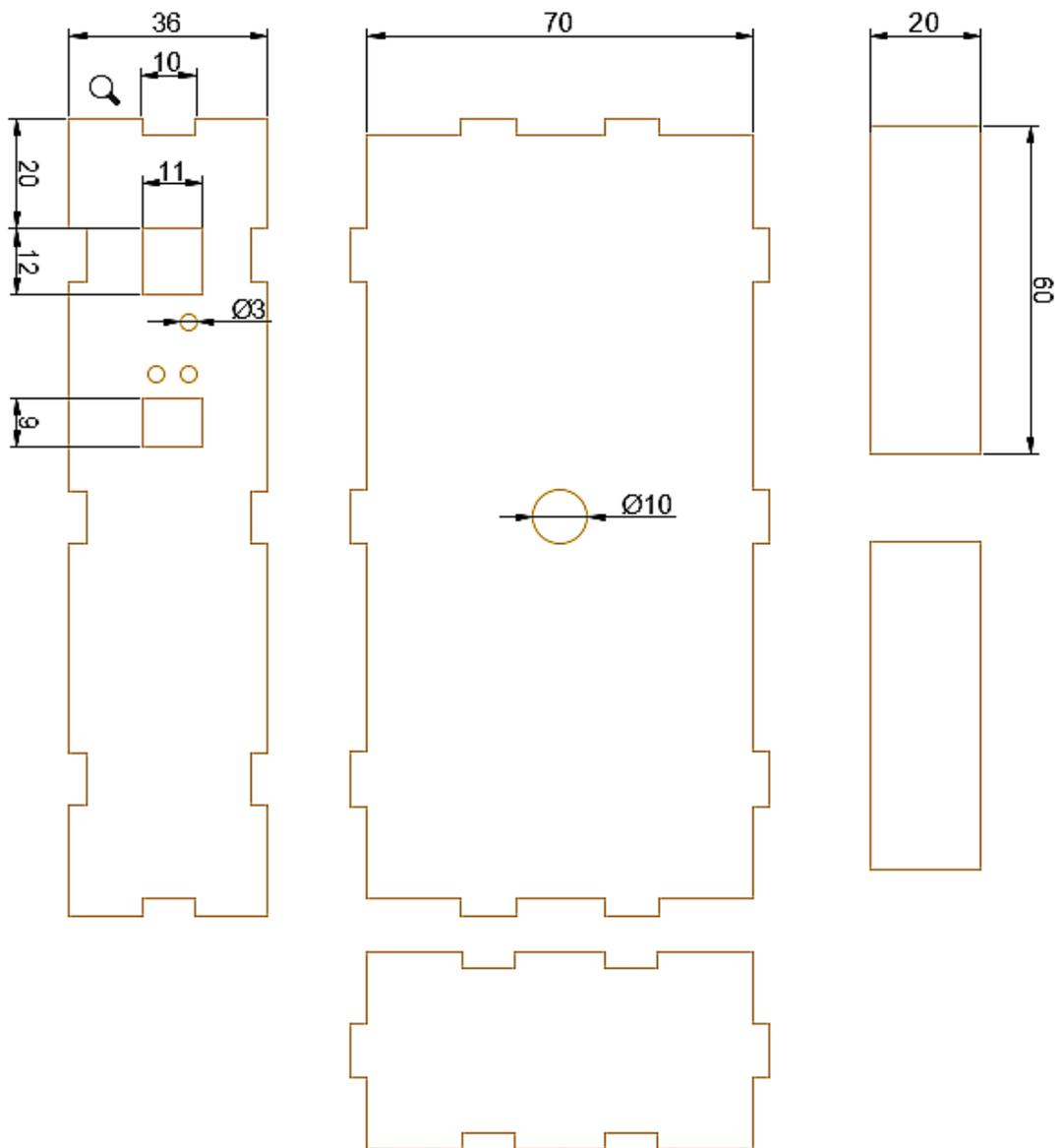


Figura A.2 Dimensiones de la caja

APÉNDICE B: REFERENCIAS DE CÓDIGO DE LA SECCIÓN

2.4.2 SIMULACIÓN AUTOMATIZADA DE LA ANTENA POR SCRIPT DE MICROSOFT VISUAL BASIC (VBS)

```
solido1="188_Unnamed_1"
solido2="188_Unnamed_2"
solido3="188_Unnamed_3"
solido4="188_Unnamed_4"

Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("HFSSDesign12")
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido1), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=", "GND"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "copper" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"GND"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=", 203, "G:=", 88, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0))))

-----

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido2), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=", "FR4"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "FR4_epoxy" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"FR4"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=", 0, "G:=", 128, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0))))

-----

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido3), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=", "Line_cooper"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "copper" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"Line_cooper"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=", 203, "G:=", 88, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0))))

-----

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido4), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=", "PAPER1"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "PAPER" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"PAPER1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=", 189, "G:=", 145, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0.8))))
```

Figura B.1 Asignación de materiales y cambio en las propiedades de cada elemento de la antena.

```
Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("HFSSDesign12")
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")

oEditor.CreateRectangle Array("NAME:RectangleParameters", "IsCovered:=", true, "XStart:=", _
"70mm", "YStart:=", "22.1519mm", "ZStart:=", "0.04mm", "Width:=", "-6.88mm", "Height:=", _
"-0.04mm", "WhichAxis:=", "X"), Array("NAME:Attributes", "Name:=", "Rectangle1", "Flags:=", _
"", "Color:=", "(143 175 143)", "Transparency:=", 0, "PartCoordinateSystem:=", _
"Global", "UDMId:=", "", "MaterialValue:=", "" & Chr(34) & "vacuum" & Chr(34) & "", "SurfaceMaterialValue:=", _
"" & Chr(34) & "" & Chr(34) & "", "SolveInside:=", true, "IsMaterialEditable:=", _
true, "UseMaterialAppearance:=", false)
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DCmdTab", Array("NAME:PropServers", _
"Rectangle1:CreateRectangle:1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:ZSize", "Value:=", _
"(-1.6-0.04-0.035) mm))))]

Set oModule = oDesign.GetModule("BoundarySetup")

oModule.AssignLumpedPort Array("NAME:1", "Objects:=", Array("Rectangle1"), "RenormalizeAllTerminals:=", _
true, "DoDeembed:=", false, Array("NAME:Modes", Array("NAME:Mode1", "ModeNum:=", 1, "UseIntLine:=", _
true, Array("NAME:IntLine", "Start:=", Array("70mm", "18.7119mm", "-1.635mm"), "End:=", Array(_
"70mm", "18.7119mm", "0.03999999999999992mm))), "AlignmentGroup:=", 0, "CharImp:=", _
"Zpi", "RenormImp:=", "50ohm"), "ShowReporterFilter:=", false, "ReporterFilter:=", Array(_
true), "Impedance:=", "50ohm")
```

Figura B.2 Excitación por Lumped Port desde Script.

```

Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("HFSSDesign12")
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")

oEditor.CreateRegion Array("NAME:RegionParameters", "+XPaddingType:=", _
"Percentage Offset", "+XPadding:=", "15", "-XPaddingType:=", "Percentage Offset", "-XPadding:=", _
"15", "+YPaddingType:=", "Percentage Offset", "+YPadding:=", "15", "-YPaddingType:=", _
"Percentage Offset", "-YPadding:=", "15", "+ZPaddingType:=", "Percentage Offset", "+ZPadding:=", _
"15", "-ZPaddingType:=", "Percentage Offset", "-ZPadding:=", "15"), Array("NAME:Attributes", "Name:=", _
"Region", "Flags:=", "Wireframe#", "Color:=", "(255 0 0)", "Transparency:=", 0, "PartCoordinateSystem:=", _
"Global", "UDMID:=", "", "MaterialValue:=", "" & Chr(34) & "vacuum" & Chr(34) & "", "SolveInside:=", _
true)

Set oModule = oDesign.GetModule("BoundarySetup")

oModule.AssignRadiation Array("NAME:Rad1", "Objects:=", Array("Region"), "IsIncidentField:=", _
false, "IsEnforcedField:=", false, "IsFssReference:=", false, "IsForPML:=", _
false, "UseAdaptiveIE:=", false, "IncludeInPostproc:=", true)

```

Figura B.3 Límites de Radiación por Script.

```

Set oModule = oDesign.GetModule("AnalysisSetup")

oModule.InsertSetup "HfssDriven", Array("NAME:Setup1", "AdaptMultipleFreqs:=", _
false, "Frequency:=", "6GHz", "MaxDeltaS:=", 0.02, "PortsOnly:=", false, "UseMatrixConv:=", _
false, "MaximumPasses:=", 6, "MinimumPasses:=", 1, "MinimumConvergedPasses:=", _
1, "PercentRefinement:=", 30, "IsEnabled:=", true, "BasisOrder:=", 1, "DoLambdaRefine:=", _
true, "DoMaterialLambda:=", true, "SetLambdaTarget:=", false, "Target:=", _
0.3333, "UseMaxTetIncrease:=", false, "PortAccuracy:=", 2, "UseABConPort:=", _
false, "SetPortMinMaxTri:=", false, "UseDomains:=", false, "UseIterativeSolver:=", _
false, "SaveRadFieldsOnly:=", false, "SaveAnyFields:=", true, "IESolverType:=", _
"Auto", "LambdaTargetForIESolver:=", 0.15, "UseDefaultLambdaTgtForIESolver:=", _
true, "RayDensityPerWavelength:=", 4, "MaxNumberOfBounces:=", 5, "InfiniteSphereSetup:=", _
-1, "SkipSBRSSolveDuringAdaptivePasses:=", true)

oModule.InsertFrequencySweep "Setup1", Array("NAME:Sweep", "IsEnabled:=", true, "RangeType:=", _
"LinearStep", "RangeStart:=", "1GHz", "RangeEnd:=", "10GHz", "RangeStep:=", _
"0.02GHz", "Type:=", "Interpolating", "SaveFields:=", false, "SaveRadFields:=", _
false, "InterpTolerance:=", 0.5, "InterpMaxSolns:=", 250, "InterpMinSolns:=", _
0, "InterpMinSubranges:=", 1, "ExtrapToDC:=", false, "InterpUseS:=", true, "InterpUsePortImped:=", _
false, "InterpUsePropConst:=", true, "UseDerivativeConvergence:=", false, "InterpDerivTolerance:=", _
0.2, "UseFullBasis:=", true, "EnforcePassivity:=", true, "PassivityErrorTolerance:=", _
0.0001)

oDesign.AnalyzeAll

```

Figura B.4 Insertar Setup de Frecuencias e Iniciar la Simulación.

APÉNDICE C: TABLA DE BESSEL

| Índice B | J0 | J1 | J2 | J3 | J4 | J5 | J6 | J7 | J8 | J9 | J10 | J11 | J12 | J13 | J14 | J15 | J16 |
|----------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,98 | 0,12 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,5 | 0,94 | 0,24 | 0,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,77 | 0,44 | 0,11 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,22 | 0,58 | 0,35 | 0,13 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | -0,4 | -0,07 | 0,36 | 0,43 | 0,28 | 0,13 | 0,05 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | -0,18 | -0,33 | 0,05 | 0,36 | 0,39 | 0,26 | 0,13 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0,15 | -0,28 | -0,24 | 0,11 | 0,36 | 0,36 | 0,25 | 0,13 | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0,3 | 0 | -0,3 | -0,2 | 0,16 | 0,35 | 0,34 | 0,23 | 0,13 | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0,17 | 0,23 | -0,11 | -0,3 | -0,11 | 0,19 | 0,34 | 0,32 | 0,22 | 0,13 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | -0,09 | 0,25 | 0,14 | -0,2 | -0,27 | -0,06 | 0,2 | 0,33 | 0,31 | 0,21 | 0,12 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | -0,25 | 0,04 | 0,25 | 0,06 | -0,22 | -0,23 | -0,01 | 0,22 | 0,32 | 0,29 | 0,21 | 0,12 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0 | 0 |

APÉNDICE D: ALGORITMO IMPLEMENTADO

Algoritmo 1: Simulación automatizada de la antena por script de Microsoft Visual Basic (VBS)

```

Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule

Dim numero, var, guarda, var2, solido1
Dim a

numero= "C:\Users\i7 MAX\Desktop\wa\188.sat"
guarda="C:\Users\i7 MAX\Desktop\wa\188\Project1.aedt"
ruta="C:\Users\i7 MAX\Desktop\wa\188"

a=1
b=188

```



```

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido1), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=",
"GND"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "copper" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"GND"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=", 203,
"G:=", 88, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0))))

```

```

'-----
-----

```

```

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido2), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=",
"FR4"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "FR4_epoxy" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"FR4"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=", 0,
"G:=", 128, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0))))

```

```

'-----
-----

```

```

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido3), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=",
"Line_cooper"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "copper" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"Line_cooper"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color",
"R:=", 203, "G:=", 88, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0))))

```

```

'-----
-----

```

```

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
solido4), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Name", "Value:=",
"PAPER1"), Array("NAME:Material", "Value:=", _
"" & Chr(34) & "PAPER" & Chr(34) & ""))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", _
"PAPER1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Color", "R:=",
189, "G:=", 145, "B:=", 0), Array("NAME:Transparent", "Value:=", _
0.8))))

```

```

'-----
-----

```

```

oEditor.CreateRegion Array("NAME:RegionParameters",
"+XPaddingType:=", _
"Percentage Offset", "+XPadding:=", "15", "-XPaddingType:=",
"Percentage Offset", "-XPadding:=", _
"15", "+YPaddingType:=", "Percentage Offset", "+YPadding:=", "15",
"-YPaddingType:=", _

```

```

        "Percentage Offset", "-YPadding:=", "15", "+ZPaddingType:=",
"Percentage Offset", "+ZPadding:=", _
        "15", "-ZPaddingType:=", "Percentage Offset", "-ZPadding:=", "15"),
Array("NAME:Attributes", "Name:=", _
        "Region", "Flags:=", "Wireframe#", "Color:=", "(255 0 0)",
"Transparency:=", 0, "PartCoordinateSystem:=", _
        "Global", "UDMId:=", "", "MaterialValue:=", "" & Chr(34) & "vacuum"
& Chr(34) & "", "SolveInside:=", _
        true)

        oEditor.CreateRectangle Array("NAME:RectangleParameters",
"IsCovered:=", true, "XStart:=", _
        "70mm", "YStart:=", "22.1519mm", "ZStart:=", "0.04mm", "Width:=", "-
6.88mm", "Height:=", _
        "-0.04mm", "WhichAxis:=", "X"), Array("NAME:Attributes", "Name:=",
"Rectangle1", "Flags:=", _
        "", "Color:=", "(143 175 143)", "Transparency:=", 0,
"PartCoordinateSystem:=", _
        "Global", "UDMId:=", "", "MaterialValue:=", "" & Chr(34) & "vacuum"
& Chr(34) & "", "SurfaceMaterialValue:=", _
        "" & Chr(34) & "" & Chr(34) & "", "SolveInside:=", true,
"IsMaterialEditable:=", _
        true, "UseMaterialAppearance:=", false)
        oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",
Array("NAME:Geometry3DCmdTab", Array("NAME:PropServers", _
        "Rectangle1:CreateRectangle:1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:ZSize", "Value:=", _
        "(-1.6-0.04-0.035) mm"))))

'-----
-----

Set oModule = oDesign.GetModule("BoundarySetup")

        oModule.AssignRadiation Array("NAME:Rad1", "Objects:=",
Array("Region"), "IsIncidentField:=", _
        false, "IsEnforcedField:=", false, "IsFssReference:=", false,
"IsForPML:=", _
        false, "UseAdaptiveIE:=", false, "IncludeInPostproc:=", true)

        oModule.AssignLumpedPort Array("NAME:1", "Objects:=",
Array("Rectangle1"), "RenormalizeAllTerminals:=", _
        true, "DoDeembed:=", false, Array("NAME:Modes", Array("NAME:Mode1",
"ModeNum:=", 1, "UseIntLine:=", _
        true, Array("NAME:IntLine", "Start:=", Array("70mm", "18.7119mm", "-
1.635mm"), "End:=", Array( _
        "70mm", "18.7119mm", "0.03999999999999992mm))), "AlignmentGroup:=",
0, "CharImp:=", _
        "Zpi", "RenormImp:=", "50ohm")), "ShowReporterFilter:=", false,
"ReporterFilter:=", Array( _
        true), "Impedance:=", "50ohm")

'-----
-----

Set oModule = oDesign.GetModule("AnalysisSetup")

oModule.InsertSetup "HfssDriven", Array("NAME:Setup1", "AdaptMultipleFreqs:=",
_

```

```

    false, "Frequency:=", "6GHz", "MaxDeltaS:=", 0.02, "PortsOnly:=", false,
    "UseMatrixConv:=", _
    false, "MaximumPasses:=", 6, "MinimumPasses:=", 1,
    "MinimumConvergedPasses:=", _
    1, "PercentRefinement:=", 30, "IsEnabled:=", true, "BasisOrder:=", 1,
    "DoLambdaRefine:=", _
    true, "DoMaterialLambda:=", true, "SetLambdaTarget:=", false, "Target:=", _
    0.3333, "UseMaxTetIncrease:=", false, "PortAccuracy:=", 2, "UseABConPort:=",
    _
    false, "SetPortMinMaxTri:=", false, "UseDomains:=", false,
    "UseIterativeSolver:=", _
    false, "SaveRadFieldsOnly:=", false, "SaveAnyFields:=", true,
    "IESolverType:=", _
    "Auto", "LambdaTargetForIESolver:=", 0.15,
    "UseDefaultLambdaTgtForIESolver:=", _
    true, "RayDensityPerWavelength:=", 4, "MaxNumberOfBounces:=", 5,
    "InfiniteSphereSetup:=", _
    -1, "SkipSBRsolveDuringAdaptivePasses:=", true)
oModule.InsertFrequencySweep "Setup1", Array("NAME:Sweep", "IsEnabled:=",
true, "RangeType:=", _
"LinearStep", "RangeStart:=", "1GHz", "RangeEnd:=", "10GHz", "RangeStep:=",
_
"0.02GHz", "Type:=", "Interpolating", "SaveFields:=", false,
"SaveRadFields:=", _
false, "InterpTolerance:=", 0.5, "InterpMaxSolns:=", 250,
"InterpMinSolns:=", _
0, "InterpMinSubranges:=", 1, "ExtrapToDC:=", false, "InterpUseS:=", true,
"InterpUsePortImped:=", _
false, "InterpUsePropConst:=", true, "UseDerivativeConvergence:=", false,
"InterpDerivTolerance:=", _
0.2, "UseFullBasis:=", true, "EnforcePassivity:=", true,
"PassivityErrorTolerance:=", _
0.0001)

oDesign.AnalyzeAll

```

```

'-----
-----

```

```

Set oModule = oDesign.GetModule("RadField")
oModule.InsertFarFieldSphereSetup Array("NAME:Infinite Sphere1",
"UseCustomRadiationSurface:=", _
false, "ThetaStart:=", "0deg", "ThetaStop:=", "180deg", "ThetaStep:=",
"1deg", "PhiStart:=", _
"0deg", "PhiStop:=", "360deg", "PhiStep:=", "1deg", "UseLocalCS:=", false)

```

```

'-----
-----

```

```

Set oModule = oDesign.GetModule("ReportSetup")

oModule.CreateReport "S Parameter Plot 1", "Modal Solution Data", _
"Rectangular Plot", "Setup1 : Sweep", Array("Domain:=", "Sweep"),
Array("Freq:=", Array( _
"All")), Array("X Component:=", "Freq", "Y Component:=",
Array("dB(S(1,1))")), Array()
oModule.CreateReport "rE Plot 1", "Far Fields", "3D Polar Plot", _
"Setup1 : LastAdaptive", Array("Context:=", "Infinite Sphere1"),
Array("Phi:=", Array( _
"All"), "Theta:=", Array("All"), "Freq:=", Array("6GHz")), Array("Phi
Component:=", _

```

```

    "Phi", "Theta Component:=", "Theta", "Mag Component:=",
    Array("dB(rETotal)")), Array()

    oModule.CreateReport "Z Parameter Plot 1", "Modal Solution Data", _
    "Rectangular Plot", "Setup1 : Sweep", Array("Domain:=", "Sweep"), _
    Array("Freq:=", Array( _
    "All")), Array("X Component:=", "Freq", "Y Component:=", Array("re(Z(1,1))",
    "im(Z(1,1)")), Array()

'-----
-----

    set WshShell = WScript.CreateObject("WScript.Shell")
    WshShell.SendKeys "^d"

    Set oProject = oDesktop.SetActiveProject("Project2")
    oProject.SaveAs var3, true
    oProject.Close

'-----
-----

    a=a+1
    b=b+8
    var2=Replace(numero,"188",b)
    var3=Replace(guarda,"188",b)
    var4=Replace(ruta,"188",b)

    solido1=Replace(solido1,(b-8)&"_",b&"_")
    solido2=Replace(solido2,(b-8)&"_",b&"_")
    solido3=Replace(solido3,(b-8)&"_",b&"_")
    solido4=Replace(solido4,(b-8)&"_",b&"_")

'-----
-----

next

```

Algoritmo 2: Control de mecanismo para el desplegado y pegado de la antena origami

```

int retardo=3;           // Tiempo de retardo en milisegundos (Velocidad del
Motor)
int dato_rx;            // valor recibido en grados
int numero_pasos = 0;   // Valor en grados donde se encuentra el motor
String leeCadena;       // Almacena la cadena de datos recibida
int led1=5;
int led2=6;
int led3=7;
int var=0;

void setup() {
Serial.begin(9600);     // inicializamos el puerto serie a 9600 baudios
pinMode(11, OUTPUT);   // Pin 11 conectar a IN4
pinMode(10, OUTPUT);   // Pin 10 conectar a IN3
pinMode(9, OUTPUT);    // Pin 9 conectar a IN2
pinMode(8, OUTPUT);    // Pin 8 conectar a IN1
pinMode(led1, OUTPUT);
pinMode(led2, OUTPUT);
pinMode(led3, OUTPUT);
}

void loop() {

```

```

    digitalWrite(led3,HIGH);
    digitalWrite(led1,LOW);
    digitalWrite(led2,LOW);

    while (Serial.available()) { // Leer el valor enviado por el Puerto
serial
        delay(retardo);
        char c = Serial.read(); // Lee los caracteres
        leeCadena += c; // Convierte Caracteres a cadena de caracteres
    }
    if (leeCadena.length()>0){

        dato_rx = (leeCadena.toInt()*112)/(-5); // Convierte Cadena de
caracteres a Enteros
        Serial.print(dato_rx); // Envia valor en Grados

        Serial.println(" Grados");
        Serial.print((dato_rx*5)/112);

        Serial.println(" mm ");
        delay(retardo);
        dato_rx = (dato_rx * 1.4222222222); // Ajuste de 512 vueltas a los 360
grados

        if (dato_rx<1) {
            digitalWrite(led2,HIGH);
            digitalWrite(led1,LOW);
        }

        if (dato_rx>var){
            digitalWrite(led1,HIGH);
            digitalWrite(led2,LOW);
        }

        var=dato_rx;

    }

    while (dato_rx>numero_pasos){ // Giro hacia la izquierda en grados
        paso_izq();
        numero_pasos = numero_pasos + 1;
    }
    while (dato_rx<numero_pasos){ // Giro hacia la derecha en grados
        paso_der();
        numero_pasos = numero_pasos -1;
    }
    leeCadena = ""; // Inicializamos la cadena de caracteres recibidos
    apagado(); // Apagado del Motor para que no se caliente
} //////////////////////////////////////////////////////////////////// Fin del Loop ////////////////////////////////////////////////////////////////////

void paso_der(){ // Pasos a la derecha
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(8, HIGH);
    delay(retardo);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(8, LOW);
}

```

```

    delay(retardo);
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
    delay(retardo);
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(8, HIGH);
    delay(retardo);
}

void paso_izq() {          // Pasos a la izquierda
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
    delay(retardo);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(8, LOW);
    delay(retardo);
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(8, HIGH);
    delay(retardo);
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(8, HIGH);
    delay(retardo);
}

void apagado() {          // Apagado del Motor
    digitalWrite(11, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
}

```

Algoritmo 3: Automatización del dibujo de la antena

Private Sub CommandButton1_Click()

UserForm1.Hide

'-----Variables de Datos-----

Dim h As Double 'Define el alto de un piso

Dim lado As Double 'Define el lado del pentagono

Dim N As Double 'Define el numero de pisos de la torre

Dim grosor As Double 'Define el grosor de la estructura de la torre

Dim cu As Double 'Define el ancho de la linea de cobre

Dim cu_grosor As Double 'Define el espesor de la linea de cobre

'-----Obtencion de Valores de Variables-----

```

h = Val(TextBox1.Text)
lado = Val(TextBox2.Text)
N = Val(TextBox3.Text) - 1
grosor = Val(TextBox4.Text)
cu = Val(TextBox5.Text)
cu_grosor = Val(TextBox6.Text)

'-----Valores por Defecto de Variables -----
'h = 25 'Altura de 25mm por piso
lado = 35
'N = 0
grosor = 0.16
cu = 6.88
cu_grosor = 0.04
'-----Variables de Formulas -----
Dim r As Double 'Define el radio interno inscrito del pentagono
Dim r2 As Double 'Define el radio considerando el espesor de la estructura
Dim r3 As Double 'Define el radio considerando el espesor del cobre
Dim rt As Double 'Define la rotacion de un piso con respecto al siguiente, en grados
Dim rtg As Double 'Define la rotacion de un piso con respecto al siguiente, en radianes
Dim pi As Double 'Define la constante PI
Dim k As Double 'Define una constante en funcion del ancho de la linea de cobre
Dim v As Double 'Define constante de variacion entre 2 angulos del pentagono
'-----Declaracion de Constantes -----
pi = 3.14159265358
a1 = (18) * pi / 180 'Define el angulo inicial para Dibujo
a2 = (90) * pi / 180 'Define el angulo secundario para Dibujo
a5 = (360 - 54) * pi / 180
v = a2 - a1 'Define variacion entre 2 lados vertices del pentagono
'-----Formulas Iniciales -----
r = lado / (2 * (Math.Sin(36 * pi / 180)))
Dim x1 As Double
Dim y1 As Double
Dim x2 As Double
Dim y2 As Double
Dim l As Double
l = lado
x1 = (r * Math.Cos(0))
y1 = (r * Math.Sin(0))
x2 = (y1 * (-h ^ 4 + 2 * h ^ 2 * l ^ 2 - 2 * h ^ 2 * r ^ 2 - 2 * h ^ 2 * x1 ^ 2 - 2 * h ^ 2 * y1 ^ 2 - l ^ 4 + 2 * l ^ 2 * r ^ 2 + 2 * l ^ 2 * x1 ^ 2 + 2 * l ^ 2 * y1 ^ 2 - r ^ 4 + 2 * r ^ 2 * x1 ^ 2 + 2 * r ^ 2 * y1 ^ 2 - x1 ^ 4 - 2 * x1 ^ 2 * y1 ^ 2 - y1 ^ 4) ^ (1 / 2) + h ^ 2 * x1 - l ^ 2 * x1 + r ^ 2 * x1 + x1 * y1 ^ 2 + x1 ^ 3) / (2 * (x1 ^ 2 + y1 ^ 2))
y2 = Math.Sqrt(r ^ 2 - x2 ^ 2)

rt = (Math.Atn(y2 / x2)) * 180 / pi
rtg = (72 - rt) * pi / 180
MsgBox rtg
'rt = (0.00007775 * (h ^ 4)) - (0.00125487 * (h ^ 3)) - (0.0505425 * (h ^ 2)) + (2.24215562 * h) - 6.85130935
'Ecuaciones Empiricas
'rtg = ((rt * pi) / 180)

r2 = r + grosor
r3 = r2 + cu_grosor
k = ((lado - (lado - cu)) / lado)

'-----Creacion de capas de Trabajo -----
Dim Capa1 As AcadLayer
Dim Capa2 As AcadLayer

Set Capa1 = ThisDrawing.Layers.Add("Estructura")
Set Capa2 = ThisDrawing.Layers.Add("Cobre")
ThisDrawing.ActiveLayer = Capa1
Dim ColorEstructura As New AcadAcCmColor
Call ColorEstructura.SetRGB(246, 235, 190)
ThisDrawing.ActiveLayer.TrueColor = ColorEstructura

'----- Dibujo de la Estructura de la Torre -----

```

```

For m = 0 To N
Dim mm As Integer
Dim i As Integer
mm = m + 1
ThisDrawing.ActiveLayer = Capa1
For i = 1 To 5

'Triangulo Inferior Interno
Dim tr1(0 To 8) As Double
tr1(0) = r * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * (m))); tr1(1) = r * Math.Sin((a1 - (v * i)) + (rtg * (m))); tr1(2) = h * m
tr1(3) = r * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (m))); tr1(4) = r * Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (m))); tr1(5) = h * m
tr1(6) = r * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); tr1(7) = r * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); tr1(8)
= h + (h * m)

Dim triangulo1 As Acad3DPolyline
Set triangulo1 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(tr1)
triangulo1.Closed = True

'Triangulo Inferior Externo
Dim tr11(0 To 8) As Double
tr11(0) = r2 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1))); tr11(1) = r2 * Math.Sin((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)));
tr11(2) = h * m
tr11(3) = r2 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1))); tr11(4) = r2 * Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)));
tr11(5) = h * m
tr11(6) = r2 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); tr11(7) = r2 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm));
tr11(8) = h + (h * m)

Dim triangulo11 As Acad3DPolyline
Set triangulo11 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(tr11)
triangulo11.Closed = True

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

'Triangulo Superior Interno
Dim tr2(0 To 8) As Double
tr2(0) = r * Math.Cos((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1))); tr2(1) = r * Math.Sin((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm -
1))); tr2(2) = h * m
tr2(3) = r * Math.Cos(a5 - (v * i) + (rtg * mm)); tr2(4) = r * Math.Sin(a5 - (v * i) + (rtg * mm)); tr2(5) = h + (h *
m)
tr2(6) = r * Math.Cos(a1 - (v * i) + (rtg * mm)); tr2(7) = r * Math.Sin(a1 - (v * i) + (rtg * mm)); tr2(8) = h + (h *
m)

Dim triangulo2 As Acad3DPolyline
Set triangulo2 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(tr2)
triangulo2.Closed = True

'Triangulo Superior Externo
Dim tr22(0 To 8) As Double
tr22(0) = r2 * Math.Cos((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1))); tr22(1) = r2 * Math.Sin((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg *
(mm - 1))); tr22(2) = h * m
tr22(3) = r2 * Math.Cos(a5 - (v * i) + (rtg * mm)); tr22(4) = r2 * Math.Sin(a5 - (v * i) + (rtg * mm)); tr22(5) = h +
(h * m)
tr22(6) = r2 * Math.Cos(a1 - (v * i) + (rtg * mm)); tr22(7) = r2 * Math.Sin(a1 - (v * i) + (rtg * mm)); tr22(8) = h +
(h * m)

Dim triangulo22 As Acad3DPolyline
Set triangulo22 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(tr22)
triangulo22.Closed = True

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

Next
'-----Union de la Estructura -----
Capa2.LayerOn = False

```

```

ThisDrawing.Application.ZoomAll
ThisDrawing.SendCommand "UnionEstructura" & vbCr 'Operacion de Union
Capa2.LayerOn = True
'-----Cambio de Capa de Trabajo -----
ThisDrawing.ActiveLayer = Capa2

Dim ColorCobre As New AcadAcCmColor
Call ColorCobre.SetRGB(213, 89, 3)
ThisDrawing.ActiveLayer.TrueColor = ColorCobre
'-----Dibujo de la Linea de Cobre -----
i = 0
For i = 1 To 5

If i < 5 Then

'Lineas Inferiores Internas
Dim mic1(0 To 8) As Double
mic1(0) = r2 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)): mic1(1) = r2 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)):
mic1(2) = h + (h * m)
mic1(3) = mic1(0) + k * ((r2 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic1(0)): mic1(4) = mic1(1) + k * ((r2
* Math.Sin((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic1(1)): mic1(5) = mic1(2) + k * ((h * m) - mic1(2))
mic1(6) = mic1(0) + k * ((r2 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic1(0)): mic1(7) = mic1(1) + k * ((r2
* Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic1(1)): mic1(8) = mic1(2) + k * ((h * m) - mic1(2))

Dim micr1 As Acad3DPolyline
Set micr1 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic1)
micr1.Closed = True

'Lineas Inferiores Externas
Dim mic3(0 To 8) As Double
mic3(0) = r3 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)): mic3(1) = r3 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)):
mic3(2) = h + (h * m)
mic3(3) = mic3(0) + k * ((r3 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic3(0)): mic3(4) = mic3(1) + k * ((r3
* Math.Sin((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic3(1)): mic3(5) = mic3(2) + k * ((h * m) - mic3(2))
mic3(6) = mic3(0) + k * ((r3 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic3(0)): mic3(7) = mic3(1) + k * ((r3
* Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic3(1)): mic3(8) = mic3(2) + k * ((h * m) - mic3(2))

Dim micr3 As Acad3DPolyline
Set micr3 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic3)
micr3.Closed = True

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

'Lineas Superiores Internas
Dim mic4(0 To 11) As Double
mic4(0) = r2 * Math.Cos(a1 - (v * i) + (rtg * mm)): mic4(1) = r2 * Math.Sin(a1 - (v * i) + (rtg * mm)): mic4(2) =
h + (h * m)
mic4(3) = r2 * Math.Cos(a5 - (v * i) + (rtg * mm)): mic4(4) = r2 * Math.Sin(a5 - (v * i) + (rtg * mm)): mic4(5) =
h + (h * m)
mic4(6) = mic4(3) + k * ((r2 * Math.Cos((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic4(3)): mic4(7) = mic4(4) + k
* ((r2 * Math.Sin((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic4(4)): mic4(8) = mic4(5) + k * ((h * m) - mic4(5))
mic4(9) = mic4(0) + k * ((r2 * Math.Cos((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic4(0)): mic4(10) = mic4(1) +
k * ((r2 * Math.Sin((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic4(1)): mic4(11) = mic4(2) + k * ((h * m) - mic4(2))

Dim micr4 As Acad3DPolyline
Set micr4 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic4)
micr4.Closed = True

'Lineas Superiores Externas
Dim mic5(0 To 11) As Double
mic5(0) = r3 * Math.Cos(a1 - (v * i) + (rtg * mm)): mic5(1) = r3 * Math.Sin(a1 - (v * i) + (rtg * mm)): mic5(2) =
h + (h * m)
mic5(3) = r3 * Math.Cos(a5 - (v * i) + (rtg * mm)): mic5(4) = r3 * Math.Sin(a5 - (v * i) + (rtg * mm)): mic5(5) =
h + (h * m)

```

```

mic5(6) = mic5(3) + k * ((r3 * Math.Cos((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic5(3)); mic5(7) = mic5(4) + k
* ((r3 * Math.Sin((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic5(4)); mic5(8) = mic5(5) + k * ((h * m) - mic5(5))
mic5(9) = mic5(0) + k * ((r3 * Math.Cos((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic5(0)); mic5(10) = mic5(1) +
k * ((r3 * Math.Sin((a1 - (v * (i - 1))) + (rtg * (mm - 1)))) - mic5(1)); mic5(11) = mic5(2) + k * ((h * m) - mic5(2))

```

```

Dim mic5 As Acad3DPolyline
Set mic5 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic5)
mic5.Closed = True

```

```

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

```

```

End If

```

```

If i = 5 Then
'Linea Inferior Interna
Dim mic(0 To 11) As Double
mic(0) = r2 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1))); mic(1) = r2 * Math.Sin((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)));
mic(2) = h * m
mic(3) = r2 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); mic(4) = r2 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm));
mic(5) = h + (h * m)
mic(6) = mic(3) + (k * ((r2 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic(3)); mic(7) = mic(4) + (k * ((r2 *
Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic(4)); mic(8) = mic(5) + (k * ((h * m) - mic(5))
mic(9) = mic(0) + (k * ((r2 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic(0)); mic(10) = mic(1) + (k * ((r2
* Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic(1)); mic(11) = mic(2) + (k * ((h * m) - mic(2))

```

```

Dim micr As Acad3DPolyline
Set micr = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(micr)
micr.Closed = True

```

```

'Linea Inferior Externa
Dim mic2(0 To 11) As Double
mic2(0) = r3 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1))); mic2(1) = r3 * Math.Sin((a1 - (v * i)) + (rtg * (mm -
1))); mic2(2) = h * m
mic2(3) = r3 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); mic2(4) = r3 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm));
mic2(5) = h + (h * m)
mic2(6) = mic2(3) + (k * ((r3 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic2(3)); mic2(7) = mic2(4) + (k *
((r3 * Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic2(4)); mic2(8) = mic2(5) + (k * ((h * m) - mic2(5))
mic2(9) = mic2(0) + (k * ((r3 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic2(0)); mic2(10) = mic2(1) + (k
* ((r3 * Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic2(1)); mic2(11) = mic2(2) + (k * ((h * m) - mic2(2))

```

```

Dim mic2 As Acad3DPolyline
Set mic2 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic2)
mic2.Closed = True

```

```

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

```

```

'Linea Superior Interna

```

```

Dim mic6(0 To 8) As Double
mic6(0) = r2 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); mic6(1) = r2 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm));
mic6(2) = h + (h * m)
mic6(3) = mic6(0) + k * ((r2 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * mm))) - mic6(0)); mic6(4) = mic6(1) + k * ((r2 *
Math.Sin(a1 - (v * i) + (rtg * mm))) - mic6(1)); mic6(5) = mic6(2) + k * ((h + (h * m)) - mic6(2))
mic6(6) = mic6(0) + k * ((r2 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic6(0)); mic6(7) = mic6(1) + k * ((r2
* Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic6(1)); mic6(8) = mic6(2) + k * ((h * m) - mic6(2))

```

```

Dim mic6 As Acad3DPolyline
Set mic6 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic6)
mic6.Closed = True

```

```

'Linea Superior Externa

```

```

Dim mic7(0 To 8) As Double

```

```

mic7(0) = r3 * Math.Cos(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm)); mic7(1) = r3 * Math.Sin(a1 - (v * (i + 1)) + (rtg * mm));
mic7(2) = h + (h * m)
mic7(3) = mic7(0) + k * ((r3 * Math.Cos((a1 - (v * i)) + (rtg * mm))) - mic7(0)); mic7(4) = mic7(1) + k * ((r3 *
Math.Sin(a1 - (v * i) + (rtg * mm))) - mic7(1)); mic7(5) = mic7(2) + k * ((h + (h * m)) - mic7(2))
mic7(6) = mic7(0) + k * ((r3 * Math.Cos((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic7(0)); mic7(7) = mic7(1) + k * ((r3
* Math.Sin((a2 - (v * i)) + (rtg * (mm - 1)))) - mic7(1)); mic7(8) = mic7(2) + k * ((h * m) - mic7(2))

```

```

Dim micr7 As Acad3DPolyline
Set micr7 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(mic7)
micr7.Closed = True

```

```

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

```

```

End If

```

```

Next
Next

```

```

'-----Dibujo de Linea Strip de Alimentacion-----

```

```

Dim strip(0 To 17) As Double
strip(0) = 28.4868: strip(1) = 9.2559: strip(2) = 0
strip(3) = 32.7268: strip(4) = 15.2719: strip(5) = 0
strip(6) = 70: strip(7) = 15.2719: strip(8) = 0
strip(9) = 70: strip(10) = 22.1519: strip(11) = 0
strip(12) = 29.2213: strip(13) = 22.1519: strip(14) = 0
strip(15) = 22.8871: strip(16) = 13.3243: strip(17) = 0
Dim pstrip As Acad3DPolyline
Set pstrip = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(strip)
pstrip.Closed = True

```

```

Dim strip1(0 To 17) As Double
strip1(0) = 28.4868: strip1(1) = 9.2559: strip1(2) = 0.04
strip1(3) = 32.7268: strip1(4) = 15.2719: strip1(5) = 0.04
strip1(6) = 70: strip1(7) = 15.2719: strip1(8) = 0.04
strip1(9) = 70: strip1(10) = 22.1519: strip1(11) = 0.04
strip1(12) = 29.2213: strip1(13) = 22.1519: strip1(14) = 0.04
strip1(15) = 22.8871: strip1(16) = 13.3243: strip1(17) = 0.04

```

```

Dim pstrip1 As Acad3DPolyline
Set pstrip1 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(strip1)
pstrip1.Closed = True

```

```

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

```

```

'----- Union de la Linea de Cobre -----

```

```

Capal.LayerOn = False
ThisDrawing.Application.ZoomAll
ThisDrawing.SendCommand "UnionEstructura" & vbCr 'Operacion de Seleccion
Capal.LayerOn = True

```

```

'----- Dibujo de la Baquelita -----

```

```

Dim bqancho As Integer
Dim bqlado As Integer
Dim bqespesor As Double

```

```

bqancho = 140 ' Valor Variable
bqlado = 140
bqespesor = 1.6

```

```

'-----Capa de Sustrato-----

```

```

Dim Capa3 As AcadLayer
Set Capa3 = ThisDrawing.Layers.Add("Sustrato")

```

ThisDrawing.ActiveLayer = Capa3

Dim ColorSustrato As New AcadAcCmColor
Call ColorSustrato.SetRGB(223, 192, 37)
ThisDrawing.ActiveLayer.TrueColor = ColorSustrato

Dim baq(0 To 11) As Double
baq(0) = bqlado / 2: baq(1) = bqancho / 2: baq(2) = 0
baq(3) = bqlado / 2: baq(4) = -bqancho / 2: baq(5) = 0
baq(6) = -bqlado / 2: baq(7) = -bqancho / 2: baq(8) = 0
baq(9) = -bqlado / 2: baq(10) = bqancho / 2: baq(11) = 0

Dim baquelita As Acad3DPolyline
Set baquelita = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(baq)
baquelita.Closed = True

Dim baq1(0 To 11) As Double
baq1(0) = bqlado / 2: baq1(1) = bqancho / 2: baq1(2) = -bquespesor
baq1(3) = bqlado / 2: baq1(4) = -bqancho / 2: baq1(5) = -bquespesor
baq1(6) = -bqlado / 2: baq1(7) = -bqancho / 2: baq1(8) = -bquespesor
baq1(9) = -bqlado / 2: baq1(10) = bqancho / 2: baq1(11) = -bquespesor

Dim baq1uelita1 As Acad3DPolyline
Set baq1uelita1 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(baq1)
baq1uelita1.Closed = True

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado

'----- Dibujo del Cobre de la Baquelita _____

Dim cubqquespesor As Double
cubqquespesor = 0.035

'Capa de Cobre de Baquelita
ThisDrawing.ActiveLayer = Capa2
Dim cubaq(0 To 11) As Double
cubaq(0) = bqlado / 2: cubaq(1) = bqancho / 2: cubaq(2) = -bquespesor
cubaq(3) = bqlado / 2: cubaq(4) = -bqancho / 2: cubaq(5) = -bquespesor
cubaq(6) = -bqlado / 2: cubaq(7) = -bqancho / 2: cubaq(8) = -bquespesor
cubaq(9) = -bqlado / 2: cubaq(10) = bqancho / 2: cubaq(11) = -bquespesor
Dim cubaquelita As Acad3DPolyline
Set cubaquelita = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(cubaq)
cubaquelita.Closed = True

Dim cubaq1(0 To 11) As Double
cubaq1(0) = bqlado / 2: cubaq1(1) = bqancho / 2: cubaq1(2) = -bquespesor - cubqquespesor
cubaq1(3) = bqlado / 2: cubaq1(4) = -bqancho / 2: cubaq1(5) = -bquespesor - cubqquespesor
cubaq1(6) = -bqlado / 2: cubaq1(7) = -bqancho / 2: cubaq1(8) = -bquespesor - cubqquespesor
cubaq1(9) = -bqlado / 2: cubaq1(10) = bqancho / 2: cubaq1(11) = -bquespesor - cubqquespesor

Dim cubaq1uelita1 As Acad3DPolyline
Set cubaq1uelita1 = AutoCAD.Application.ActiveDocument.ModelSpace.Add3DPoly(cubaq1)
cubaq1uelita1.Closed = True

ThisDrawing.SendCommand "AI_SELALL" & vbCr 'Operacion de Seleccion
ThisDrawing.SendCommand "myloft" & vbCr 'Operacion de Solevado
'-----Creacion de Grupo de Seleccion _____

Dim Seleccion As AcadSelectionSet
Dim Modo As Integer
Modo = acSelectionSetAll
Set Seleccion = ThisDrawing.SelectionSets.Add("SET1")
Seleccion.Select Modo
'-----Exportacion a archivo SAT _____

Dim Direccion As String
Direccion = "C:\Users\renova\Documents\Archivos_SAT Torre\"

```
Dim Direccion_Nombre As String
Const Nombre As String = "Torre_25mm"

Direccion_Nombre = Direccion & Nombre
ThisDrawing.Export Direccion_Nombre, "SAT", Seleccion
  MsgBox "Numero " & vbCrLf & Seleccion.Count 'Mensaje de Comprobacion
  ThisDrawing.SelectionSets("SET1").Delete 'Borra la Seleccion Anterior Grabada
End Sub

-----
Private Sub CommandButton2_Click()
Unload Me
End Sub
```
