



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE
COMUNICACIÓN

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y REDES DE
COMUNICACIÓN

TEMA:

**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ANTENA COMPACTA TIPO
PARCHE YAGI-UDA PARA SENSORES DEL IoT DE 5G”**

AUTOR: HINOJOSA SUÁREZ OSCAR NORBERTO

DIRECTOR: MSc. HERNAN MAURICIO DOMÍNGUEZ LIMAICO

IBARRA – ECUADOR

2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.

Identificación de la obra

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	040166979-1		
APELLIDOS Y NOMBRES	Hinojosa Suárez Oscar Norberto		
DIRECCIÓN	Ciudadela “La Victoria”		
E-MAIL	onhinojosas@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO	062986738	TELÉFONO MÓVIL	0979100722

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	“Diseño y fabricación de una antena compacta tipo parche Yagi-Uda para sensores del IoT de 5G”
AUTOR	Hinojosa Suárez Oscar Norberto
FECHA	Noviembre - 2022
PROGRAMA	Pregrado
TÍTULO	Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación
DIRECTOR	Ing. Hernán Mauricio Domínguez Limaico, MsC.

Constancias



Constancias

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 07 del mes de Diciembre de 2022

EL AUTOR

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Oscar Norberto Hinojosa Suárez', is written over a dotted line.

Hinojosa Suárez Oscar Norberto

CI: 040166979-1

Certificación

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Certificación

MAGISTER MAURICIO DOMINGUEZ, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA:

Que, el presente trabajo de Titulación "DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ANTENA COMPACTA TIPO PARCHE YAGI-UDA PARA SENSORES DEL IOT DE 5G". Ha sido desarrollado por el señor Oscar Norberto Hinojosa Suárez, bajo mi supervisión.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor de la verdad.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H. Domínguez', is written over a dotted line.

Ing. Hernán Mauricio Domínguez Limaico, MsC.

100237930-1

DIRECTOR

Agradecimiento

Agradezco la confianza y el apoyo brindado a mis amados padres, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me han demostrado su amor y apoyo, corrigiendo mis errores y celebrando mis triunfos, este título es prueba de todo el sacrificio que han dado por mí.

Agradezco a Dios por su infinito amor y por haberme otorgado una maravillosa familia, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad, sacrificio y quien a su vez son motivo fundamental para siempre seguir adelante, por ello expreso mi agradecimiento a mi mujer Lynda Salgado y mi hijo Valentino Hinojosa.

Mi agradecimiento total a mi tutor Ing. Mauricio Dominguez y de igual manera al Ing. Jaime Michilena, como opositor del trabajo de titulación, por su apoyo, paciencia y conocimientos impartidos, lo que permitió el logro del presente proyecto.

Mi agradecimiento a la empresa Cine Cable TV, jefes y compañeros de trabajo quienes me abrieron las puertas de la empresa para empezar a desarrollarme laboralmente y poder aplicar todos los conocimientos adquiridos.

Agradezco a las personas e instituciones que colaboraron en la elaboración y culminación de la presente investigación.

Oscar Hinojosa

Dedicatoria

Dedicó con todo mi amor, a mi mayor motivo para seguir adelante, mi hijo Valentino Hinojosa y a mi mujer Lynda Salgado, quienes son mi inspiración y fuerza para día a día luchar por ser mejor; su acompañamiento y apoyo diario fueron fundamentales para lograr esta meta.

Dedicó con mucho cariño a mis padres, Oscar Hinojosa y Gladys Suárez, por su apoyo económico y moral incondicional, quienes desde pequeño me enseñaron con amor y ternura el valor de la honestidad, humildad y a elegir el camino del bien.

A la memoria de mis abuelitos, quienes dejaron en mí las mejores enseñanzas de vida y toda mi familia a quienes amo y siempre han estado presentes en el transcurso de mi vida brindando su amor, apoyo y alientos de superación.

Con cariño, Oscar Hinojosa

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Identificación de la obra	1
Constancias	2
Certificación	3
Agradecimiento	4
Dedicatoria	5
Resumen	9
Abstract	10
1. CAPÍTULO I:	11
1.1. Introducción.....	11
1.2. Tema.....	11
1.3. Problema.....	11
1.4. Objetivos.....	13
1.4.1. Objetivo General.....	13
1.4.2. Objetivos Específicos.....	13
1.5. Alcance.....	13
1.6. Justificación.....	14
2. CAPÍTULO II:	16
2.1. Teoría de antenas.....	16
2.1.1. Definición de antena.....	16
2.1.2. Ancho de banda.....	17
2.1.3. Ancho de Haz.....	18
2.1.4. Diagrama de Radiación.....	19
2.1.5. Intensidad de Radiación.....	21
2.1.6. Directividad.....	22
2.1.7. Ganancia.....	22
2.1.8. Impedancia.....	23
2.1.9. Polarización.....	24
2.2. Tipos de antenas.....	25
2.2.1. Antenas de alambre.....	25
2.2.2. Antenas de apertura.....	26
2.2.3. Antenas de microcinta (Parche).....	27
2.3. Antenas Parche.....	28
2.3.1. Principios básicos de operación.....	28
2.3.2. Métodos de alimentación de antena parche.....	31
2.3.2.1. Alimentación por sonda coaxial.....	31
2.3.2.2. Alimentación por línea parche.....	32
2.3.3. Ventajas y Desventajas de Antenas Parche.....	33
2.4. Antenas en Tecnología 5G.....	34
2.4.1. Asignación del espectro de radiofrecuencias para 5G.....	36
2.4.2. Infraestructura de 5G.....	37
2.4.3. Aplicaciones que surgen de la red 5G.....	38
2.4.4. Internet de las cosas (IoT).....	39
2.4.5. Infraestructura del IoT.....	40
3. CAPÍTULO III:	44
3.1. Descripción general.....	44
3.2. Metodología de diseño.....	45
3.2.1. Requisitos y Requerimientos.....	46

	2
3.2.2.	Elección de Hardware50
3.2.3.	Selección del sustrato.....50
3.2.4.	Diseño del Proyecto52
3.2.5.	Arquitectura del proyecto52
3.3.	Principios de diseño y cálculos de antena.....53
3.3.1.	Ancho del parche (W).....53
3.3.2.	Dieléctrico efectivo (ϵ_{eff})54
3.3.3.	Longitud efectiva (L_{eff}).....54
3.3.4.	Extensión de la longitud del plano de tierra (ΔL).....55
3.3.5.	Longitud del parche (L)55
3.3.6.	Cálculo del plano de tierra de la antena (L_g, W_g).....56
3.4.	Simulación de la antena base – etapa 1.....57
3.4.1.	Proceso de asignación de propiedades58
3.4.2.	Resultados de la antena parche yagi-uda– etapa 165
3.5.	Simulación de la antena parche tipo Yagi – Uda – etapa 266
3.5.1.	Resultados de la antena parche tipo Yagi-Uda – etapa 2.....67
3.6.	Simulación de la antena parche tipo Yagi – Uda - etapa 369
3.6.1.	Resultados de la antena parche tipo Yagi-Uda – etapa 3.....70
3.7.	Simulación de la antena microsip tipo Yagi-Uda – etapa final.71
3.7.1.	Efecto de la modificación de los tres directores (D_1, D_2 y D_3).....72
3.7.2.	Resultados:.....74
3.7.3.	Efecto de integrar una reflexión juntamente con línea de alimentación.....75
3.7.4.	Resultados:.....78
3.7.5.	Efecto de variar la dimensión de la altura (h) del sustrato FR-479
3.7.6.	Resultados82
3.8.	Dimensiones de la antena parche tipo Yagi-Uda – etapa final83
3.9.	Resultados de la antena yagi-uda – etapa final84
3.9.1.	Parámetros S (Coeficiente de reflexión y Ancho de banda)85
3.9.1.1.	Resultados parámetros S87
3.9.2.	Relación de Onda Estacionaria (ROE)88
3.9.2.1.	Resultados relación onda estacionaria (ROE).....89
3.9.3.	Retardo de Grupo (GD)89
3.9.3.1.	Resultados retardo de grupo (GD)90
3.9.4.	Patrón de Radiación91
3.9.4.1.	Resultados patrón de radiación93
3.9.5.	Densidad de corrientes superficiales en Magnitud94
3.9.5.1.	Resultados de la densidad de corrientes superficiales (magnitud).....96
3.9.6.	Densidad de corrientes superficial respecto al Vector96
3.9.6.1.	Resultados de la densidad de corrientes superficiales (vector).....98
4.	CAPÍTULO IV:.....100
4.1.	Exportar diseño de antena al software de diseño estructural100
4.2.	Creación de la plantilla de la antena Parche tipo Yagi-Uda102
4.3.	Impresión de la plantilla – Formato A4103
4.4.	Proceso de transferencia al sustrato FR-4104
4.5.	Proceso de revelado104
4.6.	Resultado Antena Parche tipo Yagi – Uda105
4.7.	Proceso de soldadura.....105
5.	CAPÍTULO V:.....106
5.1.	Cronograma de Pruebas106

5.2.	Metodología y procedimiento de la medición de antena	108
5.2.1.	Detalles generales de la antena parche tipo Yagi-Uda.....	110
5.2.2.	Objetivo.....	110
5.2.3.	Metodología de Prueba	110
5.2.4.	Configuración para prueba (Parámetros S11).....	110
5.2.5.	Diagrama de la configuración de la prueba	111
5.3.	Resultados de pruebas	112
5.3.1.	Parámetros S	112
5.3.2.	Ancho de Banda.....	113
5.4.	Resultados Finales– antena parche tipo Yagi-Uda	114
5.5.	Resultado en base a la FCC §Parte 21-32. C (1) y (2).....	116
5.6.	Resumen de resultados de las pruebas realizadas	117
6.	CONCLUSIONES	119
7.	RECOMENDACIONES	121
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	122
9.	ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transmisión y recepción de una antena.....	17
Figura 2. Anchos de haz de una antena representados a) en el espacio b) polar.	18
Figura 3. Diagramas de radiación en una antena.	19
Figura 4. a) Lóbulos de radiación y anchura de haz del diagrama de radiación. b) Diagrama lineal del patrón de radiación con lóbulos y anchuras de haz.	20
Figura 5. a). Diagrama de radiación en coordenadas polares b). Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas.	21
Figura 6. Onda Electromagnética con sus componentes del campo electromagnético.	25
Figura 7. Tipos de antenas de alambre a) Dipolo, b) bucle circular y c) Helicoidal.	26
Figura 8. Tipo de antenas de apertura a) piramidal b) circular c) rectangular.	27
Figura 9. Antenas Parche con a) Parche Rectangular b) Parche Circular.....	27
Figura 10. Estructura básica de antena parche parche.	29
Figura 11. Campo eléctrico de contorno.	29
Figura 12. Antena parche parche.	30
Figura 13. Distribución de campo eléctrico.	30
Figura 14. Potencia radiada.....	31
Figura 15. Antena parche parche alimentado por conector coaxial.....	32
Figura 16. Antena parche parche alimentado por línea parche.....	32
Figura 17. Impedancia en el borde del parche.	33
Figura 18. Sistema 5G.....	35
Figura 19. Representación de una red heterogénea para 5G.....	37
Figura 20. Representación del Internet de las Cosas (IoT).....	39
Figura 21. Arquitectura del Internet de las Cosas (IoT), Modelo de referencia según la ITU. ..	41
Figura 22. Modelo tipo cascada.....	45
Figura 23. Arquitectura del proyecto.....	52
Figura 24. Dimensión que representa.....	54
Figura 25. Longitud del parche.....	55
Figura 26. Ancho y largo del plano de tierra.....	56
Figura 27. Modelo base de la antena parche.....	58
Figura 28. Asignación de propiedad al parche.....	58
Figura 29. Asignación de perímetro eléctrico – parche y línea parche.....	59
Figura 30. Asignación del perímetro eléctrico – plano de tierra.....	59
Figura 31. Caja de radiación.....	60
Figura 32. Asignación de la caja de radiación.....	60
Figura 33. Asignación de propiedad de radiación.....	61
Figura 34. Configuración del puerto.....	61
Figura 35. Verificar el puerto asignado.....	62
Figura 36. Configurar el análisis de la solución.....	62
Figura 37. Configuración del Setup.....	63
Figura 38. Configuración de los saltos de frecuencia.....	64
Figura 39. Validador con error de configuración.....	64
Figura 40. Parámetros S – Antena base.....	65
Figura 41. Diagrama de Radiación – modelo base.....	66
Figura 42. Antena parche tipo Yagi – uda.....	67
Figura 43. Parámetros S – antena yagi - uda.....	68
Figura 44. ROE – antena parche tipo yagi uda.....	69
Figura 45. Modificación plano de tierra.....	69
Figura 46. Parámetros S – Etapa 3.....	70

Figura 47. Medición ROE – etapa 3	71
Figura 48. Antena Parche tipo Yagi-Uda.....	71
Figura 49. Cambio de directores	72
Figura 50. Selección de estructura	73
Figura 51. Propiedades del director	73
Figura 52. Dimensiones de los directores	74
Figura 53. Modificación directores	75
Figura 54. Antena parche tipo yagi-uda versión final.....	75
Figura 55. Ingresar a Propiedades.....	76
Figura 56. Agregar variable R2y	76
Figura 57. Agregar paramétrica	77
Figura 58. Configuraciones paramétricas	77
Figura 59. Validación fase final.....	78
Figura 60. Resultados Parametrics.....	78
Figura 61. Identificar variable.....	79
Figura 62. Propiedades.....	79
Figura 63. Asignación Variable	80
Figura 64. Añadir parametric	80
Figura 65. Configurar parametrics	81
Figura 66. Validación etapa final.....	82
Figura 67. Variación de la altura del sustrato FR-4.....	82
Figura 68. Coeficiente de reflexión de las diferentes alturas de sustrato.....	83
Figura 69. Dimensiones finales de la antena parche tipo yagi-uda.....	83
Figura 70. Selección Rectangular Plot.....	85
Figura 71. Reporte de la antena	86
Figura 72. Asignación de marcadores.....	86
Figura 73. Generar marcadores.....	87
Figura 74. Parámetros S – antena parche tipo yagi-uda.....	87
Figura 75. Rectangular Plot – Parámetros S	88
Figura 76. Generar Rectangular Plot	88
Figura 77. Resultado ROE – antena parche tipo yagi-uda.....	89
Figura 78. Rectangular Plot del Retardo de Grupo.....	90
Figura 79. Generar Rectangular Plot del Retardo de Grupo.....	90
Figura 80. Resultado - Retardo de grupo	91
Figura 81. Radiation Pattern	92
Figura 82. Generar el Radiation Pattern.	92
Figura 83. Patrón de Radiación – antena parche tipo yagi-uda	93
Figura 84. Selección de la estructura de la antena yagi	94
Figura 85. Generar Plot Mag_E.....	95
Figura 86. Generar Plot Mag_E.....	95
Figura 87. Densidad de corrientes superficial - Magnitud.....	96
Figura 88. Selección de la estructura de la antena Yagi	97
Figura 89. Configurar Vector_E	97
Figura 90. Crear Field Plot – Vector_E	98
Figura 91. Densidad de corrientes superficial – Vector (VISTA PERFIL).....	98
Figura 92. Densidad de corrientes superficial – Vector (VISTA FRONTAL).....	99
Figura 93. Exportar estructura	101
Figura 94. Formato .DXF.....	101
Figura 95. Archivo DXF de la antena.....	102

Figura 96. Estructura de la antena.....	102
Figura 97. Vista frontal y posterior.....	103
Figura 98. Planilla.....	103
Figura 99. Transferir plantilla al Sustrato.....	104
Figura 100. Proceso de revelado.....	104
Figura 101. Antena Yagi Uda - Fabrica.....	105
Figura 102. Antena parche tipo Yagi-Uda fabricada.....	105
Figura 103. Configuración de antena.....	112
Figura 104. Resultados VNA – Parámetros S.....	113
Figura 105. Resultados VNA-Ancho de banda.....	113
Figura 106. Resultado VNA-Resonancia de la antena.....	115
Figura 107. Plan de bandas 3.45 GHz.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de antena parche.	33
Tabla 2. Características de la red 5G	35
Tabla 3. Frecuencias otorgadas a 5G.	36
Tabla 4. Antenas Parche dentro del IoT.....	40
Tabla 5. Infraestructura IoT, niveles de enfoque, tecnologías y protocolos usados.	43
Tabla 6. Abreviados y acrónimos para el uso del análisis de requerimientos.	47
Tabla 7. Prioridad de requerimientos.....	47
Tabla 8. Requerimientos iniciales del sistema.....	48
Tabla 9. Requerimientos de arquitectura.	48
Tabla 10. Stakeholders del proyecto.....	49
Tabla 11. Requerimiento de Stakeholders.	50
Tabla 12. Elección Hardware.....	51
Tabla 13. Características sustrato FR 4.....	51
Tabla 14. Variable de la estructura inicial	53
Tabla 15. Variables del modelo base de la antena	57
Tabla 16. Dimensiones de la antena final tipo yagi	84
Tabla 17. Cronograma de Pruebas	107
Tabla 18. Detalles del producto	110
Tabla 19. Parámetros de configuración de la antena yagi	111
Tabla 20. Lista de equipos	111
Tabla 21. Clima Agosto – Quito.....	112
Tabla 22. Resultados coeficiente de reflexión	114
Tabla 23. Resultado Resonancia	116
Tabla 24. Resumen de prueba.....	116
Tabla 25. Resumen de estándares	116
Tabla 26. Resultados de la medición	117

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Rango de frecuencia.....	17
Ecuación 2. Intensidad de Radiación	21
Ecuación 3. Directividad.....	22
Ecuación 4. Ganancia.....	23
Ecuación 5. Impedancia	23
Ecuación 6. Resistencia de la antena	24
Ecuación 7. Ancho del parche	54
Ecuación 8. Dieléctrico efectivo	54
Ecuación 9. Longitud efectiva	55
Ecuación 10. Extensión de la longitud del plano de tierra.....	55
Ecuación 11. Longitud del parche	55
Ecuación 12. Dimensiones de la longitud.....	56
Ecuación 13. Dimensiones <i>del</i> ancho del plano de tierra	56

Resumen

El presente trabajo se basa en la demostración del funcionamiento de una antena parche tipo yagi – uda para su funcionamiento con tecnología inalámbrica 5G, en donde se incluye el estudio, diseño, caracterización y fabricación, cuyos procesos han sido desarrollados dentro de la provincia de Imbabura, a fin de impulsar la investigación y desarrollo de dispositivos tecnológicos que se adapten a los nuevos estándares de las telecomunicaciones.

La antena va dirigida a las aplicaciones que incorporen sensores para emitir o recibir datos, como lo es el Internet de las cosas (IoT), aplicación que trata que los equipos de uso habitual sean más autosuficientes para mejorar la calidad de vida de las personas (Fernández, 2019); y para ello es la importancia del uso de todo tipo de sensores, los mismos que para su comunicación necesitan la adaptación de antenas que deben ser físicamente pequeñas y funcionalmente efectivas.

En el desarrollo se diferencian varias etapas de diseño de la antena, mismas que fueron trabajadas con el propósito de caracterizar la antena y lograr los resultados esperados conjuntamente a un diseño acorde para la aplicación específica, en ese sentido el diseño final de la antena parche tipo yagi-uda presenta características tecnológicas como una frecuencia de resonancia de 3,5 Ghz, frecuencia óptima para términos de cobertura y capacidad; además, de un patrón de radiación directivo, conveniente para enfocarse en la dirección de la toma de datos y más un gran ancho de banda, útil para brindar la fluidez de los datos; a estos parámetros se suma su estructura de tamaño reducido con factibilidades de adaptación y un bajo costo de fabricación.

Una vez determinado el diseño final y previo a la entrega de la antena fabricada, se realiza el proceso de aceptación de esta y para ello se ejecuta la antena a un equipo analizador de redes vectoriales (VNA), que permite probar la antena, midiendo sus parámetros en un ambiente real, accediendo a demostrar que el funcionamiento de la antena es óptimo y funcional para aplicaciones con tecnología 5G y además de corroborar los resultados reales con los simulados.

Abstract

The present work is based on the demonstration of the operation of a yagi-uda patch antenna for its operation with 5G wireless technology, which includes the study, design, characterization, and manufacture whose processes have been developed in the Imbabura province, to promote the research and the technological devices development which adapt to the new telecommunications standards.

The yagi-uda patch antenna is aimed at applications whose operation uses sensors to emit or receive data, such as the Internet of Things (IoT), an application that tries to make commonly used equipment more self-sufficient to improve people's life quality. (Fernández, 2019), And for this, the use of all kinds of sensors is important, which, for their communication, need to be adapted through the use of antennas, which must be physically small and functionally effective.

In the development, several stage of antenna design are distinguished, which have been worked with the purpose of characterizing the antenna and achieving the expected results in addition to a design according to the specific application. In this sense, the yagi-uda patch antenna final design presents technological characteristics such as a resonance frequency of 3.5Ghz, which is the optimal frequency in terms of coverage and capacity; in addition, a directive radiation pattern, convenient to focus on the data collection direction plus a large bandwidth, useful to provide data fluency. Added to these parameters is its small structure with the feasibility of adaptation and low manufacturing cost.

Once the final design has been determined and before the manufactured antenna delivery, its acceptance process is carried out and for this the antenna is implemented into a vector network analyzer (VNA) equipment, It allows testing the antenna, measuring its parameters in a real environment, allowing to demonstrate that the antenna's operation is optimal and functional for applications with 5G technology and besides that, the real results are confirmed with the simulated ones.

CAPÍTULO I:

ANTECEDENTES

1.1. Introducción

El capítulo siguiente se desarrolla con toda la información necesaria para el estudio, diseño y fabricación de una antena con tecnología parche, aportando de esta manera a los estudios investigativos de antenas, las cuales son elementos principal dentro del aérea de telecomunicaciones debido a ello se enfoca el estudio hacia la red más actual que viene siendo la red de quinta generación (5G), en donde se plantea que con el uso de diversos sensores y una vinculación de tecnologías nuevas se obtenga resultados óptimos, mejorando aspectos de velocidad y capacidad de transferencia; para que en un futuro los sistemas actuales puedan ser reemplazados.

1.2. Tema

“Diseño y fabricación de una antena compacta tipo parche Yagi-Uda para sensores del IoT de 5G”.

1.3. Problema

El desarrollo e innovación tecnológica es una parte fundamental en el área de antenas, debido a que el avance obliga a desarrollar dispositivos mucho más compactos y de altas prestaciones (Salazar Ramírez, 2018), por lo que hoy en día es importante contar con centros de desarrollo e investigación para estas, a fin de analizar sus diferentes tipos y aplicabilidades como lo es en el Internet de las Cosas (IoT), donde se pretende lograr que los objetos se vuelvan cada vez más inteligentes por medio de diferentes sensores (Cuzme Rodríguez Fabian Geovanny, 2015), es por ello que se desarrolla una antena compacta tipo parche Yagi-Uda para aplicaciones en sensores de IoT.

Gran parte de los nuevos equipos tecnológicos disponen de sensores que automatizan trabajos y generan una interacción constante con el usuario, generando que las comunicaciones móviles aumenten su capacidad y rendimiento, para satisfacer estos requerimientos, se hace uso de antenas de mayor ganancia y con tecnología MIMO (Múltiples Entradas y Múltiples Salidas) (Kramer et al., 2010) en donde se pueden presentar desafíos como costos altos en la fabricación y una elevada complejidad al momento de analizar sus parámetros, dificultades que motivaron al desarrollo a este proyecto, donde se dará una solución mediante el diseño asistido por software para simulación de campos electromagnéticos y la fabricación de una antena tipo parche Yagi-Uda.

El propósito de construir este tipo de antena es la conexión entre personas y dispositivos que es uno de los objetivos del IoT, en donde las antenas tipo parche Yagi-Uda dado a la estructura que presentan tienen características que las hacen adecuadas para aplicaciones de los sensores dentro de esta tecnología, como lo es, altas ganancias, ancho de banda razonable, la fabricación resulta tener costos moderados y el diseño puede variar de acuerdo a la aplicabilidad deseada (Vaca Parra & Venegas López, 2011), para el caso del internet de las cosas se debe utilizar antenas que sean capaces de ser incorporadas en dispositivos pequeños, por ello se utiliza un software de campos electromagnéticos para determinar las medidas de la antena y sus diferentes parámetros, de los cuales se dependerá para la fabricación de la antena.

Durante la realización de este proyecto, se diseña y simula una antena compacta tipo parche Yagi-Uda para aplicaciones en sensores del internet de las cosas (IoT); en la provincia de Imbabura, ciudad Ibarra y posterior a ello se realiza la construcción de la misma, a fin de verificar el buen funcionamiento; además de realizar estudios de conceptos de antenas enfocando las tipo parche Yagi-Uda, así como, características y parámetros necesarios como ancho de banda, ganancia, patrón de radiación y frecuencia de resonancia para el diseño de las mismas, teniendo como propósito entregar la antena compacta tipo parche Yagi-Uda, para aplicaciones en los sensores de IoT.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Fabricación de una antena compacta tipo parche Yagi-Uda para aplicaciones en sensores de IoT, diseñada dentro de la provincia de Imbabura.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información acerca de investigaciones de antenas tipo parche Yagi-Uda.
- Diseñar la antena mediante un software de simulación de campos electromagnéticos.
- Construir y caracterizar la antena en base a los resultados obtenidos de los cálculos realizados.
- Identificar y elaborar un análisis comparativo de la variación de los parámetros entre la simulación y fabricación de la antena.

1.5. Alcance

Se inicia con un análisis de teoría de antenas, poniendo énfasis en el tipo de antenas parche Yagi-Uda, características del sustrato como: constante dieléctrica, espesor y los parámetros para el diseño como: ancho de banda, ganancia, patrón de radiación y frecuencia de resonancia que han sido considerados importantes para el diseño de las antenas.

Una vez realizado el estudio teórico sobre la antena, se procede al diseño basado en el siguiente procedimiento: Diseño del patch, Diseño de la antena y diseño del tipo de alimentación.

Se utilizará un software de simulación de campos electromagnéticos para obtener resultados de las características de la antena y el cálculo de los diferentes parámetros que son necesarios para la construcción de la misma. El uso del software ayuda a mejorar las medidas de diseño, dándonos una apreciación más real del comportamiento de la antena.

Con los resultados obtenidos se procede a fabricar la antena compacta tipo parche Yagi-Uda, para sensores del internet de las cosas (IoT), la cual se diseñara en la provincia de Imbabura para provocar una reducción de su costo al momento de ser fabricada, posterior a ello se entregará la antena verificada y además se tomará como base los resultados del simulador con los reales, procediendo a realizar un análisis comparativo de los mismos, a fin de determinar la variación que se presenta en la fabricación respecto al diseño, debido a factores como: impurezas en los materiales y leves fallas en la impresión de la antena al sustrato.

1.6. Justificación

El gran avance y llegada de nueva tecnología a Ecuador, como lo es el internet de las cosas, que ya lo empezamos a vivir por parte de la empresa CLARO, quienes han desarrollado su primer centro de atención con experiencias IoT en generación 4.5G, en la ciudad de Guayaquil (Doctor Tecno, 2018) permite que la población acceda a diferentes aplicaciones de dispositivos inteligentes, los cuales se pueden controlar e interactuar a través de una conexión a internet logrando desarrollar tareas que brindan una mejor calidad de vida al usuario, que es un objetivo del internet de las cosas (IoT) (Cuzme Rodríguez Fabian Geovanny, 2015) donde el principal funcionamiento de esta tecnología se da en el desarrollo de antenas y sensores, es por ello que la fabricación de antenas ha tenido un gran impacto en los últimos años, dado a que por medio de ellas las personas pueden hacer uso de las aplicaciones que ofrecen las redes inalámbricas.

Dentro de la constitución de la República del Ecuador; se pronuncia en el art. 280 que los diferentes programas o proyectos deben sujetarse o cumplir con el plan nacional del buen vivir (Asamblea Constituyente, 2013); es así que tomándolo como referencia se puede citar el inciso d.10 Incrementar el acceso a servicios de telecomunicaciones y tecnologías de información en donde toda persona natural o jurídica puede tener acceso a la comunicación y al uso del espectro radioeléctrico (Consejo Nacional de Planificación, 2017), el cual es usado por toda la tecnología

inalámbrica en donde opera el IoT, por ende se procede a diseñar y fabricar una antena compacta tipo parche Yagi-Uda que debido a sus características como gran disponibilidad de ancho de banda, adaptabilidad a cualquier superficie y además de un diseño personalizado, ventajas que la otorga una antena adecuada para la aplicación de sensores de IoT (Kramer et al., 2010), que al ser diseñada dentro de la ciudad de Ibarra provee una reducción de costos.

CAPÍTULO II:

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El siguiente capítulo hace referencia al análisis literario y bibliográfico que permitirá armar una base teórica, con el objeto de obtener información veraz y primordial de temas fundamentales como, red de quinta generación (5G), internet de las cosas (IoT) con orientación a la teoría de antenas dando enfoque importante a las antenas tipo parche que son tema principal de la propuesta del trabajo de titulación.

2.1. Teoría de antenas

En los sistemas de telecomunicaciones, las antenas son unos de los componentes más importantes, debido a que es la parte en donde permite radiar o recibir ondas electromagnéticas para comunicar a un receptor con un emisor. El uso de las antenas dentro de las telecomunicaciones se aplica para diferentes fines, por ejemplo, establecer enlaces punto a punto, difundir diferentes tipos de señales electromagnéticas, transmitir o recibir señales en equipos portátiles; las cuales para lograr su funcionamiento hacen uso del espectro electromagnético y generan o remiten información de acuerdo con la aplicación a la que sean vinculadas.

2.1.1. Definición de antena

Según el “Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos” (IEEE), define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. (IEEE Std. 145-1983). Mientras que (Stalling, 2005) define que la antena es “un conductor eléctrico o un sistema de conductores utilizados para la emisión o recepción de energía electromagnética”.

En este sentido, una antena permite transmitir y recibir señales, como se muestra en la Figura 1. que la antena irradia su señal y para ello convertirá la energía eléctrica de radio frecuencia a energía electromagnética; y para receptor las señales, hace el proceso contrario, es decir, la antena toma la energía electromagnética de una señal y la transforma en energía eléctrica de

radiofrecuencia para posteriormente reenviar la información al receptor. (Stalling, 2005).

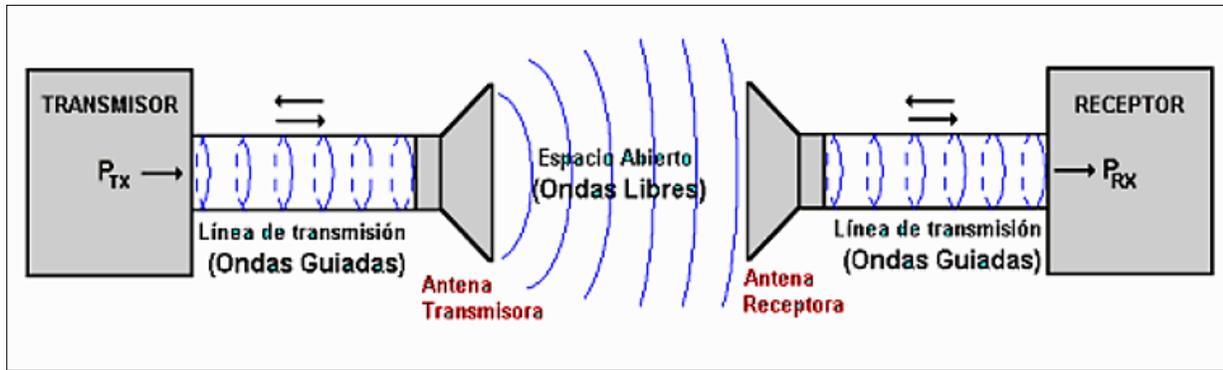


Figura 1. Transmisión y recepción de una antena.
Fuente: (René, 2018).

Al ser la antena un elemento básico de los sistemas de radiocomunicación es importante conocer y describir cada uno de sus parámetros, ya que el resultado de estos permitirá evaluar el desempeño de la antena y verificar los resultados deseados. Los parámetros próximos a analizar son: Ancho de banda, Ancho de haz, Diagramas de radiación, Intensidad de radiación, Directividad, Ganancia, Impedancia y Polarización.

2.1.2. Ancho de banda

De acuerdo con Fernández (2019), el ancho de banda de la antena se considera el rango de frecuencias en donde la antena funciona de manera eficaz, permitiendo que los parámetros de la antena como diagrama de radiación, anchos de haz, directividad, ganancia y polarización; sean considerados aceptados si sus valores funcionales se encuentran dentro del rango determinado.

La expresión matemática que permite calcular el ancho de banda de una antena, de acuerdo con (C. A. Balanis, 2008) se expresa en la Ec. 1, la cual especifica que el rango de frecuencia se obtiene a partir de la diferencia entre la frecuencia máxima y la frecuencia mínima, esto sobre la frecuencia central.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad \text{Ec. 1. Rango de frecuencia}$$

Donde:

BW = Ancho de banda de la antena

f_{max} = frecuencia máxima (Hz)

f_{min} = Frecuencia mínima (Hz)

f_o = Frecuencia central (Hz)

2.1.3. Ancho de Haz

Tomando como base el diagrama de radiación de una antena, se puede seleccionar dos puntos iguales en potencia pero situados en lados opuestos del lóbulo mayor del diagrama de radiación, provocando que entre estos puntos se genere una separación angular, a la cual se la define como ancho de haz (Fernández, 2019). Dentro de un diagrama de antenas se tiene dos tipos de ancho de haz, el uno que es el ancho de haz de media potencia (HPBW - Half Power Beamwidth por sus siglas en inglés), el cual representa la separación angular que se obtiene seleccionando dos puntos opuestos en la mitad del lóbulo mayor, los cuales manejan el mismo valor de potencia que generalmente son los -3dB; y el otro ancho de haz, es el representante de la separación angular entre los primeros nulos obtenidos en un diagrama de radiación, conocido como FNBW (First Null Beamwidth) (C. Balanis, 2008) dichos anchos de haz son ilustrados en la Figura 2.

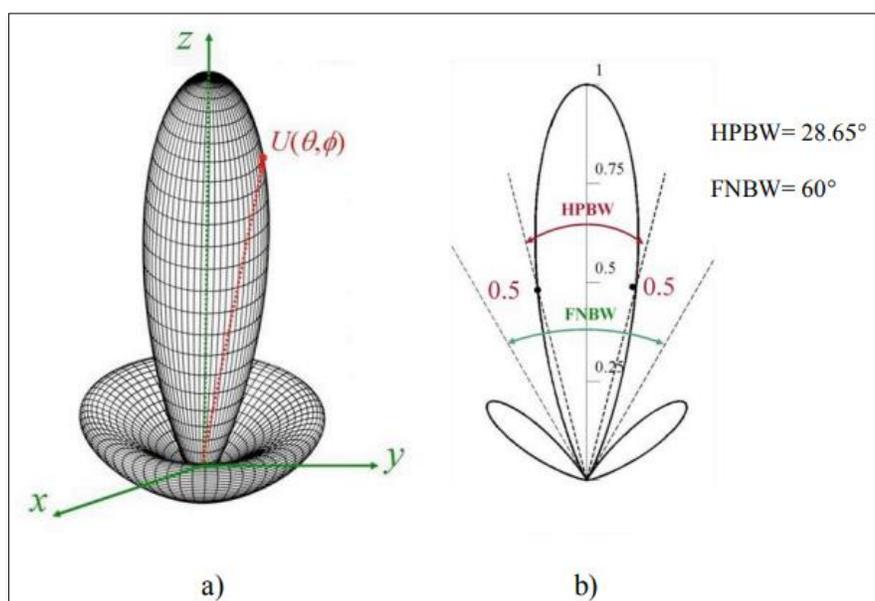


Figura 2. Anchos de haz de una antena representados a) en el espacio b) polar.
Fuente: (C. Balanis, 2008)

2.1.4. Diagrama de Radiación

De acuerdo con (Cardama et al., 2004) se puede definir a los diagramas de radiación como la representación gráfica de las propiedades radiales de la antena, en función de las coordenadas espaciales hacia una distancia fija, que normalmente se conoce como la región del campo lejano.

Las antenas pueden presentar 3 diferentes diagramas de radiación como se muestra en la Figura 3. Que son, patrón isotrópico, que es aquel en el cual una antena hipotéticamente no tiene pérdidas e irradia igual energía hacia todas las direcciones; el patrón omnidireccional quien presenta una radiación uniforme en todas las direcciones del plano y por último el patrón directivo que es aquel en el cuál la energía depende de la dirección angular, puede ser en el plano x o en el plano de elevación y. (Cardama et al., 2004).



Figura 3. Diagramas de radiación en una antena.
Fuente: (PRO, 2018)

El patrón de radiación contiene elementos limitados por regiones de acuerdo con las diferentes intensidades de radiación, ya que algunas poseen mayor intensidad que otras, como se muestra en la Figura 4. Estos elementos se conocen como lóbulos y son las regiones que caracterizan al diagrama de radiación, los cuáles se clasifican dependiendo a sus características en; lóbulo mayor, lóbulo menor, lóbulos laterales y lóbulo posterior. (C. Balanis, 2008)

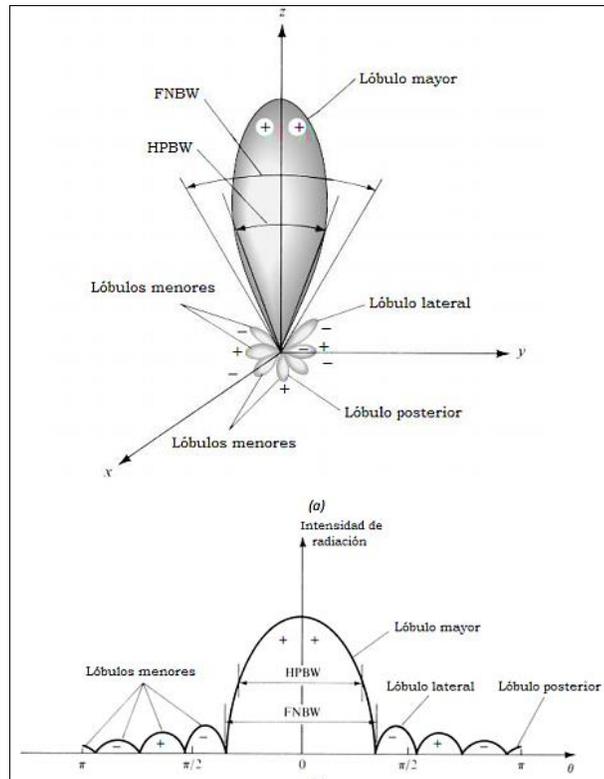


Figura 4. a) Lóbulos de radiación y anchura de haz del diagrama de radiación. b) Diagrama lineal del patrón de radiación con lóbulos y anchuras de haz.
Fuente: (C. Balanis, 2008)

Desde el punto de vista de (Society, 2018) el lóbulo mayor se caracteriza por llevar la mayor cantidad de radiación; por otro lado, el lóbulo lateral generalmente es el adyacente al lóbulo mayor que se distingue por la dirección de radiación, la cual es distinta a la del lóbulo mayor; finalmente un lóbulo posterior que se identifica por ocupar el espacio opuesto del lóbulo mayor. En conclusión, todos los lóbulos mencionados tienen gran importancia en la radiación de las antenas ya que todos aquellos lóbulos menores que son los diferentes al lóbulo mayor deben ser minimizados en la mayor medida posible, a fin de que la radiación en las direcciones no deseadas pueda ser considerada como interferencia.

Es más la representación de los diagramas de radiación puede presentarse en forma polar o cartesiana como se indica en la Figura 5.; cada una de ellas permite interpretar los mismos resultados adaptándose a la conveniencia de quien las analice.

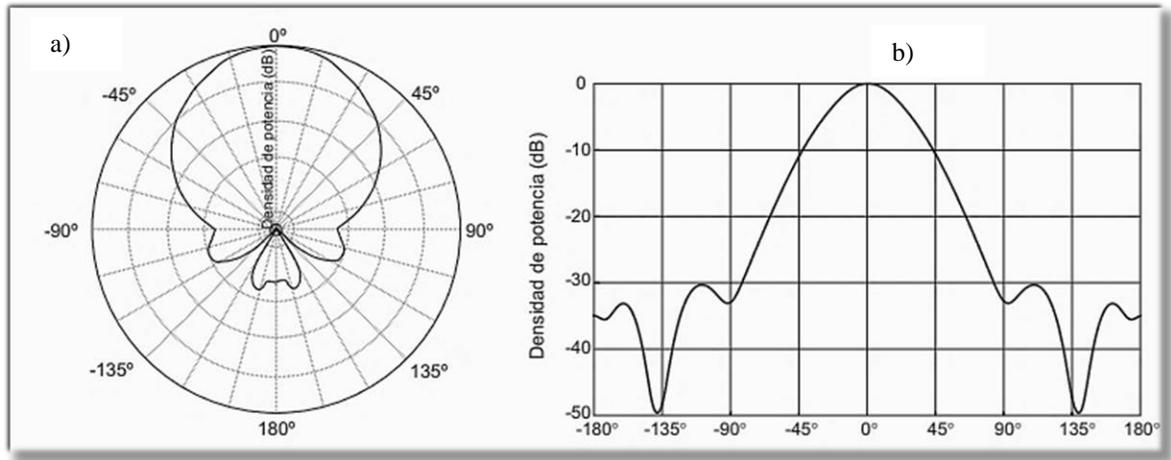


Figura 5. a). Diagrama de radiación en coordenadas polares b). Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas.

Fuente: (Cardama et al., 2004)

2.1.5. Intensidad de Radiación

La intensidad de radiación permite determinar la cantidad de potencia que las antenas irradian hacia una dirección específica, como lo hace notar (Society, 2018) quien además expresa que puede ser calculada mediante la Ecuación 2., donde el resultado es el producto de la densidad de radiación por la distancia al cuadrado; como se identifica a continuación:

$$U = r^2 P_{rad}$$

Ec. 2. Intensidad de Radiación

Donde:

U = Intensidad de radiación ((W/Unidad de ángulo sólido))

r = Distancia (metros)

P_{rad} = Densidad de radiación (W)

Según la Ec. 2. se puede afirmar que la intensidad de potencia se mide en el campo lejano, debido a que en este punto la potencia puede alcanzar su mayor radiactividad. (Cardama et al., 2004).

2.1.6. Directividad

La directividad (D) de una antena se define como la relación entre, la intensidad de potencia radiada en una dirección y a una determinada distancia desde la antena; con, la intensidad de potencia que radiaría una antena isotrópica usando la misma cantidad de potencia de radiación (Society, 2018).

Es decir, la directividad en antenas no isotrópicas se considera como la relación entre la intensidad radiada en una dirección específica, donde entre más alta sea la directividad, el haz de radiación será más delgado; así como la densidad de potencia de una antena isotrópica a esa misma distancia. De acuerdo con (Cardama et al., 2004), la directividad se calcula mediante la Ec. 3.

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad \text{Ec. 3. Directividad}$$

Donde:

D = Directividad (adimensional)

U = Intensidad de radiación (W (vatios)/Unidad de ángulo sólido)

U_o = Intensidad de radiación de fuente isotrópica (W/Unidad de ángulo sólido)

P_{rad} = Potencia radiada total (W)

2.1.7. Ganancia

Este parámetro viene relacionado con la directividad ya que se basa en la eficiencia y capacidades direccionales de la antena, De acuerdo con (C. Balanis, 2008) se la puede definir como la relación que se tiene entre, la intensidad de potencia radiada en una dirección específica y la intensidad de potencia radiada en una antena isotrópica; se compara con la antena isotrópica ya que es considerada una antena sin pérdidas, la cual no es real pero sirve como una medida para dar evaluación a los parámetros de antenas.

En consecuencia, la ganancia pone en manifiesto que cualquier antena real presenta pérdidas y no radia toda la potencia que se le suministra, debido a que se disipa en forma de calor, Según (Cardama et al., 2004) se puede determinar que la ganancia es directamente proporcional a la directividad de radiación sobre la potencia entregada dividida por 4π , como indica la Ec. 4.:

$$G(\theta, \Phi) = \frac{\wp(\theta, \Phi)}{\frac{P_{in}}{(4\pi r^2)}} \quad \text{Ec. 4. Ganancia}$$

Donde:

$G(\theta, \Phi)$ = Ganancia (*dB*)

$\wp(\theta, \Phi)$ = Dirección de radiación (adimensional)

P_{in} = Potencia entregada (*W*)

2.1.8. Impedancia

Citando a (C. Balanis, 2008) quien a la relación que se tiene entre la tensión y corriente en los terminales de entrada de la antena, la define como impedancia de antena, que dicho en otras palabras es la característica para que la relación entre los componentes de campo eléctrico y magnético en un punto específico sean los adecuados. Además, hace manifiesto de la Ec. 5. que define la impedancia como la relación del voltaje con la corriente en los terminales sin carga que le permitirá contrastar los componentes del campo eléctrico.

$$Z_A = R_A + jX_A \quad \text{Ec. 5. Impedancia}$$

Donde:

Z_A = Impedancia de la antena en los terminales (*ohms*)

R_A = Resistencia de la antena en los terminales (*ohms*)

X_A = Reactancia de la antena en los terminales (*ohms*)

Donde se determinará un número complejo, es decir, tendrá su parte real e imaginaria, en donde a la parte real R_A se la conoce como resistencia de antena (suma de la resistencia de radiación con las resistencias de pérdidas) y la parte imaginaria X_A que representa a la reactancia (involucra a los fenómenos inductivos y capacitivos). (Beltrán, 2019)

Se especifica en la Ec. 6. la resistencia de la antena que es directamente proporcional a la suma de las resistencias que presenta la antena ante la radiación y pérdida de señales electromagnéticas.

$$R_A = R_r + R_L$$

Ec. 6. Resistencia de la antena

Donde:

R_r = Resistencia a la radiación de la antena (*ohms*)

R_L = Resistencia a la pérdida de la antena (*ohms*)

Además, es importante denotar que la impedancia de entrada de la antena lleva relación directa con la estructura, método de alimentación y polarización de la antena; por lo tanto, si alguno de los nombrados parámetros se modifica, provocaría variaciones en los valores de impedancia. (C. Balanis, 2008).

2.1.9. Polarización

La polarización viene definida como la propiedad para que una onda electromagnética pueda referir su variación en el tiempo de la dirección y magnitud relativa del vector de campo eléctrico. (C. Balanis, 2008) . Específicamente para la polarización se debe tomar en cuenta el sentido de la onda, la cual es trazada a lo largo de la dirección de propagación con el fin de dar una gráfica en una posición fija en el espacio, como se muestra en la Figura 6.

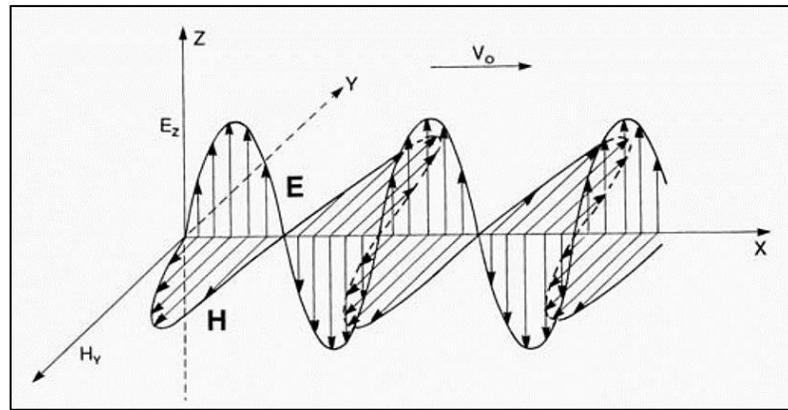


Figura 6. Onda Electromagnética con sus componentes del campo electromagnético.

Fuente: (C. Balanis, 2008).

En la Figura 6. Se ilustran las componentes de una onda plana, con componentes de campo eléctrico y magnético (E_z y H_y) que viaja con velocidad (V_o) en la dirección X del plano cartesiano; además el vector de campo eléctrico E se encuentra en el plano YZ con dirección Z, lo que permite determinar que la onda se encuentra polarizada verticalmente; en caso de que el vector E se encontrará en el plano XY con dirección en Y, se determinaría que es una onda con polarización horizontal (C. Balanis, 2008).

2.2. Tipos de antenas

Dado a la gran variedad de aplicabilidad y numerosos modelos que por hoy día se tiene para las antenas, estas se han distribuido de diferentes tipos a fin de adaptarse a las necesidades que se requiera según la aplicación o dispositivo donde serán instaladas. Es así que se procede a estudiar los tipos más relevantes de antenas (Antenas de alambre, antenas de apertura, antenas parche), con sus definiciones y características principales haciendo énfasis en las antenas parche como parte importante del presente trabajo de titulación

2.2.1. Antenas de alambre

Las antenas de alambre son muy conocidas, ya que se encuentran a menudo en automóviles, barcos, aviones, etc. Básicamente están construidas mediante hilos conductores, eléctricamente delgados y se emplean en el rango de 3 a 3000 MHz. (C. Balanis, 2008).

El tamaño de las antenas dependerá de la longitud de onda λ ; a mayor frecuencia de trabajo de la antena como en Gigahercios (GHz), la dimensión puede ser medida en milímetros. En la Figura 7. Se representa los 3 tipos de antenas alambre más usado.

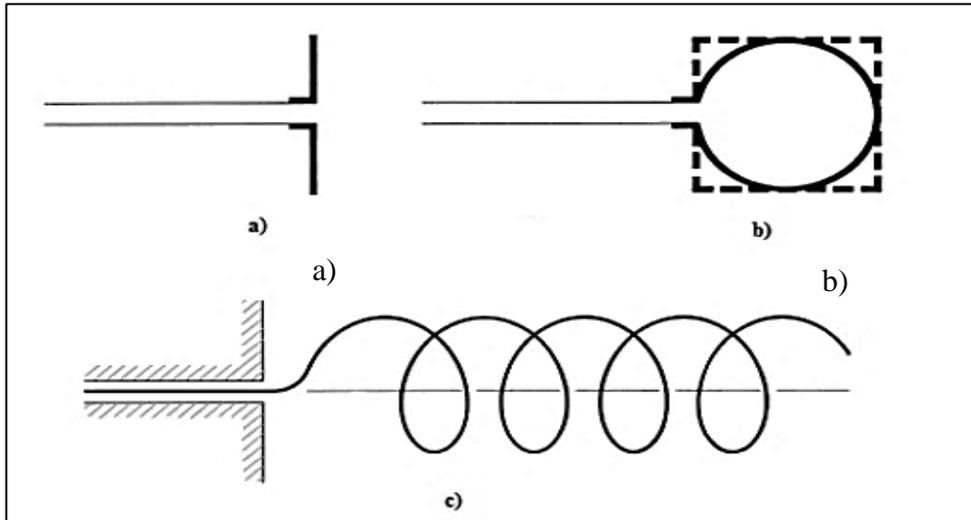


Figura 7. Tipos de antenas de alambre a) Dipolo, b) bucle circular y c) Helicoidal.

Fuente: (C. Balanis, 2008)

Dentro de la Figura 7. se tiene las antenas de alambre más comunes; a) las antenas de dipolo, la más sencilla debido a que únicamente cuenta con un hilo conductor de media longitud de onda, y en su mitad dispone de una línea de transmisión; un ejemplo de ella son las antenas Yagi-Uda usadas en los hogares para la recepción de señales de televisión, (Huidobro & Luque, 2014). b) la antena de bucle circular la cual se caracteriza por constar de un anillo con radio constante fabricado en metales que son altamente conductores, logrando que pueda radiar su señal de una manera isotrópica; y c) antena helicoidal que se distingue por sus hilos conductores los cuales son agrupados o contruidos a manera de una hélice, se fabrica bajo esta condición debido a que sus resultados en cuestión de ancho de banda son bastante óptimos. (Huidobro, 2013)

2.2.2. Antenas de apertura

En la Figura 8.; se muestran algunas estructuras de las antenas de apertura más comunes, como son la piramidal rectangular, la cónica circular y la guía de onda rectangular. Las antenas de

este tipo se emplean en aplicaciones de aviación y naves espaciales, porque pueden ensamblarse y acomodarse de manera adecuada en el fuselaje del avión o nave. Además, pueden cubrirse con un material dieléctrico de baja atenuación (radome), para protegerlas de las condiciones adversas del medio ambiente. (C. Balanis, 2008)

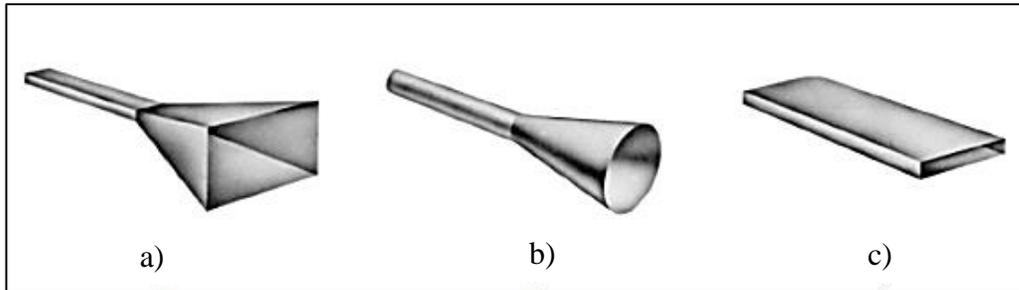


Figura 8. Tipo de antenas de apertura a) piramidal b) circular c) rectangular.

Fuente (C. Balanis, 2008)

2.2.3. Antenas de microcinta (Parche)

Estas antenas consisten en un parche metálico grabado sobre un lado del sustrato y con el otro lado completamente metalizado a tierra. El parche metálico puede tener muchas configuraciones diferentes, como se puede apreciar en la Figura 9. Las configuraciones rectangulares y circulares son las más populares debido a su análisis y fabricación fácil, así como al buen comportamiento de sus características de radiación. Las antenas de microcinta son delgadas, se pueden ajustar a superficies planas y no planas, son simples y de bajo costo al ser fabricadas mediante una tecnología moderna de circuitos impresos que permite una reproducción fácil y rápida. (Balanis, 2008).

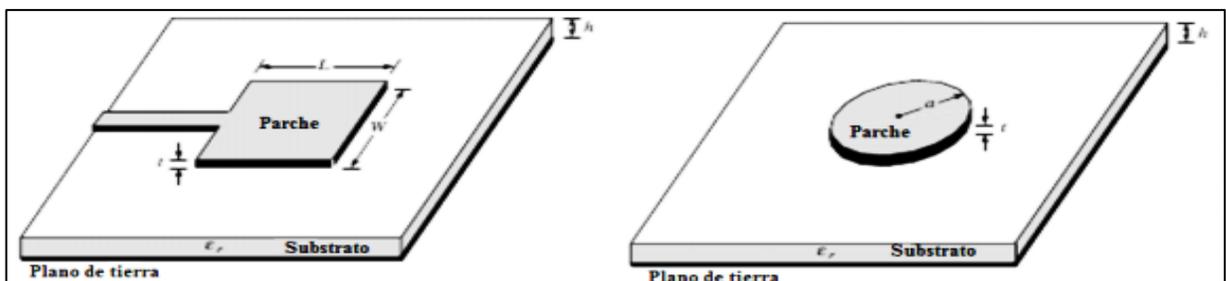


Figura 9. Antenas Parche con a) Parche Rectangular b) Parche Circular.

Fuente: (Torrecillas, 2018).

2.3. Antenas Parche

En este agregado se detalla el análisis literario correspondiente a las antenas tipo parche de microcinta (Parche Patch Antenna), se describe parámetros fundamentales sobre su principio de operación, técnicas de alimentación que manejan y métodos de análisis para dichas antenas.

2.3.1. Principios básicos de operación.

La antena tipo parche, cumple básicamente con los mismos principios de las diferentes antenas convencionales. Una antena parche consiste en un radiador de microcinta con una superficie conductora sobre un sustrato dieléctrico y una base metálica que funcionará como plano de tierra, tal como se muestra en la Figura 10.

La construcción de antenas parche es realizada sobre sustratos dieléctricos los cuales cuentan con valores de permitividad pequeños a fin de obtener una mayor eficiencia de radiación; debido a que entre más alto sea el valor de permitividad dieléctrica de un material, existirá mayor capacidad de concentración del campo eléctrico dentro de las paredes conductoras y esto provocará que la propagación hacia el espacio libre sea mucha más compleja. (Aguado, 2016).

En una antena parche microcinta, la energía electromagnética se propaga dentro del sustrato a través de la región delimitada entre la superficie metálica conductora y la parte correspondiente al plano de tierra.

La propagación de modo TEM (Transverso Electro Magnético), se presenta cuando las líneas de campo eléctrico están polarizadas verticalmente, esto sucede siempre y cuando el grosor “h” sea menor en dimensión a “ λ ” correspondiente a la longitud de onda, cumpliendo la relación “ $\lambda \gg h$ ” (Aguado, 2016) A continuación, se representa en la Figura 10.

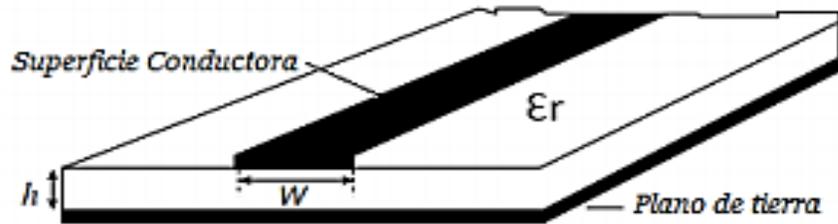


Figura 10. Estructura básica de antena parche parche.

Fuente: (Aguado, 2016)

Existe también un fenómeno conocido como campos de contorno como se indica en la Figura 11. los cuales se producen en los bordes de la microcinta o parche y representan gran importancia en el diseño de estas antenas, ya que la producción de dicho fenómeno provoca el aumento en la longitud eléctrica de los elementos y puede modificar la impedancia de la microcinta (Aguado, 2016).

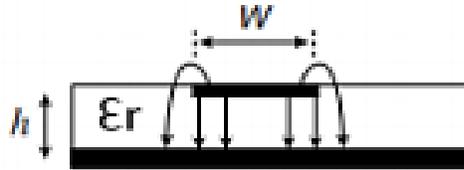


Figura 11. Campo eléctrico de contorno.

Fuente: (Aguado, 2016)

En relación con el fenómeno anterior se muestra la Figura 12., la cual muestra una antena parche microcinta con dimensiones L y W sobre un sustrato dieléctrico ϵ_r con plano de tierra, en donde puede observarse una cavidad entre dos superficies que está rodeada por muros magnéticos y en donde el modo de propagación dominante es Transverso Magnético con dirección hacia el plano “z” (TM_z).

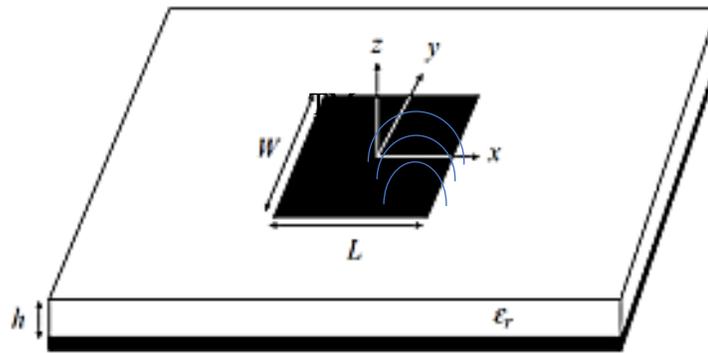


Figura 12. Antena parche parche.

Fuente: (Aguado, 2016)

La cavidad resuena bajo la condición de que tenga una longitud física $L \approx \lambda/2$. Además, los límites del parche son abiertos, otorgando o que en el centro del parche el campo eléctrico sea igual a cero y en sus bordes sea el máximo, es decir en $x = \pm L/2$, donde cada polo tendrá una polaridad diferente; tal como se puede muestra cómo podemos apreciar en la Figura 13.

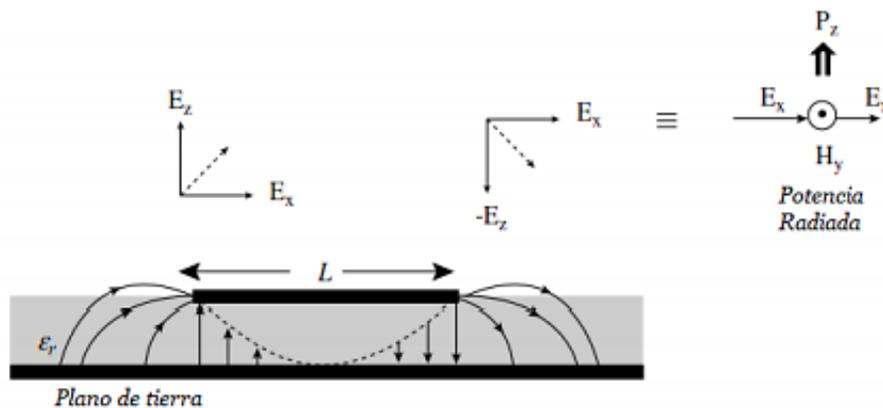


Figura 13. Distribución de campo eléctrico.

Fuente: (Aguado, 2016)

Al momento de que la antena entre en resonancia, existirá una acumulación de carga en los bordes, originando que la máxima cantidad de campo electromagnético esté concentrada en ellos, produciendo el fenómeno de “campos de contorno”, que sucede debido que el campo eléctrico no permanece totalmente vertical en estas zonas y la inclinación que presentan en los vectores de campo se pueden dividir en componentes verticales y horizontales, induciendo a que los

componentes en dirección z , se anulen y solo se permite la propagación en la dirección x , produciendo que si solamente se tiene propagación de campo eléctrico en la dirección E_x , la propagación del campo magnético tendrá una dirección ortogonal H_y , produciendo una radiación vertical P_z que es conocido como el vector de Poynting; como se indica en la Figura 14. (Aguado, 2016).

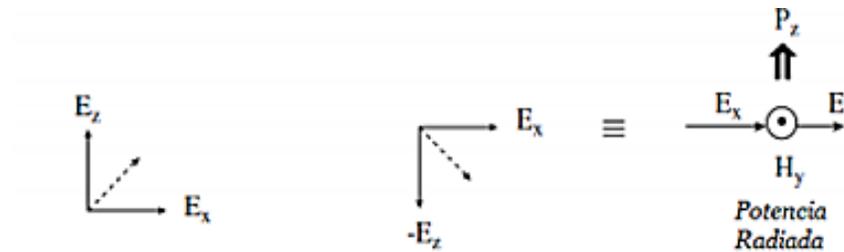


Figura 14. Potencia radiada.

Fuente: (Aguado, 2016)

2.3.2. Métodos de alimentación de antena parche

El esquema de alimentación de este tipo de antenas debe tener una configuración eficiente, es decir, una configuración que no tenga ningún tipo de altercado al momento de usarla, como una falla, así se evitan pérdidas y las naves pueden funcionar correctamente. La radiación de las antenas parche puede lograrse a través de alimentación de diferentes técnicas, las cuales se detallan a continuación.

2.3.2.1. Alimentación por sonda coaxial

Consiste en una alimentación perpendicular al plano de tierra mediante una perforación que atraviesa el sustrato y hace contacto con el parche y se suelda. Su principal ventaja es que hay la facilidad de colocar dentro de cualquier punto del parche a fin de encontrar la mejor posición para su óptimo funcionamiento. (De, 2015).

Como se observa en la Figura 15. Se debe tomar en cuenta el grosor del sustrato ya que se dificulta la adaptación por la radiación espuria del conector coaxial, aunque con este método se presentan pocas radiaciones por espurias. (Trafficcomm, 2015).

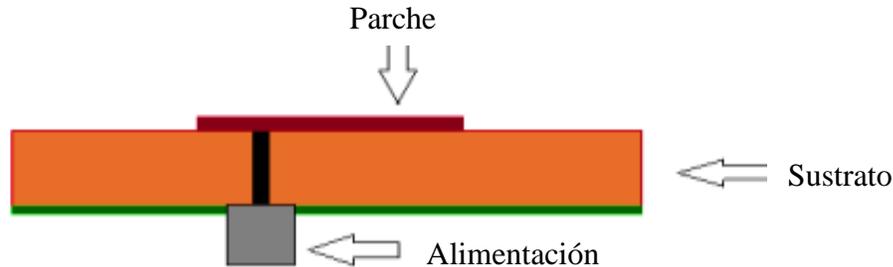


Figura 15. Antena parche parche alimentado por conector coaxial.

Fuente: (Trafficcomm, 2015)

2.3.2.2. Alimentación por línea parche

Consiste en la alimentación de la antena mediante una línea parche, la cual se conecta directamente al borde del parche radiador, como se indica en la figura 16.; este tipo de alimentación (línea de transmisión) dispone de una longitud menor a la del parche.

Al usar esta alimentación se tiene las ventajas de que es fácil de fabricar y además que se puede grabar sobre el mismo sustrato, pero sin embargo tiene sus desventajas en cuanto a que dicha línea de alimentación produce una radiación espuria y produce bajo ancho de banda que varía entre 2 y 5 %. (José Luis Masa Campos, 2014)

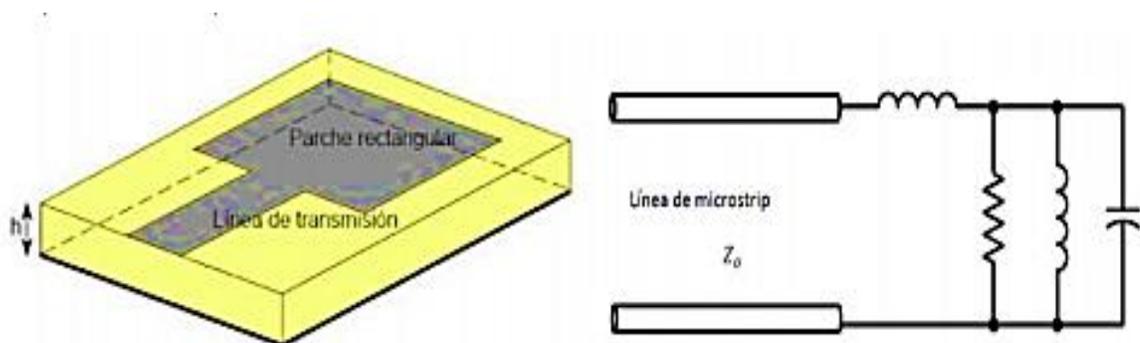


Figura 16. Antena parche parche alimentado por línea parche.

Fuente: (José Luis Masa Campos, 2014)

La impedancia en el borde del parche a donde se conecta la línea parche se debe acoplar a una impedancia característica de 50Ω como se muestra en la Figura 17., y esta impedancia se la puede obtener por medio de un transformador de impedancias. (De, 2015)

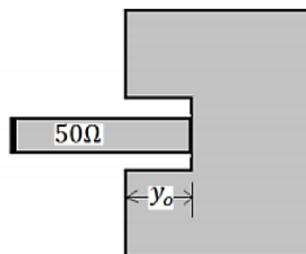


Figura 17. Impedancia en el borde del parche.

Fuente: (Trafficcomm, 2015)

2.3.3. Ventajas y Desventajas de Antenas Parche

Como se describió anteriormente las antenas parche aumentaron su popularidad en aplicaciones inalámbricas por factores como estructuras pequeñas, diseños adaptables a diferentes superficies, lo que las convierte en ser muy compatibles con dispositivos inalámbricos tales como: computadoras portátiles, celulares, sensores, etc. Además de tener gran acogida en sistemas de comunicación satelital, debido a que desde sus inicios emergieron en aplicaciones espaciales. (Trafficcomm, 2015). Las principales ventajas y desventajas son presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de antena parche.

Fuente: (Trafficcomm, 2015).

CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Estructura	Sencilla con posibilidad de ediciones.	Poco resistente a intemperies.
Tamaño	Reducido, pensadas para dispositivos pequeños.	Dificulta el acoplamiento de sus componentes.
Diseño	Adaptable a las superficies del equipo terminal.	Susceptible a variaciones debido a deterioros por el tiempo.
Costo de fabricación	Generalmente bajo	Materiales delicados.
Polarización	Soporta polarización lineal y circular	Limitada distancia de transmisión.
Frecuencia	Maneja varias frecuencias	Diseño diferente para cada frecuencia.

2.4. Antenas en Tecnología 5G

El aumento del número de dispositivos inalámbricos conectados entre sí y la cantidad de datos IP manejados por las redes de telecomunicación crece de manera exponencial, debido a aplicaciones que brindarán un mejor diario vivir a sus usuarios, como son: Realidad virtual, ciudades inteligentes, videos 3D, internet de las cosas; entre otras. A manera que para los años venideros los dispositivos inalámbricos pueden llegar a ser 1000 veces más. (Wang et al., 2017)

Por lo expuesto anteriormente se generará abruptamente un mayor tráfico de datos, mayor demanda en escalabilidad y adaptabilidad, de ahí la necesidad de innovar tanto en hardware como en software de los diferentes componentes que se destinan al uso de las telecomunicaciones, ya que la capacidad de las actuales redes inalámbricas no abastecerían la conexión del dicho número de dispositivos, es así que la red inalámbrica 5G surge para mitigar mencionados problemas (González, 2016).

La red inalámbrica 5G conlleva la combinación de sistemas existentes de radiocomunicación, con la implementación de antenas con tecnología MIMO “masivas”, Las cuales podrán ofrecer altas capacidades de red como velocidad mínima de 1 Gbps, latencia baja siendo menor o igual a 1 ms, entre otras que saldrán a flote una vez que se empiece a usar la tecnología 5G.(Fernández, 2019)

En el caso de las antenas de banda ancha, el ancho de banda suele expresarse como la relación entre la frecuencia más alta y la frecuencia de funcionamiento aceptable más baja; Por ejemplo, el ancho de banda del patrón está asociado a la ganancia, al nivel del lóbulo lateral, a la anchura del haz, a la polarización y a la dirección del haz; mientras que la impedancia de entrada y la eficiencia de radiación están relacionadas con el ancho de banda de la impedancia.

Una red 5G está compuesta por tres bloques como se puede ver en la Figura 18.

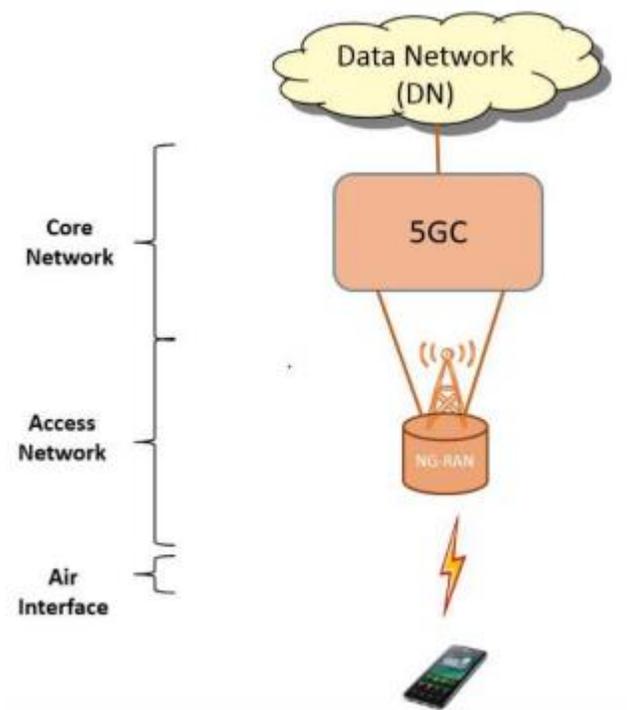


Figura 18. Sistema 5G

Fuente: (Wong, Schober, Ng, & Wang, 2017).

De acuerdo al boletín estadístico de (ARCOTEL, 2017) se detalla las siguientes características de red inalámbrica 5G expresadas en la Tabla 2.:

Tabla 2. Características de la red 5G

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

Año inicial:	2015
Velocidad:	1 a 10 Gbps
Ancho de banda:	1000 x ancho de banda de unidad de superficie
Frecuencia:	3 a 300 GHz
Tecnologías de multiplexación / Acceso	Acceso múltiple por división de código (CDMA) Acceso múltiple por división de haz (BDMA)
Estándares	Banda ancha IP LAN Redes de área local inalámbrica (WLAN) Red de área personal (PAN) Red mundial Inalámbrica (WWWW)
Rendimiento en tiempo real	Latencia mínima, baja fluctuación, nivel de respuesta super rápido.

Altas velocidades de banda ancha	Velocidades de datos Gigabit, cobertura de alta calidad y multi espectro
Nuevas aplicaciones	Soporta internet de las cosas, 100 veces más dispositivos conectados, Gran cobertura en interiores y exteriores
Consumo de energía	Reduce alrededor del 90% en el consumo de energía a la red

2.4.1. Asignación del espectro de radiofrecuencias para 5G

La asignación del espectro de radiofrecuencias es importante para el despliegue de la red inalámbrica 5G en el mundo, ya que los países pioneros en implementar la tecnología como Corea del Sur, determinaron que la óptima propagación de las ondas beneficiará al ancho de banda que se disponga a los usuarios. (Fernández, 2019). De tal manera que se lo divide en tres rangos importantes, las cuales son explicadas en la tabla 3.

Tabla 3. Frecuencias otorgadas a 5G.
Fuente:(GSMA, 2019b)

FRECUENCIA	CARACTERÍSTICAS
Por debajo de 1 GHz	Permite una cobertura amplia en zonas urbanas, suburbanas y rurales se pueda facilitar la asignación de frecuencias de 80 a 100 MHz. Contribuirán a los servicios de internet.
Rango entre 1-6 GHz	Frecuencia optima en términos de cobertura y capacidad. Se enfoca a frecuencias de entre 3.3 y 3.8 GHz, las cuales serían la base para que varios servicios de 5G puedan iniciar.
Superior a los 6 GHz	Es sumamente necesario para alcanzar las velocidades de banda ancha ultra-altas. Actualmente las bandas de 24 a 28 GHz, cuentan con la mayor aprobación internacionalmente.

El organismo 3GPP (Proyecto Asociación de Tercera Generación), es el candidato pionero para estandarizar las características del 5G, admitiendo que los tamaños del canal de comunicación vayan desde los 5 MHz a 100 MHz para las frecuencias por debajo de 6 GHz; y de 50 MHz a 400

MHz en las bandas de frecuencias superiores de 24 GHz. Y aunque en Ecuador la implementación de tecnología 5G no empieza a surgir en totalidad, el órgano regulador ARCOTEL menciona que se adaptaría a los estándares internacionales previamente aprobados. (GSMA, 2019b)

2.4.2. Infraestructura de 5G

Las redes inalámbricas actuales están constituidas por la combinación de macroceldas¹ que son antenas destinadas a proporcionar cobertura en áreas amplias, y de microceldas² las cuales ayudan a mejorar la cobertura y se destinan a lugares determinados; estas redes reciben el nombre de heterogéneas o “hetnets” y aunque el proceso de implementación de la red de quinta generación se encuentra en pleno desarrollo, es importante denotar que su infraestructura no difiere considerablemente, en sí se basará en la mejora de este tipo de redes inalámbricas y para ello requerirá de la producción de nuevas microceldas³ por cada macrocelda⁴ instalada en las superficies urbanas, como se aprecia en la Figura 18. Permitiendo a la tecnología 5G volverse mucho más rápida, eficaz y ahorrativa al posicionar sus antenas lo más cerca de sus usuarios. (GSMA, 2019a).

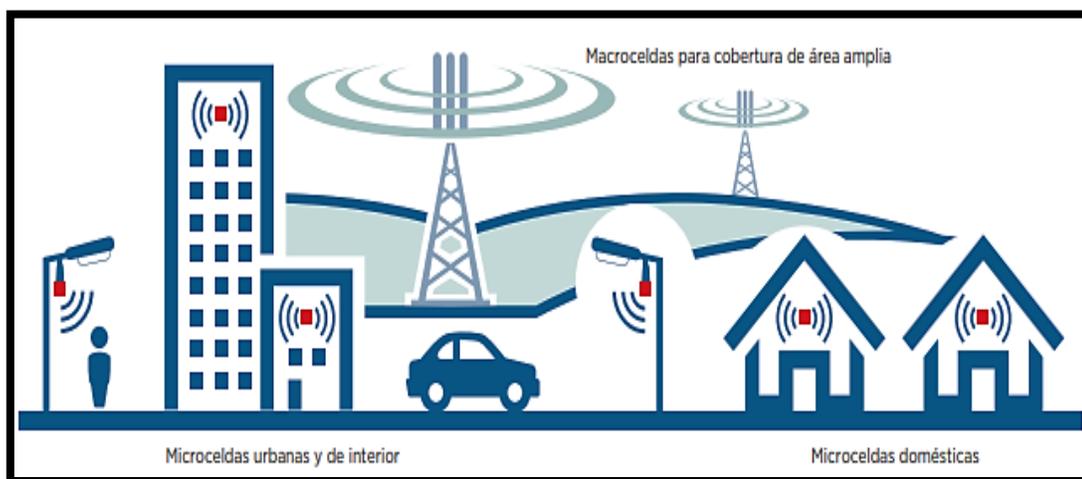


Figura 19. Representación de una red heterogénea para 5G

Fuente: (GSMA, 2019a)

¹ Antenas con capacidades superiores en cobertura, pueden alcanzar hasta 20 km de distancia, por lo general son usadas para conexiones punto a punto y conexiones de gran amplitud en zonas abiertas o sin mucha interferencia.

² Antenas vinculadas a torres o estructuras que se ubican dentro de zonas pobladas a fin de otorgar mejor calidad de señal a los usuarios.

³ Antenas con capacidades superiores en cobertura, pueden alcanzar hasta 20 km de distancia, por lo general son usadas para conexiones punto a punto y conexiones de gran amplitud en zonas abiertas o sin mucha interferencia.

⁴ Antenas vinculadas a torres o estructuras que se ubican dentro de zonas pobladas a fin de otorgar mejor calidad de señal a los usuarios.

2.4.3. Aplicaciones que surgen de la red 5G

La constante evolución en las tecnologías inalámbricas a ido ofreciendo aplicaciones que ofrecen una gran variedad de servicios y funcionalidades para sus usuarios, que cada vez son más sofisticados y demandan mejores capacidades para las redes de comunicación. Hoy se puede disfrutar de aplicaciones que permiten jugar online, alta definición en programas de televisión, videoconferencias, entre otras, que mejoran con el paso de los días y son más exigentes por su propio contenido y exigencia. (Lucía et al., 2018).

Por lo tanto la red de quinta generación prestara soluciones para una transformación digital donde surgirán aplicaciones como el internet de las cosas (IoT), seguridad vial, realidad virtual o la ultra alta definición, las cuales podrán lograr su total implementación y despliegue, situaciones que ya empezamos a experimentar con ejemplos como: un auto conectado a la red para información de rutas o tráfico, la realidad virtual aplicada en medios publicitarios, robots conectados en la red trabajando y automatizando fábricas; dichos ejemplos hacen uso de la red de quinta generación y gracias a ella también se espera la iniciación de procedimientos virtuales quirúrgicos, medios de transportes más eficientes y seguros, comunicaciones instantáneas para servicios como de emergencias y una nueva manera de poder disfrutar entretenimiento de última generación en nuestros hogares mediante la realidad virtual en tres dimensiones 3D. (Next Generation Mobile Networks Alliance 5G Initiative, 2018).

Básicamente estas aplicaciones son el impulso para el apareamiento de redes mucho más sofisticadas como lo es la red de quinta generación, permitiendo a ellas la posibilidad de conectar millones de dispositivos a la red simultáneamente, como se aprecia en la Figura 20.; con el objetivo de brindar mejores experiencias a la población mundial y mejorar su calidad de vida.



Figura 20. Representación del Internet de las Cosas (IoT).
Fuente: (Europea, 2019)

Estamos en camino a crear un nuevo ecosistema de dispositivos interconectados, que brindaran una gran variedad de multiservicios, a dicha tecnología se la conoce como el internet de las cosas (IoT) y es la aparición más primordial que se efectuara con la red 5G; la cual incluirá redes de sensores, domótica, sistemas de vigilancia y control, etc., de donde nacerá innumerables cambios en la mayoría de los sectores industriales a nivel mundial, recibiendo una revolución industrial completamente tecnológica y conectada en red, que mejorará indudablemente todos los procesos actuales (Julio Cerezo y Pepe Cerezo, 2017).

2.4.4. Internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas por sus siglas en inglés (Internet of Things), se lo describe en una publicación del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), como la red que incorpora varios tipos de dispositivos, software, actuadores, plataformas informáticas y protocolos de comunicaciones; de un alto nivel que utilizan sensores, agregadores, canales de comunicación, utilidad externa y desencadenador de decisiones para desempeñar funciones por sí solos a fin de automatizar procesos y mejorar la actividad diaria de los usuarios por medio de conexiones a la red. (Hurlburt et al., 2017).

La llegada del internet permite captar todo tipo de información; Hoy en día varias empresas empiezan a adoptar principios de IoT como Google maps o waze, que a través de varios sensores ubicados alrededor del mundo permiten saber con exactitud la información de rutas, congestiones vehiculares, tiempo aproximado en dirigirse de un lugar a otro y hasta las condiciones de las vías a transcurrir. (Julio Cerezo y Pepe Cerezo, 2017). Para lograr esa conectividad se hace uso de antenas con elevadas características en ganancia y por lo general del tipo microstrip o parche debido a que se componen con materiales particularmente pequeños y sobre todo son adaptables a dispositivos móviles ideales dentro del IoT, es así que el uso de antenas parche son muy populares en aplicaciones dentro del IoT por las siguientes cualidades, explicadas en la Tabla 4. (Irene Oñate, 2019)

Tabla 4. Antenas Parche dentro del IoT.
Fuente: (Irene Oñate, 2019)

Característica	Especificación
Análisis	Puede ser estudiada en software de análisis de campos electromagnéticos
Diseño	Perfil diseñado para adaptarse a diferentes modelos con tamaño reducido desde 0,6 mm hasta 60 cm cuadrados
Perfil	Delgado, desde los 0.5 mm.
Flexibilidad de forma	Adaptable a varios modelos
Costo de fabricación	Bajo, pueden ser desarrolladas sin necesidad de laboratorios electromagnéticos.
Alimentación	Las líneas de alimentación y de acoplamiento pueden ser fabricadas simultáneamente

2.4.5. Infraestructura del IoT

La infraestructura del IoT, se basa en diferentes modelos de referencia, para la ejecución de nuestro proyecto se ha tomado el modelo de referencia según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). En donde nos explica que dicho modelo este compuesto por cuatro capas, en este sentido la Figura 21., muestra las diferentes capas que componen la infraestructura las cuales son:

- Capa de Aplicación
- Capa de Servicio
- Capa de Red
- Capa de Dispositivo

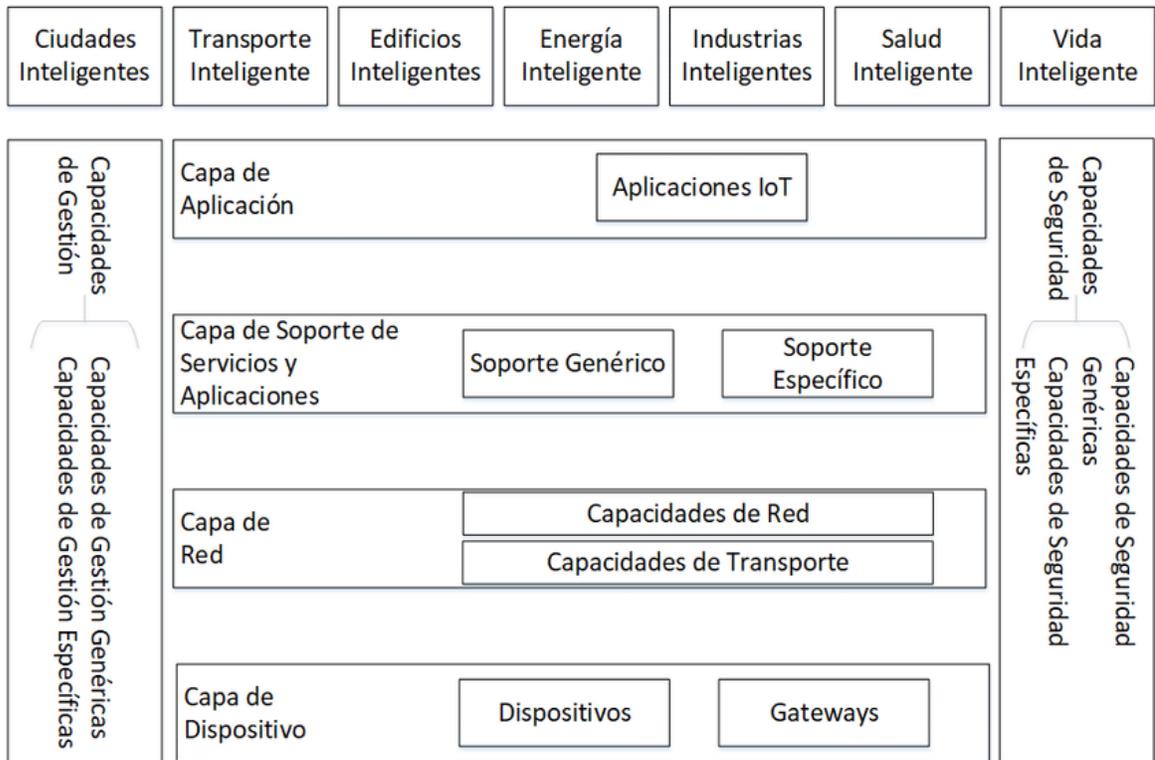


Figura 21. Arquitectura del Internet de las Cosas (IoT), Modelo de referencia según la ITU.
Fuente: (ITU Telecom, 2018)

La capa de aplicación, se enfoca en poder brindar al ser humano la facilidad de que por medio de aplicaciones amigables se pueda manejar y visualizar los datos a obtenerse y obtenidos de cualquier tipo de sistema además es la capa donde se encuentran los componentes propios de cada implementación, tales como los componentes de gestión, configuración y seguridad a ellos sumados los componentes de visualización.

Mientras que, en la capa de servicios, se la define como la computación en la nube la cual consta de dos grupos, soporte genérico y soporte específico. El soporte genérico realiza funciones

que pueden ser utilizadas por los diferentes tipos de aplicaciones que se encuentra en el IoT, como, por ejemplo: función de obtención de datos para aplicación de almacenamiento y procesamiento de identificación de personas; mientras que el Soporte Específico desarrolla variedad de funciones de apoyo para el ser humano, a fin de proporcionar soluciones rápidas y especiales en los requisitos de las aplicaciones.

Por otra manera la Capa de Red, se basa a la infraestructura por la cual se conecta el sistema de cada aplicación hacia el exterior por medio de tecnologías tipo alámbricas e inalámbricas, por lo general dentro del IoT se utilizan tecnologías inalámbricas, esta capa cuenta con dos tipos de funciones: Capacidades de red, la cual proporciona diferentes tipos de funciones que permiten el acceso y control de los recursos del transporte de datos, la gestión de movilidad de los mismos, y la seguridad por medio de protocolos (AAA), que consisten en tres pasos esenciales autenticación, autorización y contabilidad; y las capacidades de transporte, en donde se tiene la responsabilidad de dar la conectividad adecuada para el transporte de todos los datos de los servicios o aplicaciones del IoT y otorgar al usuario la gestión del control de los mismos.

Finalmente, la capa de dispositivo es la clave para poder intercomunicar los dispositivos con el internet, esta infraestructura cuenta con las funciones de dispositivos y gateways, en donde consiste en brindar los recursos necesarios para que por medio de tecnología inalámbrica puedan comunicarse para recolectar y transmitir datos captados por sensores bien sea en señales analógicas o digitales. (Villamil et al., 2020).

A continuación, se presenta la Tabla 5, en la cual se explica una construcción de la infraestructura de IoT, la cual se debe tener muy en cuenta al momento de diseñar aplicaciones puesto que se debe empezar por la capa más baja e ir ascendiendo.

Tabla 5. Infraestructura IoT, niveles de enfoque, tecnologías y protocolos usados.

Fuente: (Dahlman et al., 2014)

Capa	Dominio	Característica
Aplicación	Ciudades inteligentes Salud, Seguridad, Viabilidad	Es más popular en escenarios como Salud, viabilidad, seguridad, y ciudades inteligentes.
Apoyo a servicios y aplicaciones	Localización de infraestructura	La Infraestructura mayormente se encuentra en las capas superiores
	Middleware	Orientada en soportar toda la infraestructura y ofrecer servicios a la capa de aplicación
Red	Tecnologías de comunicación	ZigBee, LoraWAN, WiFi, 3G/4G/5G
	Topología de red	Estrella, punto a punto
	Protocolos	Rest ⁵ , CoAP ⁶ , MQTT ⁷ , XMPP ⁸ , XML ⁹ , JSON ¹⁰
Dispositivo	Objetos	Variedad de tecnologías inalámbricas, WSN, RFID
	Capacidades	Plataformas con mayor capacidad, microcomputadores, microantenas y de bajo costo
	Sistemas Operativos	Windows 10 IoT Core, LiteOS basados en Linux: Zephyr, Raspbian, Ubuntu Mate, Google Brillo

⁵ Interfaz que permite conectar cualquier sistema que use protocolo HTTP a fin de obtener o generar datos.

⁶ protocolo que replica el funcionamiento de HTTP, para lograr trabajar en aplicaciones de IoT y en la redes de sensores inalámbricas

⁷ protocolo para la comunicación destinada a la conectividad M2M Machine to Machine, la cual permite la comunicación de forma inalámbrica entre los dispositivos

⁸ Protocolo extensible de mensajería y comunicación presencial, permite el intercambio de datos XML Ideados para la mensajería instantánea.

⁹ usado para la realización de llamadas remotas en redes informáticas, mediante la ayuda del protocolo HTTP quien permite el transporte de datos mientras que XML presenta los datos.

¹⁰ por sus siglas en inglés (JavaScript Object Notation) que es un formato de texto pensado para el intercambio de datos, basado en la sintaxis de JavaScript. Nota: Adaptado de (Jefferies, 2004)

CAPÍTULO III:

METODOLOGÍA DE DISEÑO

Se procede a realizar el análisis de todos los requerimientos necesarios, los cálculos de las medidas de la antena y la caracterización del diseño, para que en conjunto se entregue un óptimo diseño con buenos resultados en cuestión de los parámetros de antena como son: ancho de banda, frecuencias de trabajo y diagramas de radiación.

3.1. Descripción general

El contenido de este apartado describe los diferentes procesos que se realizan en el trabajo de titulación, el cual tiene como fin presentar una antena tipo parche para sensores de la red de quinta generación, dicha antena es: estudiada, diseñada y caracterizada por el autor, en base a varias investigaciones acordes al tema y, además, se detalla el alcance y limitaciones presentadas.

El modelo investigativo incluye varias etapas, a continuación, se describe las limitaciones para el trabajo realizado.

El proyecto se basará en la investigación de nuevas tecnologías, como es la red de quinta generación, para enfocarse en el elemento primordial de las telecomunicaciones que son las antenas, es así que se dará el estudio a las mismas con orientación a las tipo parche, para obtener el conocimiento necesario a fin de diseñar y caracterizar una antena parche tipo Yagi-Uda, para posteriormente fabricarla y finalizar el trabajo con la obtención de resultados de las pruebas a las que se someterá la antena. Se puede definir como limitaciones del presente trabajo que la ciencia, tecnología e innovación tecnológica en Ecuador se encuentra rezagada, lo que afecta a nuestro proyecto por falta de materiales para la fabricación y lugares para el mismo fin, así como también la teoría y falta de implementos para la realización de las pruebas, para lo cual se desarrolla e implementa el proyecto con base a información relevante de países pioneros en tecnología. El presente proyecto consiste en desarrollar por medio de software asistido por computadora, la base estructural de la antena, se trabaja en un software analizador de campos electromagnéticos en 3D;

de tal manera que previo a cálculos determinados se desarrolla y caracteriza un diseño de antena óptima para los fines requeridos y la cuál entregue los resultados efectivos para su funcionamiento en tecnología 5G.

En este sentido, se trabajará en una PC dotada de un procesador Intel Core i7 con una memoria RAM de 12 Gb y una tarjeta gráfica AMD Radeon; requerimientos aceptados por los programas para su correcto funcionamiento.

3.2. Metodología de diseño

El presente trabajo de titulación se realiza basado en la metodología de diseño “Modelo en cascada”, cuyo modelo depende de un ciclo de vida secuencial, logrando un avance adecuado ya que requiere de la finalización de cada etapa para poder dar inicio a la siguiente, de tal manera que el trabajo se vaya comprobando y completando de una manera eficiente; dicho modelo se muestra en la Figura 22. en donde se presenta 4 etapas: etapa 1. Requisitos y Requerimientos, etapa 2. Diseño, etapa 3. Implementación y etapa 4. Verificación.

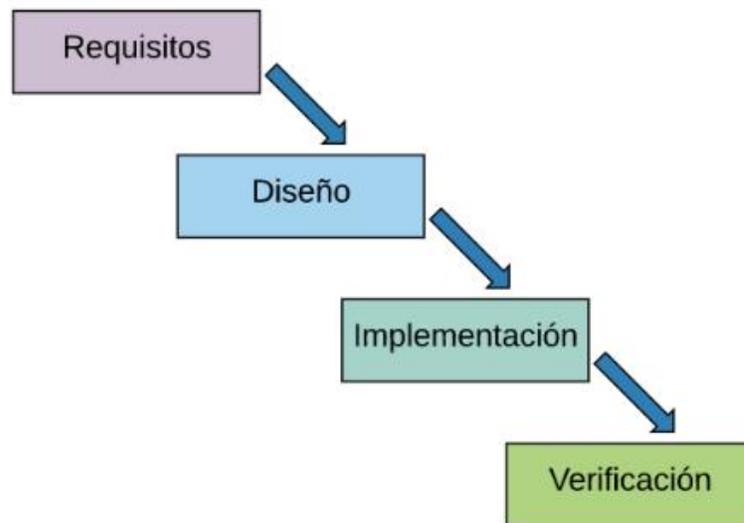


Figura 22. Modelo tipo cascada
Fuente: (Dominguez, 2020)

3.2.1. Requisitos y Requerimientos

Dentro de la Etapa 1, se permite conocer los factores abarcados en el proyecto, para dar un análisis investigativo que ayude en el proceso de selección a los requerimientos necesarios para satisfacer las necesidades de análisis que implica los requerimientos de arquitectura, de sistema, de usuario, entre otros. Además, se estudia las diferentes problemáticas que se pueden presentar dentro del proyecto investigativo.

Por lo tanto, se procede a establecer los requerimientos que se acoplaran al proyecto, con respecto a software y hardware, mediante una técnica de investigación descriptiva que permitirá obtener los requisitos óptimos para la realización y que sean al alcance del autor.

Se procede a analizar los requerimientos a implementar en el proyecto y para ello, nos basamos en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148:2011, soporte esencial para el desarrollo de nuestro proyecto debido a las directrices que otorga para la realización de todos los procesos relacionados con ingeniería, además de definir requisitos para el correcto diseño, fabricación y prototipo del proyecto. Dicho estándar sirve en la implementación de software, sistemas y servicios a lo largo del ciclo de vida, definiendo funciones, restricciones, requisitos y necesidades que son aplicables en el desarrollo de ingeniería. (IEEE, 2020).

Se continúa con el desarrollo de tablas que determinan las consideraciones que se obtienen a partir del estándar para el buen diseño, se cuenta con los requerimientos fundamentales para el proyecto, requerimientos de arquitectura y los requerimientos de stakeholders, a fin de presentar información clara y objetiva en la selección de software, hardware y demás puntos esenciales para el correcto desarrollo del proyecto. En la Tabla 6 se procede a la adaptación de los términos abreviados que harán referencia a cada uno de los requerimientos que se emplearán en el progreso del proyecto.

Tabla 6. Abreviados y acrónimos para el uso del análisis de requerimientos.

Acrónimos y Abreviados	Descripción
StSR	Requerimientos de Stakeholders
SySR	Requerimientos del Sistema
SRSR	Requerimientos de Hardware y Software

A continuación, se desarrolla la Tabla 7. de prioridad del requerimiento, la cual se establece para indicar la importancia en función de tres prioridades: alta, media y baja; otorgando la facilidad de identificar los requerimientos más y/o menos importantes

Tabla 7. Prioridad de requerimientos.

Prioridad	Descripción
Alta	Requerimiento muy importante y crítico, el cual obligatoriamente debe adaptarse en el proyecto para el correcto funcionamiento.
Media	Requerimiento que al no ser incluido puede afectar el diseño final del proyecto, sin embargo, en casos de fuerza mayor puede ser omitido.
Baja	Requerimiento que se espera no afecte al proyecto, en el caso de ser o no implementado en el mismo.

Por otra parte, los requerimientos iniciales del sistema (SySR), hacen referencia a límites funcionales y las propiedades que identifican al diseño, se comprende los requisitos y diseño del proyecto, los cuales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Requerimientos iniciales del sistema

SySR					
#	Requerimiento	Prioridad			Relación
		Alta	Media	Baja	
REQUERIMIENTOS DE VISUALIZACIÓN					
SySR1	Se permite simular la antena con la posibilidad de variar las dimensiones más relevantes del diseño		X		
SySR2	Los resultados de simulación deber mostrarse en tiempo real		X		
SySR3	La caja de radiación puede ser variada y editada a fin de estudiar las variaciones que se obtendrán.	X			
SySR4	La simulación requiere de capacidades altas de procesamiento de PC para su correcto funcionamiento	X			
REQUERIMIENTOS FISICOS					
SySR5	La antena debe ser fabricada, acorde a las mediciones obtenidas en los cálculos	X			

Adicionalmente la Tabla 9, muestra los requerimientos necesarios para la arquitectura (SRSH), aquí se determina requisitos de diseño, software y hardware; elementos importantes para la correcta elección de los componentes a usarse en el diseño y fabricación de la antena.

Tabla 9. Requerimientos de arquitectura.

SRSH					
#	Requerimiento	Prioridad			Relación
		Alta	Media	Baja	
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO					
SRSH1	La antena debe ser diseñada en función de los resultados de los cálculos realizados.	X			
SRSH2	La frecuencia de trabajo de la antena debe radiar en 3.5 GHz		X		
SRSH3	La antena debe radiar direccionalmente, por lo tanto, su patrón de radiación es directivo	X			

SRSH4	La antena debe alimentarse por el método de onda coaxial	X
REQUERIMIENTOS DE HADWARE		
SRSH5	La fabricación de la antena debe ser adaptada a las medidas correctas	X
SRSH6	La antena debe estar adaptada a un balun de tipo coaxial	X

Otros requerimientos necesarios corresponden a los stakeholders. Estos requerimientos hacen referencia al individuo o grupo, a los que representará un beneficio o intereses directo por los resultados obtenidos del proyecto, es así como los requerimientos de stakeholders (StSR), Tabla 10., analizan los requerimientos de usuario y a su vez los presentan siendo estos indispensables para los interesados en el proyecto, se determina a los implicados, a quienes se los puede denominar stakeholders y han sido involucrados en el proceso del desarrollo del proyecto.

Tabla 10. Stakeholders del proyecto

Stackeholders	
1.	Comunidad investigativa del norte del país
2.	Sr. Oscar Norberto Hinojosa Suárez – Autor del trabajo de titulación
3.	MsC. Hernán Mauricio Domínguez Limaico – Director del trabajo de titulación
4.	MsC. Jaime Roberto Michilena Calderón MsC – Asesor 1 del trabajo de titulación

A continuación, en la Tabla 11, se indica los requerimientos para stakeholders.

Tabla 11. Requerimiento de Stakeholders.

StSR					
#	Requerimiento	Prioridad			Relación
		Alta	Media	Baja	
REQUERIMIENTOS OPERACIONALES					
StSR1	Las simulaciones del diseño de la antena yagi uda deben reflejar de manera entendible y visible el comportamiento y resultados en el rango frecuencial de 3.5 GHz	X			
StSR2	La antena funcionará por medio de una alimentación directa que se dará mediante la conexión del generador de señal y el acople a través de su balun.	X			
StSR3	La medición de los parámetros de la antena debe ser estudiada en una caja de radiación libre de factores que puedan alterar los resultados		X		
REQUERIMIENTOS DE USUARIO					
StSR4	La antena debe ser presentada en forma de prototipo	X			
StSR5	Los resultados de la antena deben ser analizados y publicados	X			

3.2.2. Elección de Hardware

La selección del hardware se realiza en base a los requerimientos de arquitectura, los cuales fueron descritos en requerimientos de hardware ubicado en la Tabla 9. De manera determinada debemos seleccionar el sustrato base para la implementación de la antena.

3.2.3. Selección del sustrato

Para la selección del sustrato definitivo se ha tomado 2 opciones, las cuales son posibles adquirir en el territorio nacional, En la Tabla 12, que se muestra a continuación, se visualiza la valoración para cada requerimiento.

Tabla 12. Elección Hardware

Sustrato	Requerimientos			Valoración
	SRSH2	SRSH5	SRSH6	
Epoxy Glass RF-4	1	1	1	3
Roger Duroid 5880	0	1	1	2
1 Cumple 0 No Cumple				
Elección: Se logra determinar que el mejor tipo de sustrato para la implementación de la antena en desarrollo es Epoxy Glass FR 4, ya que el mismo cumple con todos los requerimientos necesarios para el buen desempeño de la antena.				

A continuación, en la Tabla 13. se presenta las características principales del sustrato Epoxy Glass FR 4, Para encontrar las especificaciones completas se enlaza la siguiente referencia: (PRO, 2018)

Tabla 13. Características sustrato FR 4

Especificaciones	Propiedades
Modelo	Epoxy Glass FR4
Tamaño	1,020mm x 2,040mm
Diámetro	5.0mm hasta 100.0mm
Permitividad	≤ 5.5

El sustrato FR4 presenta un diseño en PCB dispone de un sustrato de aislamiento y como núcleo y se compone de un material conocido como FR4. La designación FR4 hace referencia a las propiedades del material dieléctrico y al laminado del epoxi reforzado de vidrio tejido tipo 4 para el sustrato. Este tipo de material laminado presenta elevadas propiedades mecánicas y de aislamiento eléctrico, independientemente de la humedad lo que lo convierte en idóneo para aplicaciones de componentes electrónicos. (PRO, 2018)

3.2.4. Diseño del Proyecto

En el presente capítulo del proyecto se realiza la etapa del diseño de la antena Yagi-Uda, con base en los cálculos y requerimientos propuestos, teniendo muy en cuenta los detalles descritos tanto en el apartado de alcance, limitación y situación actual. Además, en el desarrollo del diseño se plantea diferentes etapas de simulación, a fin de ir mejorando los parámetros radioeléctricos de la antena y lograr un diseño que se ajuste a las características y propiedades de una antena parche, y por último se procederá con la fabricación y pruebas de la antena.

3.2.5. Arquitectura del proyecto

A continuación, en la Figura 23. se muestra la arquitectura del proyecto, para lo cual se da inicio con el software y hardware elegido, posterior a la realización de los cálculos se procede con la etapa de diseño de la antena, la cual estará bajo cambios futuros en el modelado para adecuar los parámetros respecto al objetivo de operación frecuencial que debe lograr la antena, cuyo fin es que la antena se adapte a sistemas de IoT con tecnología 5G.

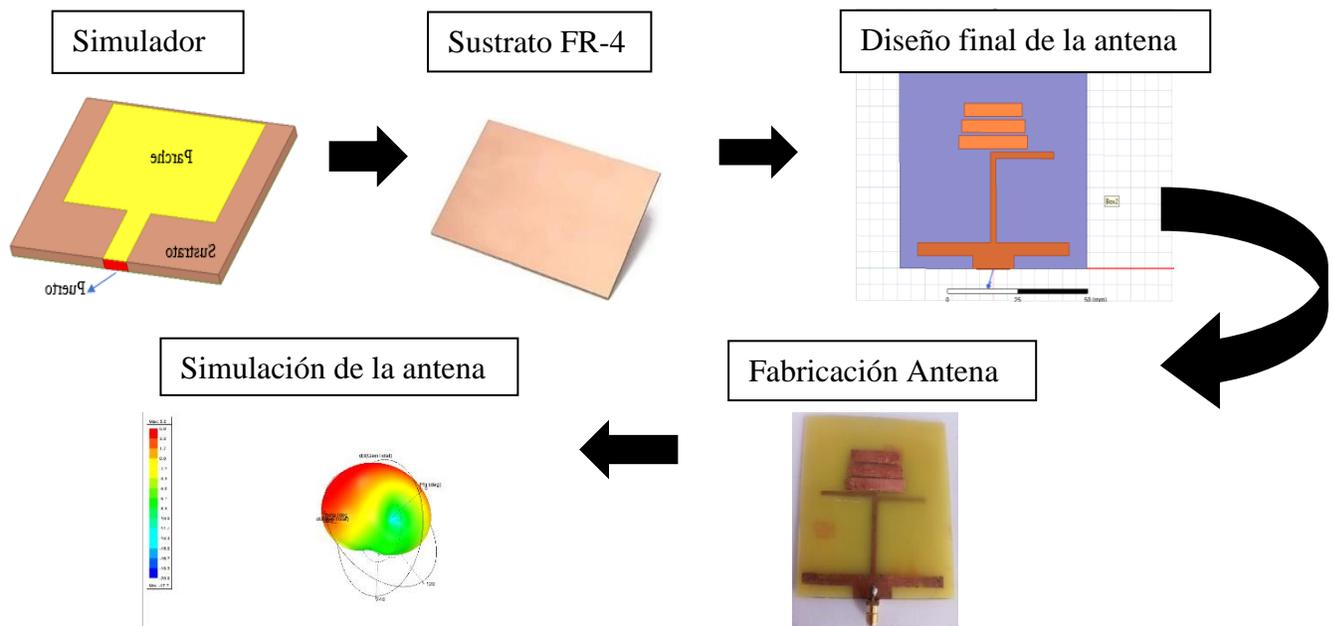


Figura 23. Arquitectura del proyecto

3.3. Principios de diseño y cálculos de antena

El principio de la antena se basa a una antena direccional de tipo parche Yagi – Uda, de tal manera que su estructura es definida mediante directores, reflectores y la alimentación de la antena. Para ello es necesario que, en primera instancia dimensionar el área del parche de la antena, el sustrato FR-4 y el plano de tierra. El dimensionamiento de la estructura base de la antena, es efectuado a partir de las variables de la Tabla 14.

Tabla 14. Variable de la estructura inicial

Nombre de la variable	Dimensión
Frecuencia central	3.5 GHz
Constante dieléctrica (FR-4)	4.4
Altura de sustrato	1.6 mm
Velocidad de la luz	3×10^8 m/s

Una vez establecido las variables iniciales del modelo de la antena base, se aplica las fórmulas generales, las cuales se presentan a continuación:

3.3.1. Ancho del parche (W)

Según (Sreelakshmi et al., 2018) el ancho del parche (W) se calcula mediante la Ec. 7., cuyas variables ya conocidas corresponden a la frecuencia (f_r) con un valor de 3.5 GHz, la velocidad de la luz (C) cuyo valor es de 3×10^8 m/s y la constante dieléctrica (ϵ_r) con 4.4. El ancho del parche es mostrado en la Figura 24.:

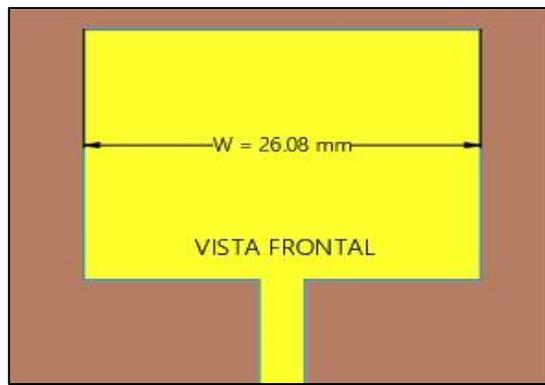


Figura 24. Dimensión que representa

$$W = \frac{C}{2 * fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

$$W = 26.08 \text{ mm}$$

Ec. 7. Ancho del parche

3.3.2. Dieléctrico efectivo (ϵ_{reff})

El dieléctrico efectivo representa el valor máximo que puede alcanzar el sustrato utilizado para la antena y se calcula mediante la Ec. 8., donde es necesario previamente tener el valor de la altura (h) que es 1.6 mm y el parámetro obtenido en la Ec. 7., correspondiente al ancho del parche (W) que es de 26.08 mm. (Sreelakshmi et al., 2018).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_{r+1}}{2} + \frac{\epsilon_{r-1}}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}$$

$$\epsilon_{reff} = 4.93$$

Ec. 8. Dieléctrico efectivo

3.3.3. Longitud efectiva (L_{eff})

La longitud efectiva (L_{eff}) representa el valor máximo que puede tener la longitud del parche de la antena y se calcula empleando la Ec. 9. de (Sreelakshmi et al., 2018), que utiliza el valor de la luz (C) que es $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ dividido para la constante dieléctrica (ξ_r) de 4.4 y la frecuencia central (fr) de 3.5 GHz.

$$L_{eff} = \frac{C}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

Ec. 9. Longitud efectiva

$$L_{eff} = 20.43 \text{ mm}$$

3.3.4. Extensión de la longitud del plano de tierra (ΔL)

El valor de la extensión de la longitud del plano de tierra (ΔL) permite conocer el valor máximo que puede agregarse, este valor se calcula mediante la Ec. 10. por medio de la variable del ancho del parche (W), la altura (h) y el valor del dieléctrico efectivo (ϵ_{reff}) obtenido en la Educación 8., cuyo valor es de 4.93. (Sreelakshmi et al., 2018)

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}$$

$$\Delta L = 0.71 \text{ mm}$$

Ec. 10. Extensión de la longitud del plano de tierra

3.3.5. Longitud del parche (L)

De acuerdo con (Sreelakshmi et al., 2018), la longitud del parche se obtiene a partir de la Ec. 11., con la diferencia entre la longitud efectiva (L_{eff}) calculada en la Ec. 9. y el valor de la extensión de la longitud del plano de tierra (ΔL) obtenida mediante la Ec. 10., es así, que en la Figura 25. se muestra representada la variable de la longitud del parche en la antena.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

$$L = 19.01 \text{ mm}$$

Ec. 11. Longitud del parche

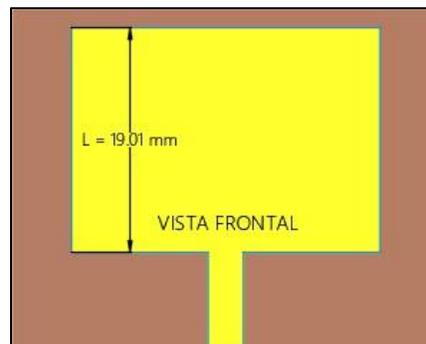


Figura 25. Longitud del parche

3.3.6. Cálculo del plano de tierra de la antena (L_g , W_g)

Las dimensiones de la longitud (L_g) y ancho del plano de tierra (W_g) se calculan mediante las ecuaciones Ec. 12 y Ec. 13., respectivamente, utilizando el valor de altura del sustrato (h) y el valor obtenido del ancho de parche (W). En la Figura 26. se muestra en la parte posterior de la antena, la variable tanto de la longitud y el ancho del plano de tierra. (Sreelakshmi et al., 2018)

$$L_g = 6h + L$$

$$L_g = 28.61 \text{ mm}$$

Ec. 12. Dimensiones de la longitud

$$W_g = 6h + W$$

$$W_g = 35.68 \text{ mm}$$

Ec. 13. Dimensiones del ancho del plano de tierra



Figura 26. Ancho y largo del plano de tierra

A continuación, en la Tabla 15. se detalla de forma resumida las variables de la antena base, para posteriormente realizar el diseño estructural en el software de simulación de antenas, a partir del modelo se dará una previsualización de las dimensiones generales que tendrá la antena, cabe recalcar que estas dimensiones están sujetas a cambios futuros, debido a las posteriores optimizaciones que se dará a la antena.

Tabla 15. Variables del modelo base de la antena

Nombre	Variable	Dimensión
Ancho del parche	W	26.082 mm
Longitud del parche	L	19.01 mm
Dieléctrico efectivo	ϵ_{reff}	4.93
Dieléctrico FR-4	ξ_r	4.4
Ancho del plano de tierra	W_g	35.68 mm
Largo del plano de tierra	L_g	28.61 mm
Altura del sustrato FR-4	h	1.6 mm

3.4. Simulación de la antena base – etapa 1

Para iniciar con el proceso de modelo y diseño de software de campos electromagnéticos es indispensable tener claro la aplicación de la antena y la respectiva frecuencia de trabajo, así como el tipo de patrón de radiación al que se debe llegar. Para ello se plantea un escenario base, es decir se modela una antena típica parche, la cual conste de: el parche, sustrato, alimentación y plano de tierra, cuyas dimensiones fueron calculadas en el apartado 3.3., específicamente en la Tabla 15., se muestra el resumen de los valores referenciales para el modelado. Además, en esta primera etapa se explicará con mayor detalle cómo se establece las características electromagnéticas para cada elemento pasivo y resonante de la antena, se detalla de igual manera la configuración del software para realizar las simulaciones y la obtención de los resultados en el software. A partir del primer modelo, se tendrá una amplia perspectiva para continuar con el proceso de modificación y posteriores cambios para lograr que la antena opere dentro de la tecnología 5G.

En ese sentido, se procede con la etapa 1, mediante el software de campos electromagnéticos, se realiza el diseño estructural de la antena como se aprecia en la Figura 14, cumpliendo con la estructura convencional de la antena parche básica.

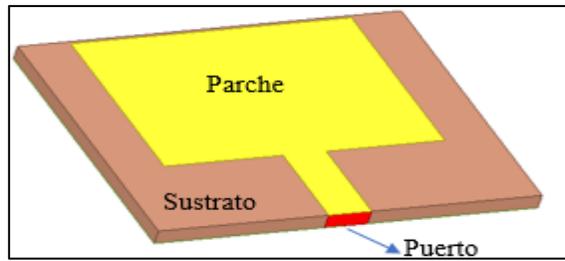


Figura 27. Modelo base de la antena parche

Una vez que se diseña la antena, se debe asignar propiedades electromagnéticas y luego se realiza la configuración pre simulación para establecer algunos parámetros de análisis de la antena, para ello, a continuación, se detalla el proceso de asignación de propiedades para cada elemento de la antena:

3.4.1. Proceso de asignación de propiedades

Como Paso 1, se realizará la asignación de perímetro eléctrico para el parche y línea de transmisión, donde se establece con la asignación (Perfect E) . Para ello primero se selecciona el área del parche >clic derecho, Assign Boundary > Perfect E, tal como se muestra en la Figura 28.:

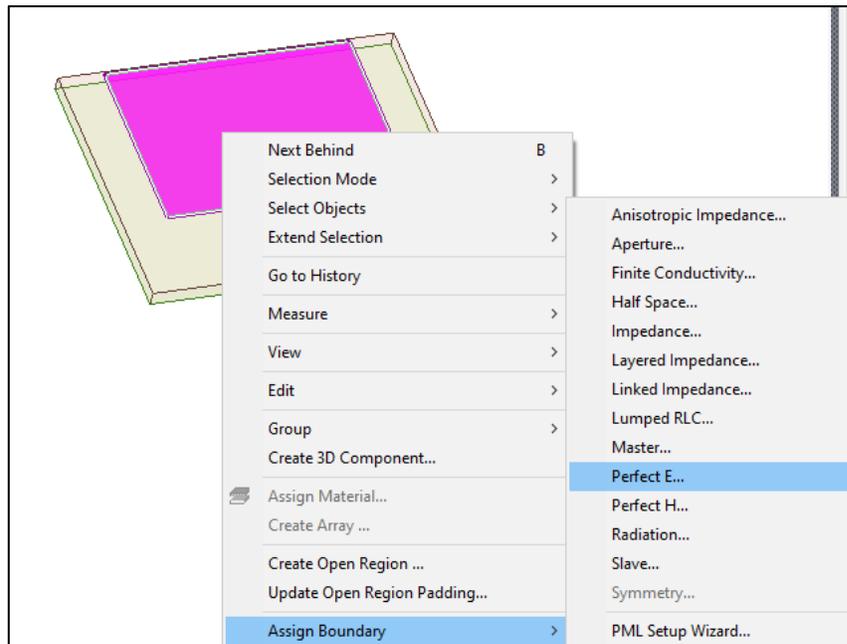


Figura 28. Asignación de propiedad al parche

Una vez realizada la asignación y si se efectuó correctamente, debe ser marcada de una matriz de puntos color azul como se aprecia en la Figura 29. Esta es la forma visual, que permite comprobar si el elemento lleva asignado alguna propiedad.

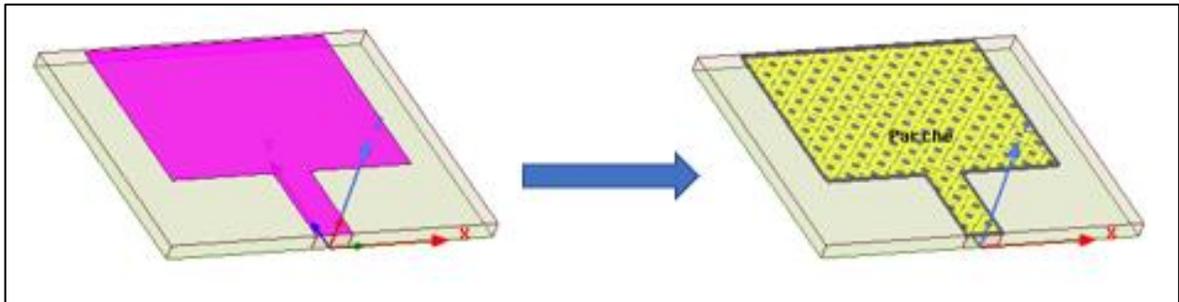


Figura 29. Asignación de perímetro eléctrico – parche y línea parche

Para el paso 2 se dará la asignación de perímetro eléctrico, realizamos exactamente el mismo proceso del Paso 1, a excepción que ahora se realiza la selección del plano de tierra, de igual manera si se realizó el proceso de asignación correcto se marca la matriz azul en todo el plano de tierra, tal como se aprecia en la siguiente Figura 30.:

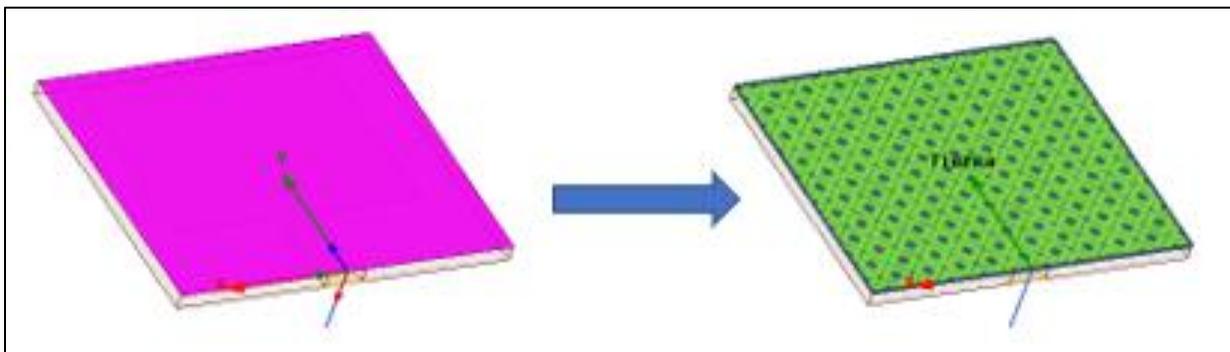


Figura 30. Asignación del perímetro eléctrico – plano de tierra

Y en paso 3, el caso del perímetro de radiación es necesario diseñar una caja que recubra la antena en los planos X, Y y Z. Tal como se aprecia en la Figura 31, el objetivo de realizar este proceso es para que al momento de la simulación, el software adapte ese espacio para la emisión de radiación controlada, para la posterior visualización de resonancias.

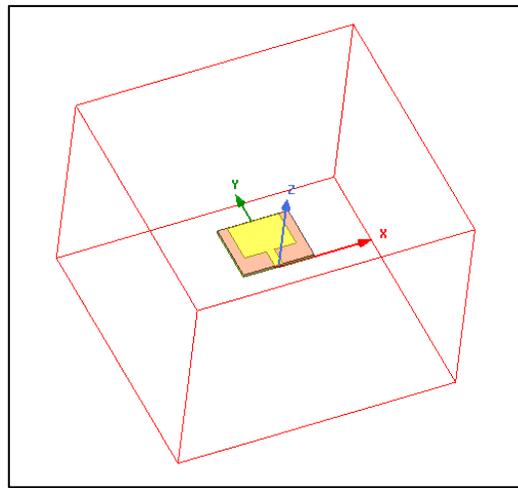


Figura 31. Caja de radiación

Para el proceso de asignación de la propiedad, se sigue el mismo proceso del Paso 1, para ello se selecciona la caja de radiación > clic derecho>Assign Boundary> y clic en Radiation. El proceso se puede visualizar en la Figura 32.

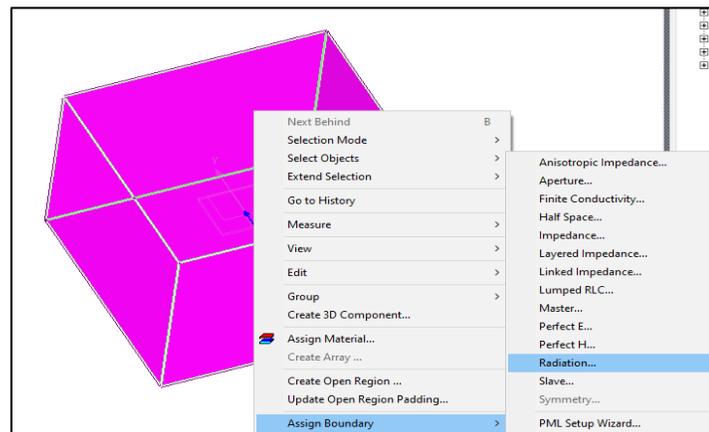


Figura 32. Asignación de la caja de radiación

De igual manera que para la asignación de las anteriores propiedades, se tiene que verificar que efectivamente la caja de radiación cuente con la nueva propiedad asignada, para ello si el proceso fue correcto, se deberá marca toda el área de la caja con una matriz color roja, como se muestra en la siguiente Figura 33.:

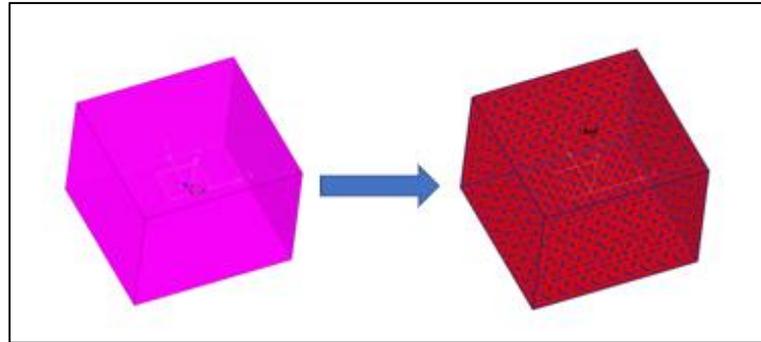


Figura 33. Asignación de propiedad de radiación

Continuando con el paso 4, se debe asignar el puerto de alimentación, el cual emite la energía para alimentar la antena y posterior a ello, realice el proceso de radiación para la emisión o recepción de ondas electromagnéticas, dependiendo de la configuración de la antena, en la Figura 34., se muestra el proceso de asignación del puerto; para ello se selecciona el puerto de alimentación > clic derecho>Assign Excitation>Lumped Port.

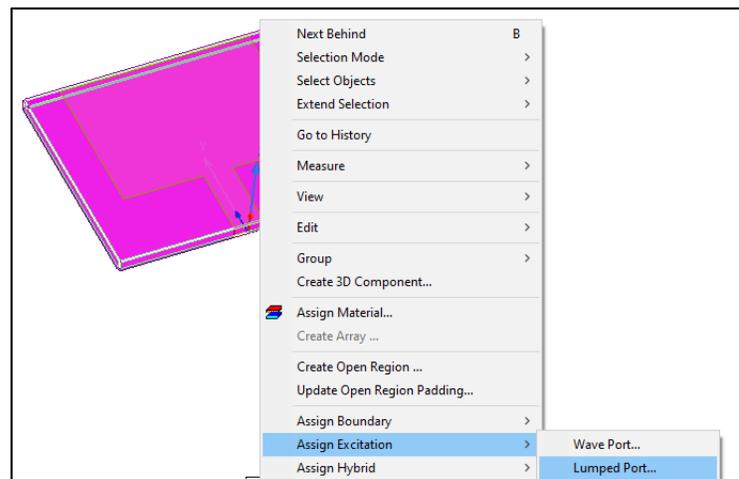


Figura 34. Configuración del puerto

Una vez establecido el puerto es necesario realizar la revisión y constatar que efectivamente ya este asignado, para ello se verifica en el panel izquierdo, tal como, se aprecia en la Figura 35.:

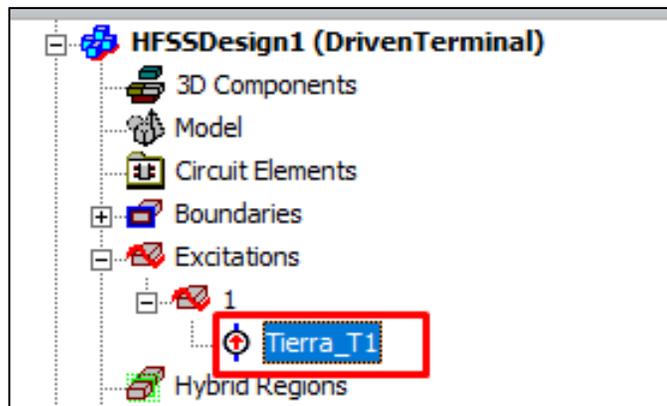


Figura 35. Verificar el puerto asignado

En el paso 5 es indispensable configurar la solución respecto al análisis de la antena, para ello se establece dentro de la solución adaptativa, la cual se configura haciendo clic derecho en >Analysis > clic en Add Solution Setup, como se aprecia en la Figura 36.:

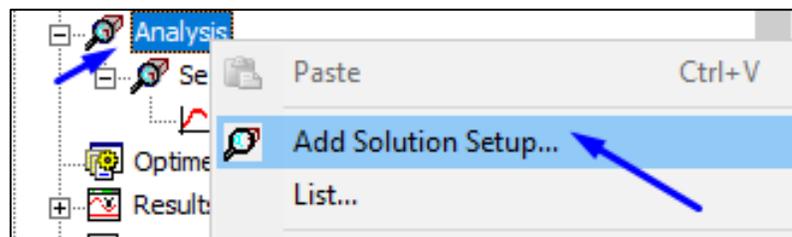


Figura 36. Configurar el análisis de la solución

Luego se establecen los lineamientos en el Setup, a partir de este paso se abrirá una ventana donde se configura las siguientes variables: frecuencia central de operación (para el presente trabajo de titulación seleccionamos Single y colocamos la frecuencia que corresponde a 3.5 GHz), añadimos el número máximo de pase (para caso de estudio al ser una frecuencia de ancho de banda angosto se establece como valor de 8) y por último el máximo delta cuyo valor será de 0.02, este valor permite establecer un rango para tener un mayor control en el proceso de análisis, todo el proceso descrito anteriormente se aprecia en la Figura 37.

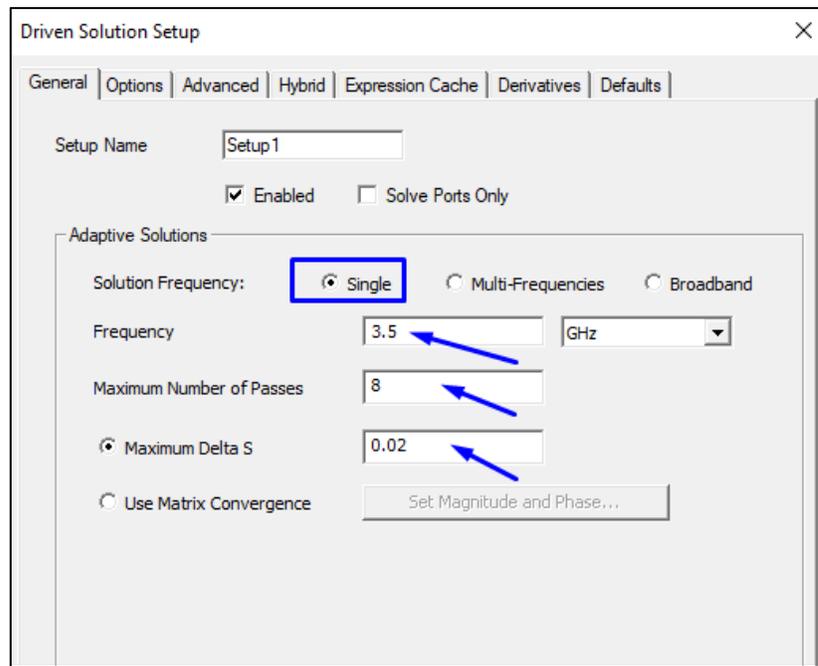


Figura 37. Configuración del Setup

Y el paso 6, es importante ya que es previo a la obtención de los resultados, el cual dependerá de la etapa de diseño y análisis que se encuentre la antena, para ello se utilizará el análisis FAST en etapas previas, ya que este análisis es rápido y se obtiene los resultados en menos tiempo, a la vez que el computador no se sobrecarga en procesos, sin embargo los resultados no son tan concretos, a diferencia de un análisis DISCRETE, el cual se usará en etapas finales de la antena, ya que este tipo de análisis muestra resultados más precisos y conlleva un tiempo de varias horas o días dependiendo de la complejidad de la estructura de la antena y el rango de frecuencia a analizar. Para continuar con el análisis se realiza doble clic izquierdo sobre SWEEP y se configura los parámetros mencionados anteriormente, para esta instancia de simulación se selecciona el análisis FAST y se establece un rango de frecuencia desde 1 GHz hasta 11 GHz tal como se aprecia en la Figura 38., este rango configurado especifica el barrido de frecuencia que realizara el simulador para obtener la gráfica de los parámetros S.

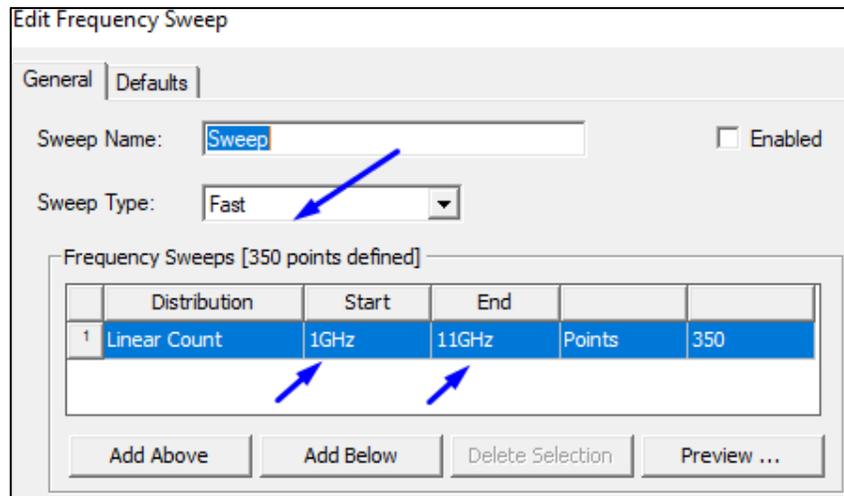


Figura 38. Configuración de los saltos de frecuencia

El paso 7 es previo a la simulación de la antena, donde el propio software brinda la facilidad de tener una revisión completa de toda la configuración del análisis, si el validador muestra una correcta configuración de los pasos descritos anteriormente, es decir desde el paso 1 al paso 6, el proceso de simulación inicia sin problemas, sin embargo, puede existir ocasiones que se haya omitido alguna configuración, esto permite que la herramienta de evaluación del simulador emita la omisión a un paso que se debía haber configurado tal como se parecía en la Figura 39., para el presente caso donde el paso de analysis setup, lo marca como invalido debido a que la simulación se encuentra en proceso de inicialización, al momento de culminar el análisis el validador dará un resultado afirmativo en todos los pasos dado a que la simulación se realizará efectivamente, de esa manera la evaluación permite que se realice el análisis completo.

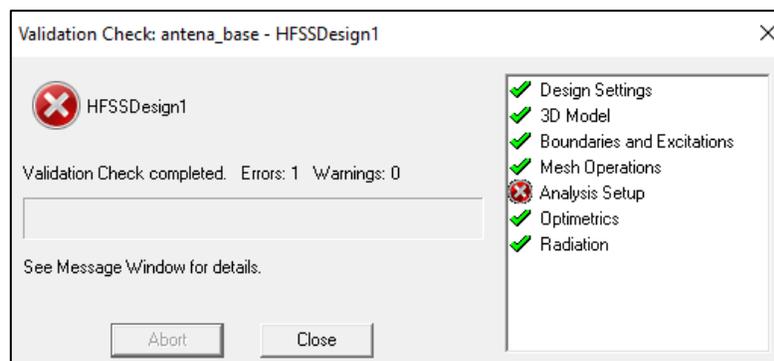


Figura 39. Validador con error de configuración

3.4.2. Resultados de la antena parche yagi-uda– etapa 1

El tiempo de simulación depende de la frecuencia de análisis, mientras más alta la frecuencia se necesita mayores recursos tecnológicos (procesamiento de frames y uso amplio de la memoria RAM), además que depende del tipo de análisis que se configura (fast o discrete). Para la presente simulación se empleó un tiempo de simulación de $t=45$ minutos, posteriormente se procede con el análisis de las gráficas de parámetros S y diagrama de radiación.

- Parámetros S

La gráfica de los parámetros S, describe una reflexión en la frecuencia 3.7 GHz, tal como se aprecia en la Figura 40., con un coeficiente de reflexión de -5.23 dB, para alcanzar el objetivo de operación de la antena que es de 3.5 GHz se observa que se encuentra cercana ambas frecuencias, lo que demuestra que las dimensiones de la antena se deben ajustar para acercarse a la frecuencia buscada.

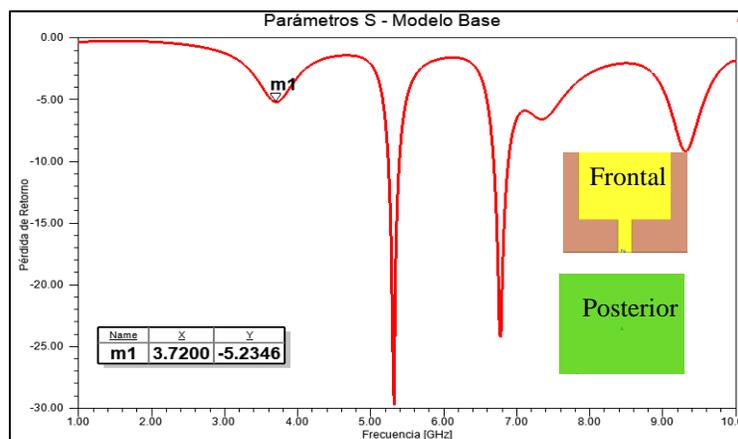


Figura 40. Parámetros S – Antena base

- Diagrama de Radiación

En la Figura 41. se aprecia el resultado del diagrama de radiación, donde se muestra que en la frecuencia correspondiente de 3.5 GHz la antena presenta un patrón de radiación con tendencia direccional, cuyo valor en la dirección $\phi = 0^\circ$ presenta la mayor concentración de radiación con un lóbulo de radiación principal en esta dirección, sin embargo, para $\phi = 90^\circ$ el lóbulo secundario presenta un aumento de radiación en la dirección 210° (-150°).

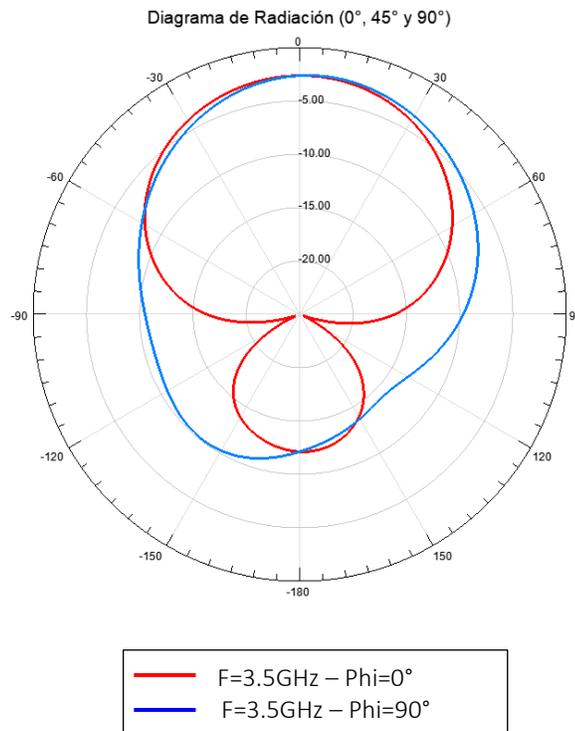


Figura 41. Diagrama de Radiación – modelo base

3.5. Simulación de la antena parche tipo Yagi – Uda – etapa 2

En la etapa 2 del diseño de la antena, se realiza el primer modelado con características de la antena convencional Yagi -Uda, para ello es necesario tener claro el mecanismo de funcionamiento de este tipo de antenas. En un sistema Yagi -Uda, la energía electromagnética se acopla a partir del dipolo, para luego ser impulsado a través de los espacios entre los dipolos parásitos, posterior se vuelve a establecer la energía para formar un haz direccional. Este proceso si bien es el mismo que ocurre en una antena convencional Yagi – Uda, la diferencia que se describe en el primer sistema da a saber que el sustrato desempeña un papel fundamental para el acoplamiento de las ondas superficiales (K. Sreelakshmi, 2018).

En ese sentido, el área del parche de la antena se modifica y se establecen directores, si bien el parche por lo general acopla muy poca energía, debido a que disipa la energía hacia los costados y ligeramente a lo largo de la dirección del plano de tierra. Es así que, para alcanzar el máximo comportamiento como una antena Yagi -Uda, los directores se deben colocar muy cerca

entre ellos como se aprecia en la Figura 28, según (K. Sreelakshmi, 2018) menciona que: la distancia entre directores debe ser igual o inferior al espesor del sustrato que se está utilizando ($d \leq 1.6 \text{ mm}$), el objetivo de la separación entre directores es lograr el máximo acoplamiento, que en palabras simples se traduce a que la antena debe resonar a la frecuencia de operación de trabajo para su respectiva aplicación y con ello mantener una mínima disipación de energía espuria fuera del sistema de transmisión (Tx) o recepción (Rx).

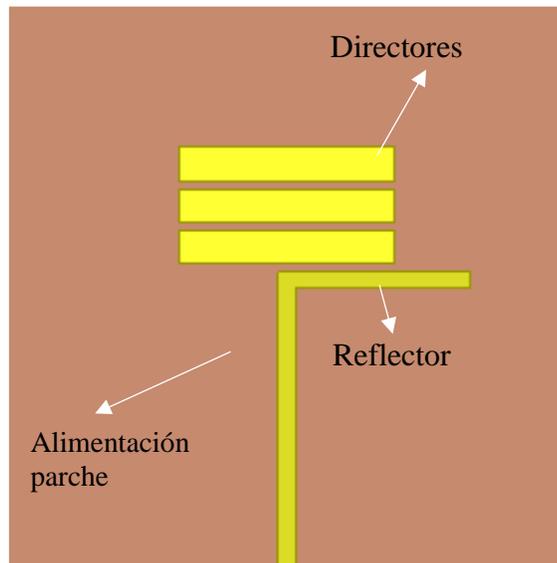


Figura 42. Antena parche tipo Yagi – uda

3.5.1. Resultados de la antena parche tipo Yagi-Uda – etapa 2

En el presente diseño de la antena se conforma la estructura ideal de una antena yagi – uda, la cual cómo se detalló en la Figura 27. consta de directores, reflector y la línea de alimentación. A continuación, se presenta los resultados posteriores a la simulación de la antena en la etapa 2 de diseño.

- **Parámetros S**

En la Figura 43. se presenta el resultado respecto a la curva de reflexión, donde se obtiene un valor de coeficiente de reflexión de -34 dB en la frecuencia 3.61 GHz, en esta etapa se obtienen dos mejoras respecto al anterior resultado de la etapa 1. En primera instancia se observa una mejora

en la sintonización de la frecuencia 3.5GHz y se alcanza un coeficiente de reflexión por debajo de los -10 dB, logrando con este último resultado un mayor acoplamiento a diferencia de los -5.23 dB del diseño en la etapa 1, además a todos estos valores obtenidos se presenta que el ancho de banda es de 0.08 GHz, este parámetro aún no cumple con el objetivo de diseño ya que debe ser mayor a 0.5 GHz.

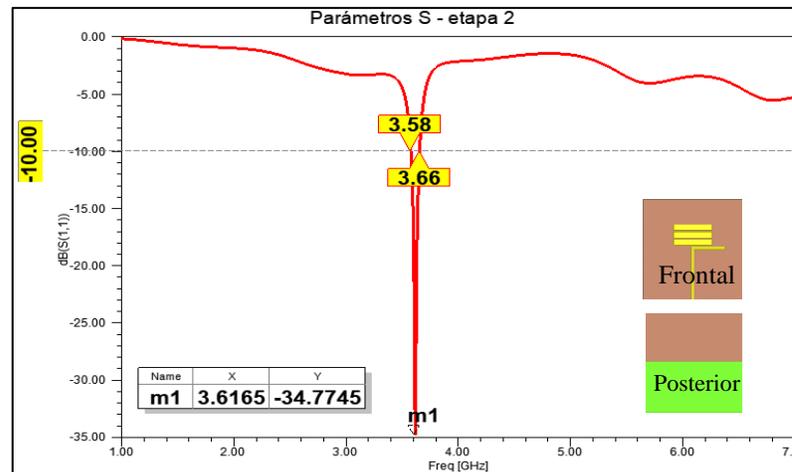


Figura 43. Parámetros S – antena yagi – uda

- Relación de Onda Estacionaria (ROE)

Con respecto al resultado del ROE, este debe ser inferior a 2 dB, esto debido a que, si la curva de reflexión se encuentra por debajo de este valor, quiere decir que el 10% de la energía radiada se refleja hacia la fuente, este valor es el máximo permitido para aplicaciones de radiofrecuencia (Balanis, 2008). En la Figura 44. se presenta el valor del ROE, donde se observa que a partir de la frecuencia menor 3.58 GHz hasta la frecuencia mayor 3.66 GHz cumplen con la regla de los 2dB, sin embargo, la frecuencia de 3.5 GHz (frecuencia de operación de la antena) no se encuentra dentro del rango, es decir en la frecuencia de 3.5 GHz se tiene un ROE de 3.94 dB, lo que se comprueba que la antena está reflejando un porcentaje superior al 10% permitido, lo cual se debe tener en cuenta este dato para una posterior optimización en la antena.

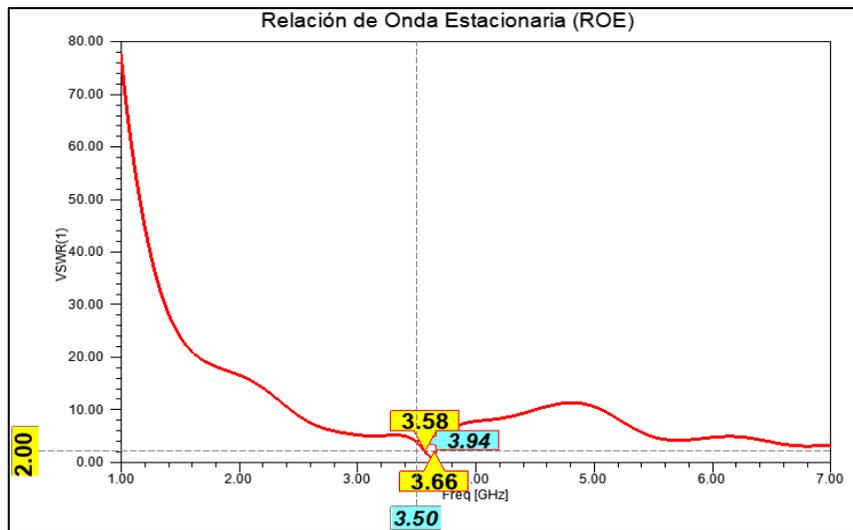


Figura 44. ROE – antena parche tipo yagi uda

3.6. Simulación de la antena parche tipo Yagi – Uda - etapa 3

En esta etapa se realizará el ajuste del coeficiente de reflexión debajo de los -10 dB mediante la modificación del plano de tierra. Como se a mencionado en el apartado de la estructura de la antena tipo parche Yagi-Uda consta de: directores parásitos y el elemento reflector, es así que, mediante el análisis geométrico y de dimensiones de una antena con matriz lineal, la cual fue diseñada por (K. Sreelakshmi, 2018), donde menciona que: “el plano de tierra actúa como reflector para lograr un patrón de radiación directivo”. En ese sentido, se aplica ese cambio para optimizar el diseño de la presente antena propuesta, esta modificación en el plano de tierra se muestra en la Figura 45., la cual actúa como un elemento radiante y consta con propiedades de reflector.

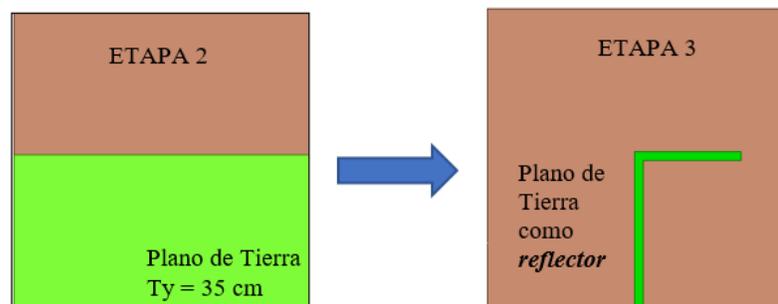


Figura 45. Modificación plano de tierra.

3.6.1. Resultados de la antena parche tipo Yagi-Uda – etapa 3

Con respecto al resultado de los parámetros S, logrado en la Figura 46., queda demostrado que se logra una ampliación del ancho de banda desde la frecuencia inicial 2.36 GHz hasta la frecuencia 3.55 GHz, sin embargo, existe una curva de reflexión desde 3.05 a 3.49 GHz que no coincide dentro de este rango y además está sobre el límite de los -10 dB, por lo cual se debe lograr una óptima sintonización dentro los -10 dB. Otro aspecto para destacar es la sintonización de la segunda resonancia la cual se logra a los 3.49 GHz, cuyo valor es muy cercano a los 3.5 GHz, esta banda es la que finalmente debe operar la antena parche tipo yagi-uda.

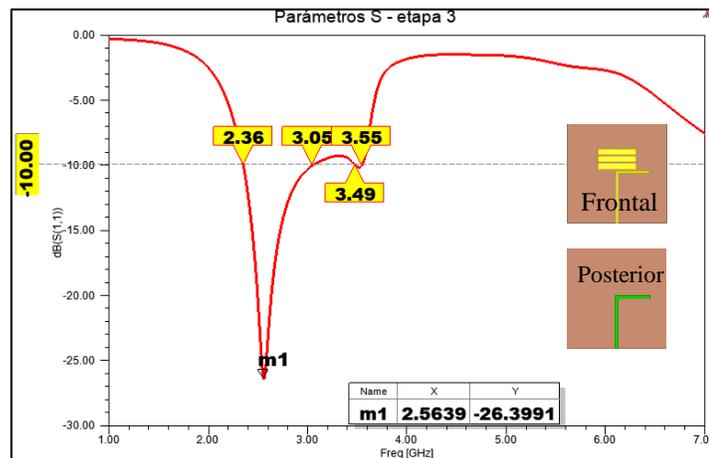


Figura 46. Parámetros S – Etapa 3

- Relación de Onda Estacionaria (ROE)

A diferencia del valor obtenido en la etapa 2, donde el valor obtenido del ROE en la frecuencia de 3.5 GHz fue de 3.94, para la simulación de la etapa 3 se presenta en la Figura 47. un ROE en la frecuencia 3.5 GHz cuyo valor es de 1.91 GHz, lo que quiere decir que, este valor es correcto y se encuentra en el rango debajo de los 2 dB (< -10 dB), es decir la antena presenta un porcentaje inferior al 10% referente a las reflexiones hacia la fuente, rango aceptable en comunicaciones inalámbricas.

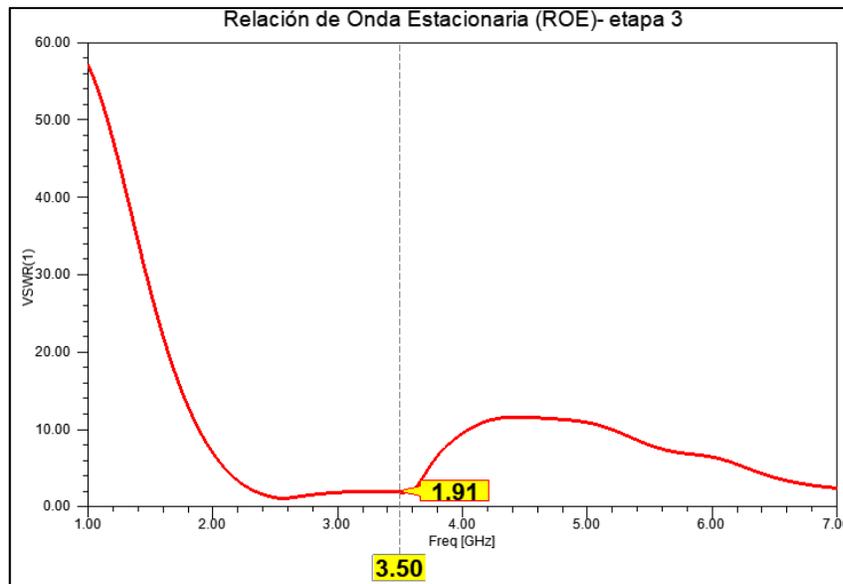


Figura 47. Medición ROE – etapa 3

3.7. Simulación de la antena microsip tipo Yagi-Uda – etapa final.

En la etapa final de diseño se ajusta el coeficiente de radiación de la frecuencia 3.5 GHz para que supere los -10 dB y de esta manera se cumpla con el objetivo de diseño planteado, como se ha visto en las presentes etapas de diseño la antena yagi uda presenta una matriz lineal (sub-array) como se aprecia en la Figura 48., donde cada elemento de la matriz es excitado por señales de igual magnitud para lograr que la antena tipo parche yagi-uda presente una radiación a la frecuencia de 3.5 GHz.

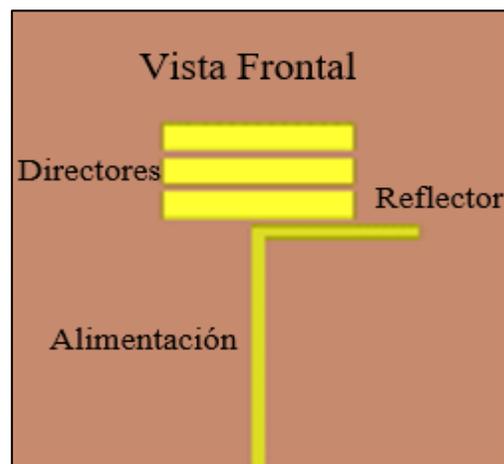


Figura 48. Antena Parche tipo Yagi-Uda

En la última optimización del diseño se evalúa el mejor desempeño de los directores y el reflector, si bien en la etapa 3 del diseño se modificó el plano de tierra, en esta sección se evalúa el efecto que provoca el cambio de dimensión de estos componentes mencionados:

3.7.1. Efecto de la modificación de los tres directores (D1, D2 y D3)

En la Figura 49. se muestra la modificación del tamaño de los directores, a diferenciar en la etapa 2 se realizó la transición del parche cuadrado a tres directores simétricos, en este caso se analiza el comportamiento de los directores con dimensiones asimétricas, con el fin de ajustar el coeficiente de reflexión sobre los -10 dB a la frecuencia de 3.5 GHz.

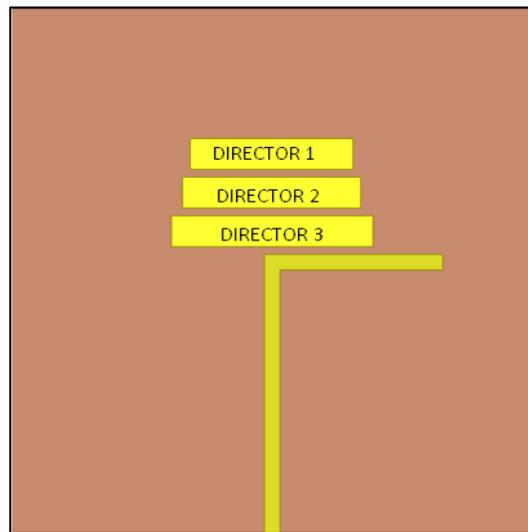


Figura 49. Cambio de directores

Para efectuar este cambio en la estructura, en la cual se acortan los directores se realiza con el siguiente procedimiento:

Como primer paso, se debe ubicar en el árbol de estructuras la variable asignada a cada director >Model >D1, D2, D3, para identificar la estructura el software resalta de color violeta la estructura seleccionada como se muestra en la Figura 50.

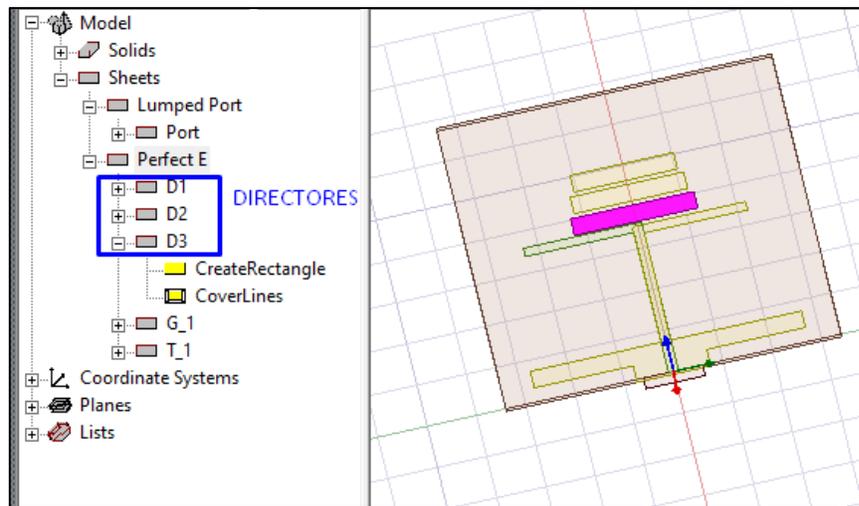


Figura 50. Selección de estructura

Seguidamente como se observa en la Figura 51. se muestra el proceso para cambiar la dimensión, para ello se ingresa a propiedades (panel izquierdo), posterior a ello se redirige a `CreateRectangle` y luego `Properties`.

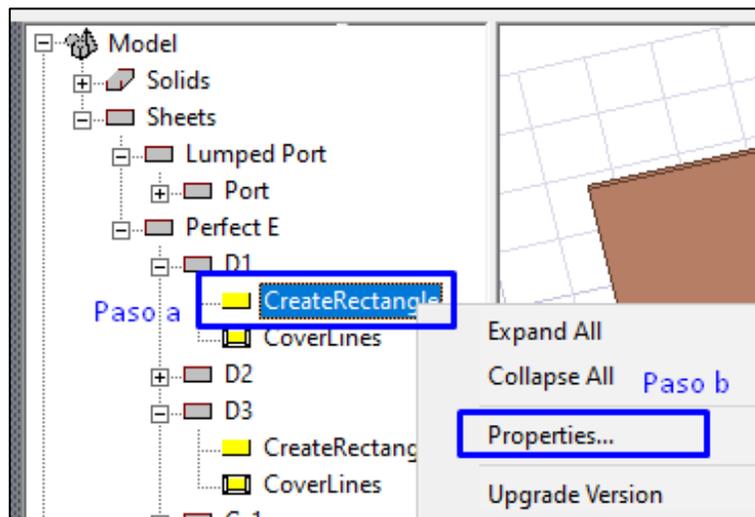


Figura 51. Propiedades del director

Por último, el diseño de la antena se vera como en la Figura 52. que muestra las medidas proporcionadas a cada uno de los directores, siendo el $D1 = 21 \text{ mm}$, $D2 = 23 \text{ mm}$ y $D3 = 25 \text{ mm}$.

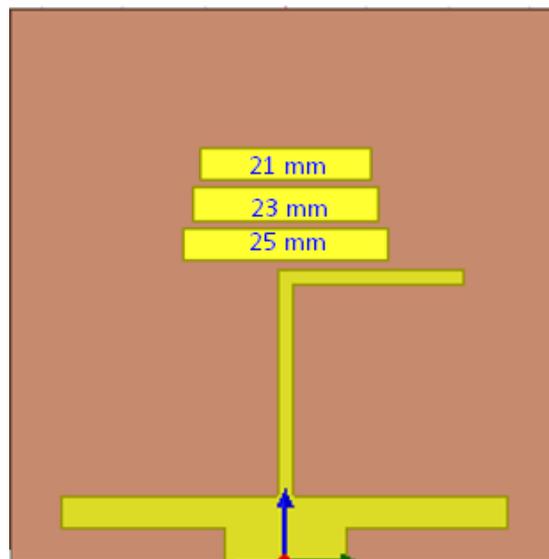


Figura 52. Dimensiones de los directores

3.7.2. Resultados:

La Figura 53. muestra el efecto que provoca el cambio en la dimensión de los directores, los cuales cuentan con las siguientes dimensiones: $D1=21$ mm, $D2=23$ mm y $D3=25$ mm, un ancho de 4 mm y una separación entre ellos de 1 mm. En tal sentido, el principal cambio de optimización afecta a la curva de reflexión, debido a que con los directores simétricos se cuenta con un coeficiente de reflexión de -10.09 dB (intersección con línea entrecortada roja) , justamente este valor se encuentra en el límite de la banda permitida (-10 dB), con ello la antena en un ambiente real presentaría demasiados reflejos hacia la fuente y provocando pérdida de energía, sin embargo con los directores simétricos esta curva cambia y se tiene un valor de -19.99 dB (intersección con línea continua negra) , valor ideal que supera con una diferencia de -9.90 dB respecto al resultado de la antena en etapa 3.

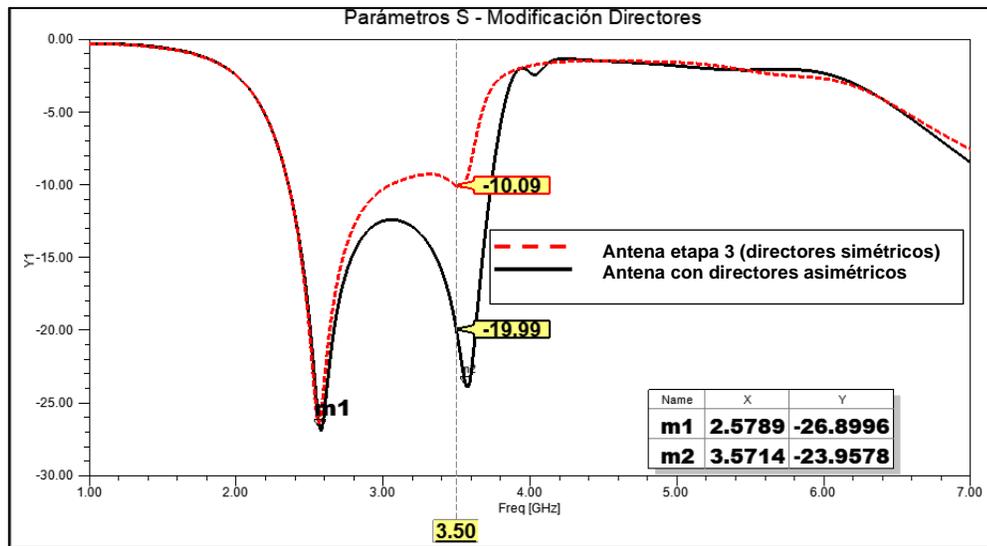


Figura 53. Modificación directores

3.7.3. Efecto de integrar una reflexión juntamente con línea de alimentación

Cabe mencionar que la dimensión del reflector que se integra junto a la línea de alimentación debe ser 5% más grande que el reflector principal, como se muestra en la Figura 54., con el propósito de reflejar la mayor cantidad de potencia, cuyo efecto está estrechamente relacionado con la concentración de energía radiada y la determinación del tipo de radiación que presente la antenna, además el espacio entre el reflector y el elemento energizado tiene un valor aproximado de 0.1λ a 0.25λ , donde este valor también influye en la variación del ancho de banda de la antenna.

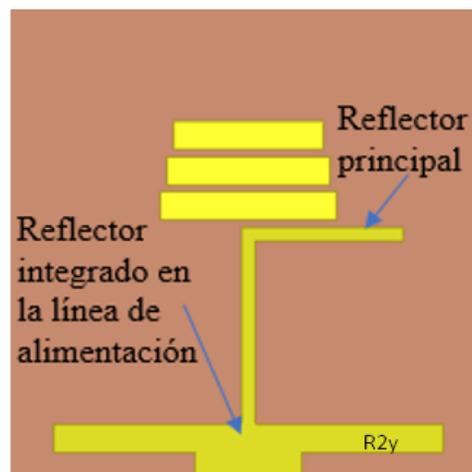


Figura 54. Antena parche tipo yagi-uda versión final

El procedimiento a seguir para lograr la integración de una reflexión juntamente con la línea de transmisión es detallado a continuación:

Primeramente, como se muestra en la Figura 41, se ingresa a `CreateRectangle`, para identificar el reflector que se integra con la línea de alimentación e ingresar a propiedades de R2.

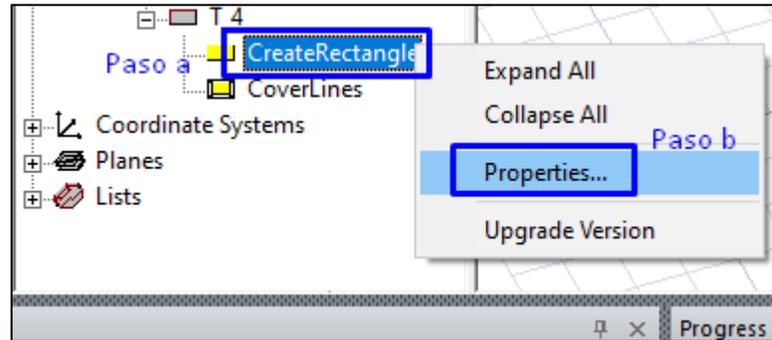


Figura 55. Ingresar a Propiedades

Se continuará evaluando la medida de la variable R2 para que se ajuste a los resultados del coeficiente de reflexión inferior a -10 dB, en primera instancia se asigna una variable para cambiar la dimensión del ancho del reflector, como se muestra en la Figura 56., donde existen algunos campos que se debe llenar como: el tipo de variable, la dimensión y el valor en milímetros.

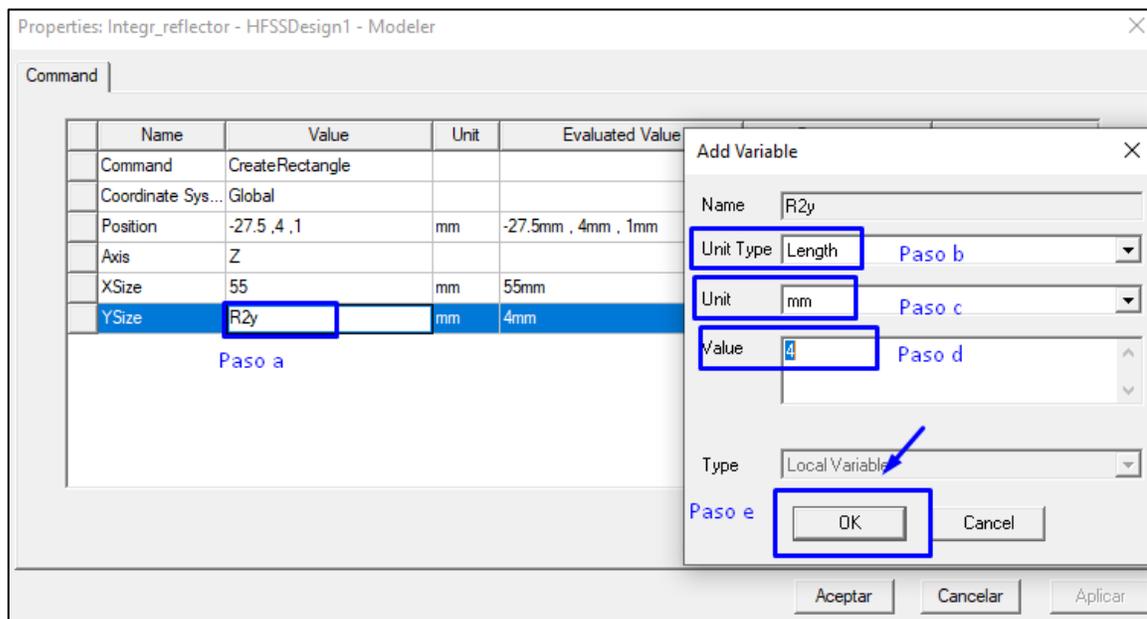


Figura 56. Agregar variable R2y

Procedemos a usar la herramienta PARAMETRICS, para ello se continúa como indica la Figura 57., dicha herramienta sirve para evaluar variables en rangos, con ello se obtiene resultados en diferentes medidas de las variables analizadas, sin embargo, hay que tomar en cuenta que el tiempo de simulación puede tardar un tiempo considerable con relación a una evaluación SINGLE (única).

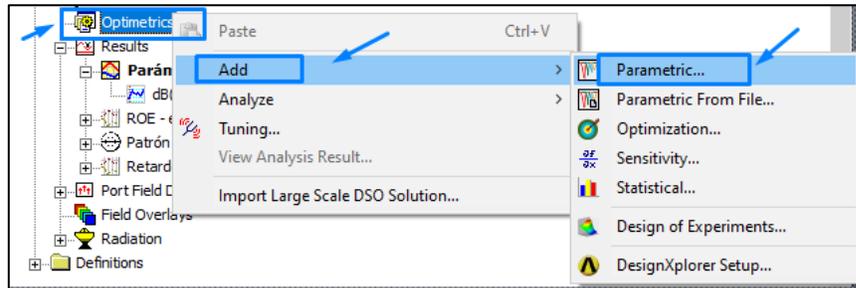


Figura 57. Agregar paramétrica

Por último, en la Figura 58. se muestra el proceso para configurar el barrido de las dimensiones de la variable R2y, la cual inicia en 3mm y termina en 5mm, con pasos de 0.5 m, en una vez configurado estos campos debemos dar clic en >Add, esta opción guarda la información anterior en una tabla para su posterior ejecución en el paso 5.

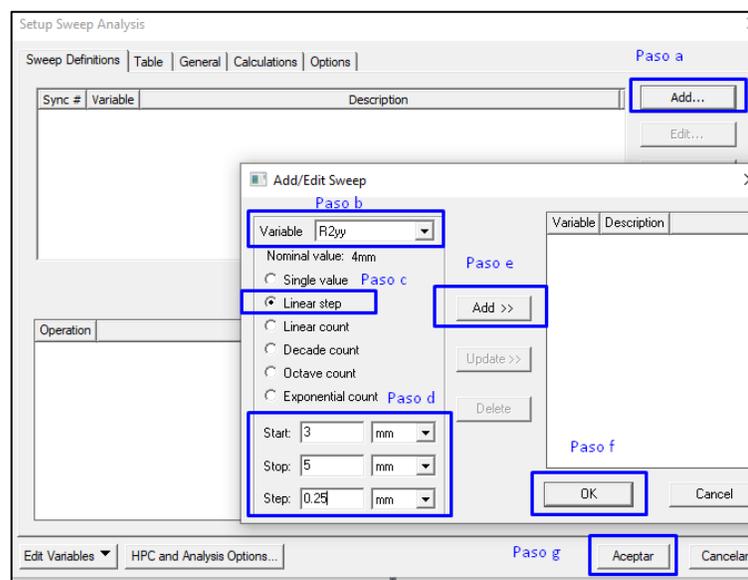


Figura 58. Configuraciones paramétricas

En la Figura 59. se realiza la evaluación de componentes de la antena (caja de radiación y puerto de alimentación), así como configuraciones necesarias para iniciar con el proceso de simulación (asignación de frecuencia de simulación y variables optimetrics).

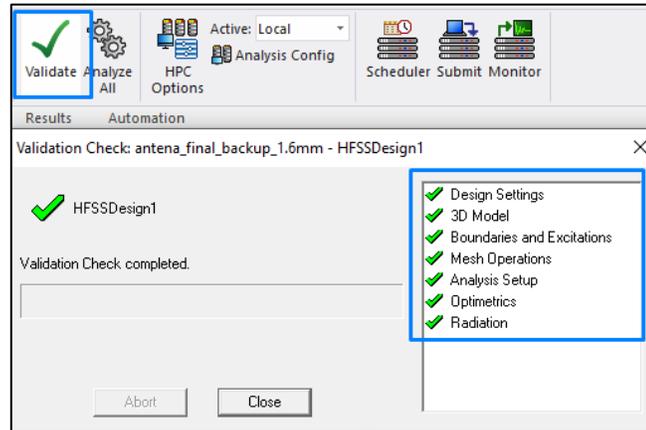


Figura 59. Validación fase final

3.7.4. Resultados:

En la Figura 60. se muestra la variación de la variable R2y, la cual corresponde al ancho del reflector R2, la cual se utilizó la herramienta PARAMETRICS, realizando un análisis en pasos de 0.5 mm en un rango de 3 mm a 4.5 mm, donde se obtiene el resultado óptimo correspondiente a la dimensión R2y con un valor de 4mm, debido a que el coeficiente de reflexión es de -11.64 dB (> -10 dB) a diferencia de la variable segunda dimensión R2y=3mm que se cuenta con un coeficiente de -2.87 dB y la tercera dimensión R2y=3.5 mm y un valor de -2.93 dB.

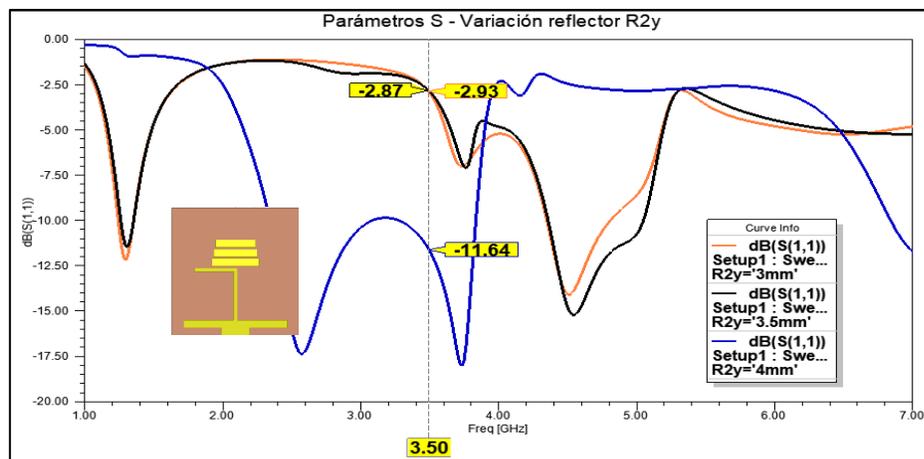


Figura 60. Resultados Parametrics

3.7.5. Efecto de variar la dimensión de la altura (h) del sustrato FR-4

En esta evaluación se determina el valor de la altura (h) de sustrato FR-4 que se acople a los requerimientos de diseño, tales como: Irradiación de la antena en la banda de 3.5 GHz, patrón de radiación directivo, ROE inferior a 2 dB y Retardo de Grupo (GD) inferior a 1 [ns], se procede a detallar los pasos a seguir para el efecto.

Para el paso 1 se muestra la Figura 61. Donde se identifica el nombre de la figura en el cuadro de estructuras, el cual se encuentra en la izquierda. Para el caso del diseño del sustrato se emplea una caja (BOX) de la librería de CreateBox.

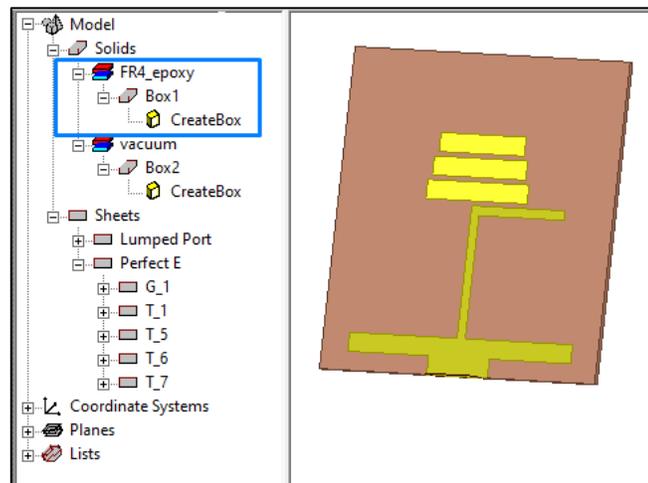


Figura 61. Identificar variable

Una vez identificada la estructura, se debe abrir el panel de propiedades como se aprecia en la Figura 62. Para ello clic derecho en la librería >CreateBox y luego clic en >Properties.

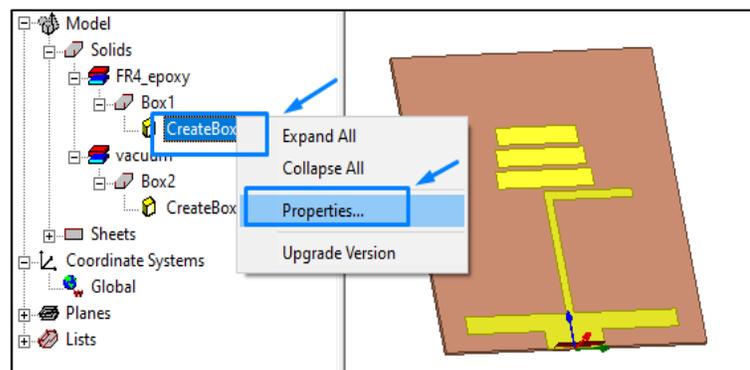


Figura 62. Propiedades

El siguiente paso, consiste en configurar los parámetros de la h (altura). En la Figura 63. Se muestra la configuración de los siguientes datos: Name: h es el nombre que se le asigna a la dimensión de la altura del sustrato FR-4, Unit Type: Length 8 (es el tipo de carácter que se asigna a la unidad), Unit: mm (es el tipo de unidad de medida que se dimensiona la estructura) y Value: 1 (valor inicial que se le da a la variable; en este caso 1mm).

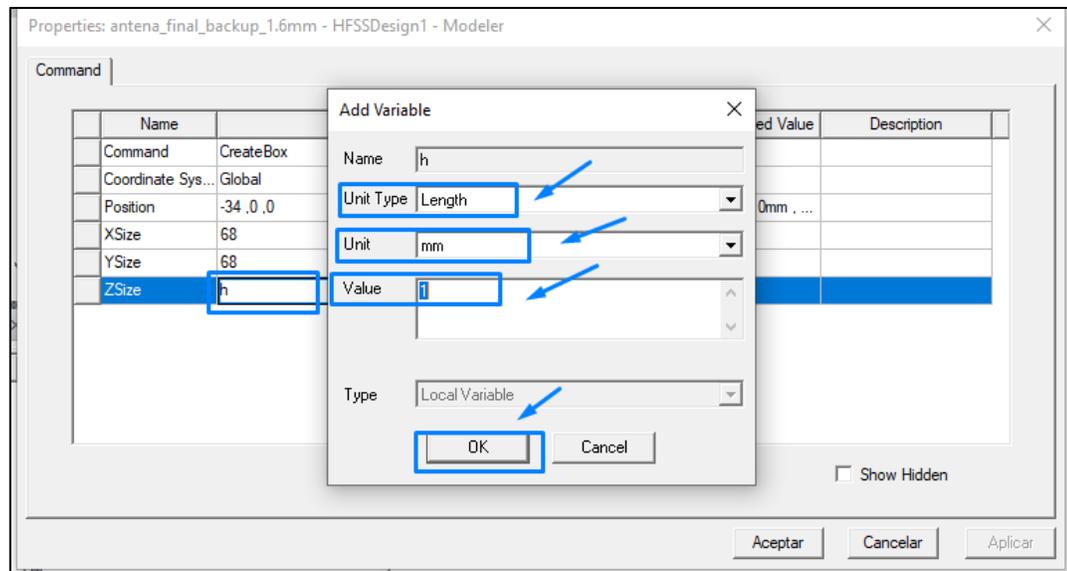


Figura 63. Asignación Variable

Se continúa estableciendo la configuración de la herramienta PARAMETRICS, la cual se encuentra dentro de las opciones de OPTIMETRICS, haciendo > clic derecho y ejecutando la orden, de la manera que se muestra en la siguiente Figura 64.:

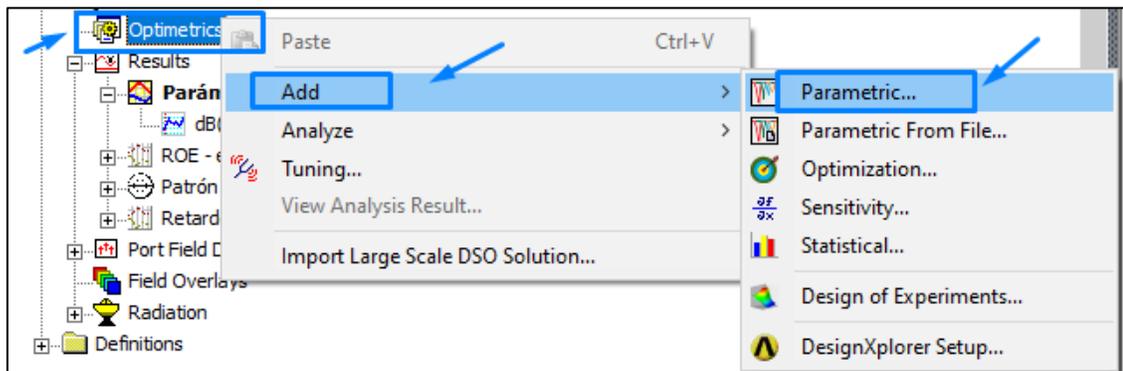


Figura 64. Añadir parametric

Se configura la herramienta PARAMETRICS, la cual permite mostrar varios análisis en un solo gráfico, en este caso estos resultados serán visualizados para los resultados de los parámetros S. EL proceso de configuración para la herramienta parametrics es la siguiente: Paso a: >clic en Add (esta opción habilita la función parametrics, generando una orden de configuración), paso b: >seleccionar la variable que se creó en el Paso 3 (variable = h), paso c: >clic en la opción linear step (esta opción permite realizar un análisis de rango, configurando un valor inicial de la variable y un valor final), paso d: > se coloca en Start el valor inicial (para el caso de análisis se iniciara en 1) y de igual manera se configura el Stop (que será en el valor 2) y se establece el número de pasos Step (este valor significa el salto que va a tomar para llegar desde 1mm a 2 mm), como se indica en la Figura 65.

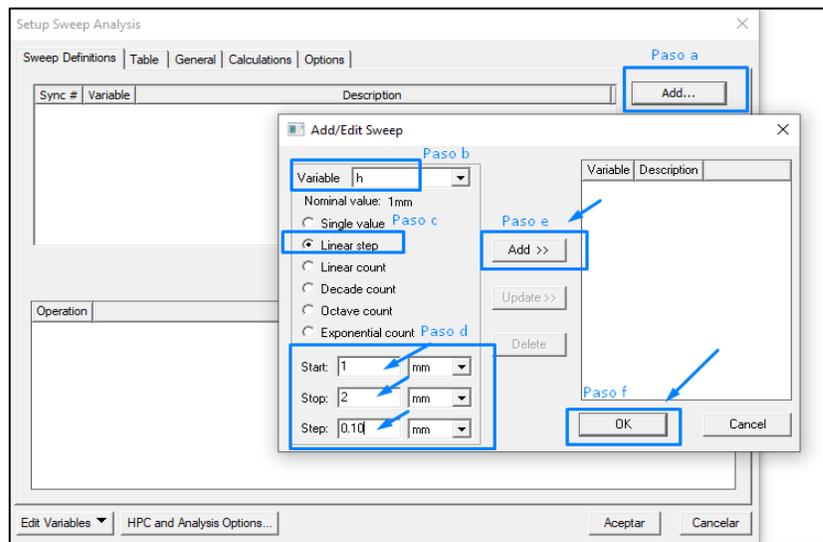


Figura 65. Configurar parametrics

Por último, se debe realizar la validación, para evitar errores en la obtención de los resultados. Esta verificación se debe realizar siempre antes de iniciar con el proceso de simulación, como se muestra en la Figura 66., el propio software internamente realiza un proceso de validación por etapas, pasando por: las configuraciones de diseño (Design Settings), se evalúa el modelo 3D (3D Model), que no presente intersecciones en las estructuras de la antena, además se verifica que este configurado los límites electromagnéticos y las excitaciones (Boundaries y

Excitations), en esta configuración se asigna propiedades de radiación a los directores y al reflector; y se configura propiedades de alimentación al puerto (Port1), respecto al Análisis de configuración (Analysis Setup), se establece la frecuencia central de análisis (3.5 GHz), el rango de análisis de 1 GHz a 7 GHz y el tipo de análisis (Fast - Rápido o Interpolating - Complejo), a este se evaluó la configuración Optimetrics (la cual ya se revisó en el Paso 5 y por último se verifica la caja de radiación (Radiation), se debe tomar en cuenta que la caja de radiación debe cubrir toda el área de la antena parche tipo yagi – uda.

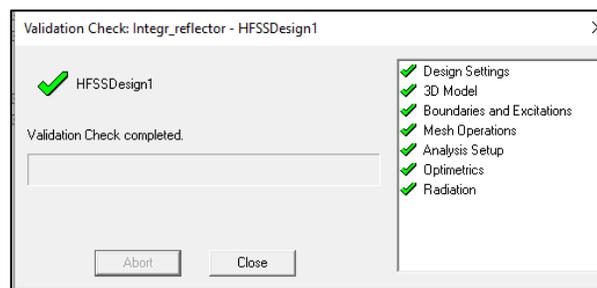


Figura 66. Validación etapa final

3.7.6. Resultados

Se muestra el resultado de las alturas del sustrato en las medidas comerciales, las cuales tienen su presentación desde 1 mm hasta 1.8 mm, con una diferencia de 0.2 mm, para tener una mayor apreciación y realizar una conclusión referente a los resultados se realiza un enfoque en los picos de las curvas de reflexión, el cual se encuentra en la Figura 67.

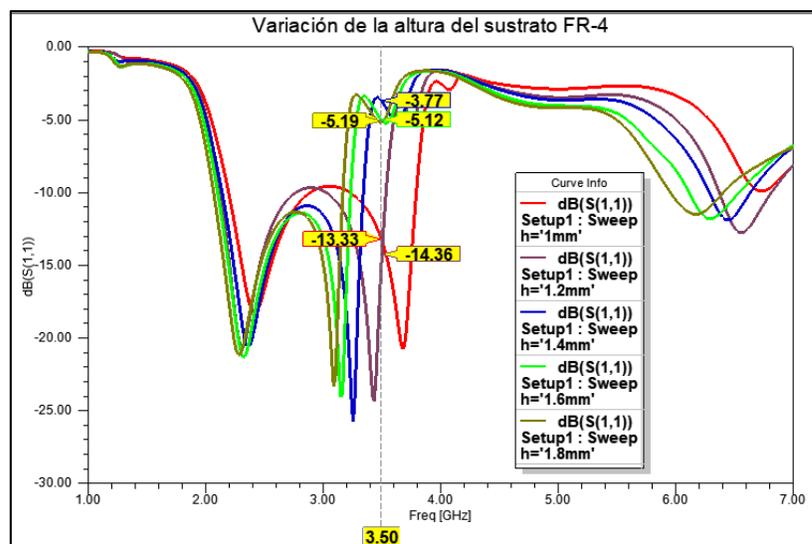


Figura 67. Variación de la altura del sustrato FR-4.

En ese sentido, realizando un enfoque en las curvas de reflexión de las distintas alturas, además como resultado de este análisis se menciona que la altura esta relaciona con el coeficiente de reflexión, en este caso se aprecia que utilizando el valor de $h=1\text{mm}$ se logra un coeficiente de reflexión de -9.60 dB (línea roja), con $h_2=1.2\text{ mm}$ se obtiene un valor de -9.71 dB (línea morada), con $h_3=1.4\text{ mm}$ se logra un resultado de 10.94 dB (línea azul), con $h_4=1.6\text{ mm}$ se alcanza -11.44 dB (línea verde) y con $h_5=1.8\text{ mm}$ se tiene de resultado -11.37 dB (línea café), es por ello que la antena se fabrica con el sustrato FR-4 de altura 1.6 mm , con el cual se obtiene el mejor resultado, el cuál presenta el valor menor de coeficiente de reflexión correspondiente a -11.44 dB , como indica la Figura 68.:

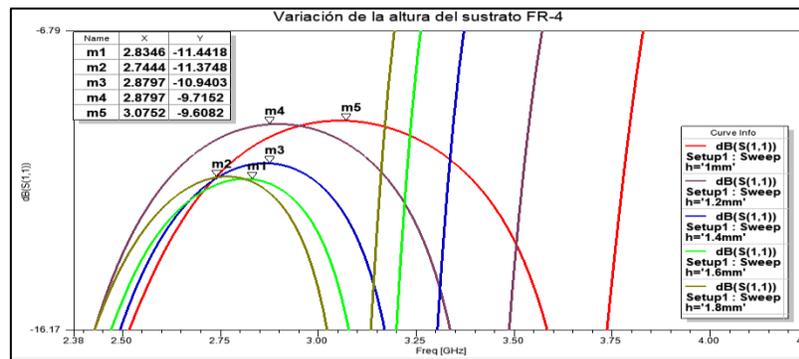


Figura 68. Coeficiente de reflexión de las diferentes alturas de sustrato

3.8. Dimensiones de la antena parche tipo Yagi-Uda – etapa final

Mediante un software de diseño estructural de gráficas 2D, se plasma el diseño final de antena yagi, el cual se especifica cada variable de la antena, incluyendo el proceso de asignación variables, las cuales serán plasmadas con sus valores en la Figura 69. que se presenta a continuación:

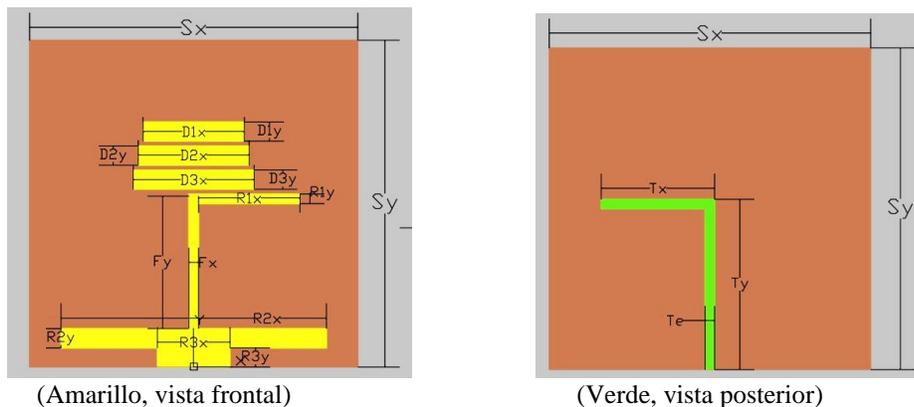


Figura 69. Dimensiones finales de la antena parche tipo yagi-uda

En la Tabla 16. se menciona cada dimensión que pertenece a la antena y sus respectivos componentes como: parche, línea de alimentación, sustrato y plano de tierra.

Tabla 16. Dimensiones de la antena final tipo yagi uda

Nombre	Variable	Dimensión
Ancho del sustrato	S_x	68 mm
Longitud del sustrato	S_y	68 mm
Ancho del plano de tierra	T_x	22 mm
Largo del plano de tierra	T_y	36 mm
Espesor del plano de tierra	T_e	2 mm
Ancho del primer director	$D1_x$	21 mm
Largo del primer director	$D1_y$	4 mm
Ancho del segundo director	$D2_x$	23 mm
Largo del segundo director	$D2_y$	4mm
Ancho del tercer director	$D3_x$	25 mm
Largo del tercer director	$D3_y$	4 mm
Ancho del primer reflector	$R1_x$	21 mm
Largo del primer reflector	$R1_y$	2 mm
Ancho del segundo reflector	$R2_x$	55 mm
Largo del segundo reflector	$R2_y$	4 mm
Ancho del tercer reflector	$R3_x$	15 mm
Largo del tercer reflector	$R3_y$	4 mm
Ancho línea de alimentación	F_x	2 mm
Largo línea de alimentación	F_y	28 mm
Altura del sustrato FR-4	h	1.6 mm

3.9. Resultados de la antena yagi-uda – etapa final

A continuación, se muestran los parámetros de la antena, cuyos resultados se presentan en sus gráficas respectivas posteriores a la obtención de los resultados por medio del software de campos electromagnéticos.

3.9.1. Parámetros S (Coeficiente de reflexión y Ancho de banda)

El proceso de obtención de la gráfica de los resultados de los parámetros S, tanto el ancho de banda operativo de la antena y el coeficiente de reflexión. Se procede a describir en los siguientes pasos para lograr la obtención de la gráfica de resultados de parámetros S.

Como primer paso para la obtención de la gráfica de los parámetros S11, se realiza Clic derecho en >Results (lado izquierdo de las opciones Project Manager, dentro del proyecto HFSSDesign1 (Driven Modal) como se muestra en la Figura 70., luego en el paso 2 >clic en Create Modal Solution Data Report y en el paso 3, Clic en >Rectangular Plot.

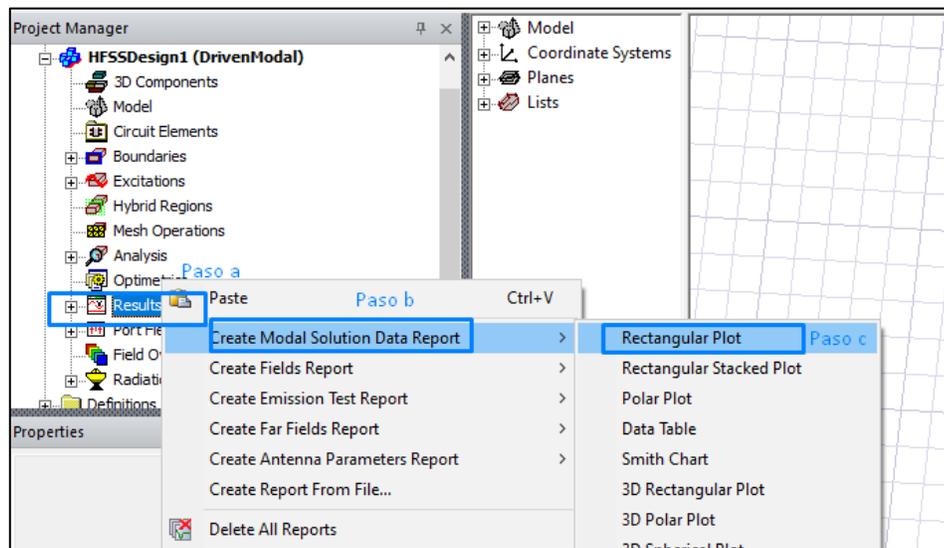


Figura 70. Selección Rectangular Plot

Como siguiente paso se abre una ventana (New Report), el cual permite configurar el tipo de categoría del gráfico y la función, para el caso de los parámetros S como se aprecia en la Figura 71.; en el paso A se selecciona la categoría (Category), correspondiente a S Parameter, en el paso B se escoge la función (Function) >Clic en dB para seleccionar y posterior el paso C > Click en New Report, en donde se genera el resultado de los parámetros S.

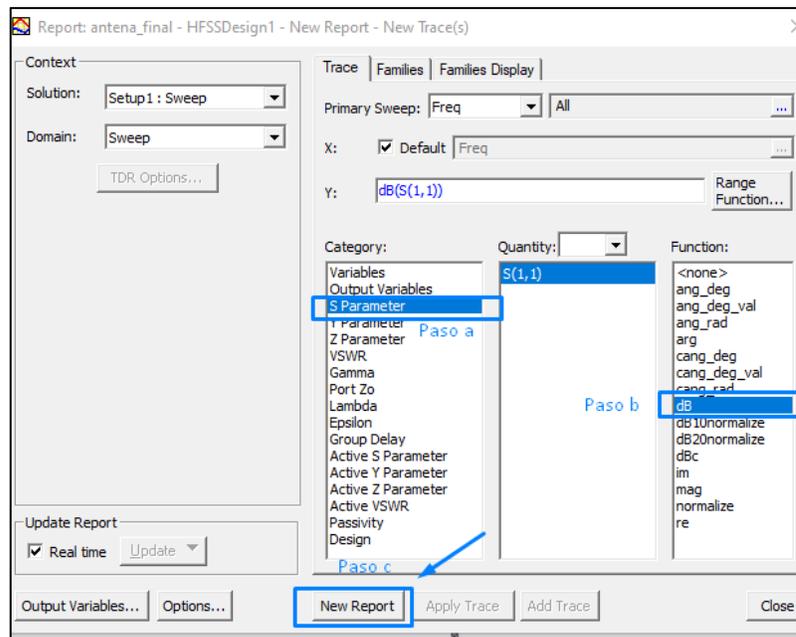


Figura 71. Reporte de la antena

Para tener una mayor visualización de resultados, se genera unos marcadores como se aprecia en la Figura 72., los cuales ayudan a guiarse dentro de la gráfica al indicar de manera visual resultados específicos en las intersecciones y de esta manera tener un enfoque más claro dentro del análisis de resultados.

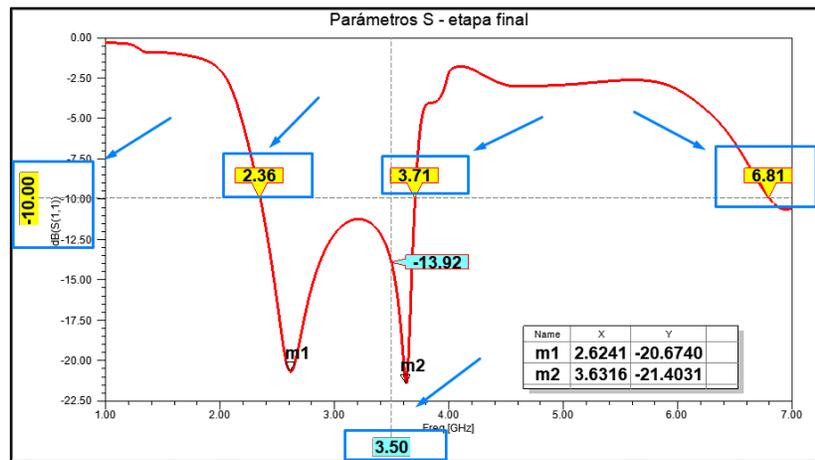


Figura 72. Asignación de marcadores

En la Figura 73. se muestra el proceso de añadir el marcador, para ello se realiza > clic derecho en la gráfica >marker y >add marker . Este marcador es ajustable y puede agregarse tanto en el eje X como en el Eje Y.

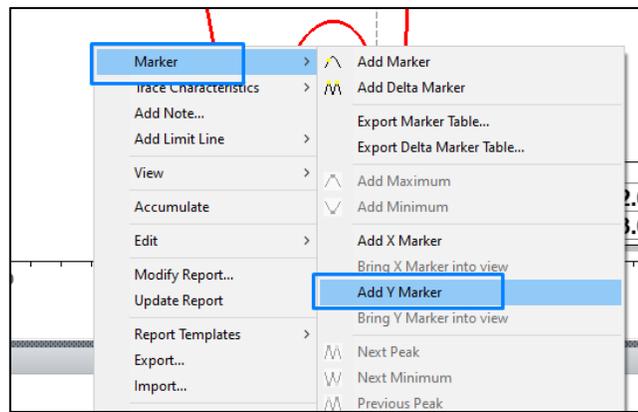


Figura 73. Generar marcadores

3.9.1.1. Resultados parámetros S

Como primer parámetro a analizar se tiene la gráfica de los parámetros S, donde se muestra en la Figura 74. que la frecuencia de operación 3.5 GHz presenta coeficiente de reflexión de -13.92 dB, superando el límite de la banda de paso de los -10 dB, lo cual nos indica que existe un porcentaje inferior al 10% de ondas que se reflejarán a la fuente. Otro aspecto que mencionar es el valor del ancho de banda que parte de la frecuencia menor 2.36 GHz a la frecuencia mayor 3.71 GHz con un valor de ancho de banda correspondiente a 1.35 GHz (valor que es calculado con la Ecuación AB), donde la frecuencia de trabajo 3.5 GHz está cubierta por el espectro de frecuencia del AB.

$$AB = F_{mayor} - F_{menor}$$

$$AB = 3.71 \text{ GHz} - 2.36 \text{ GHz}$$

$$AB = 1.35 \text{ GHz}$$

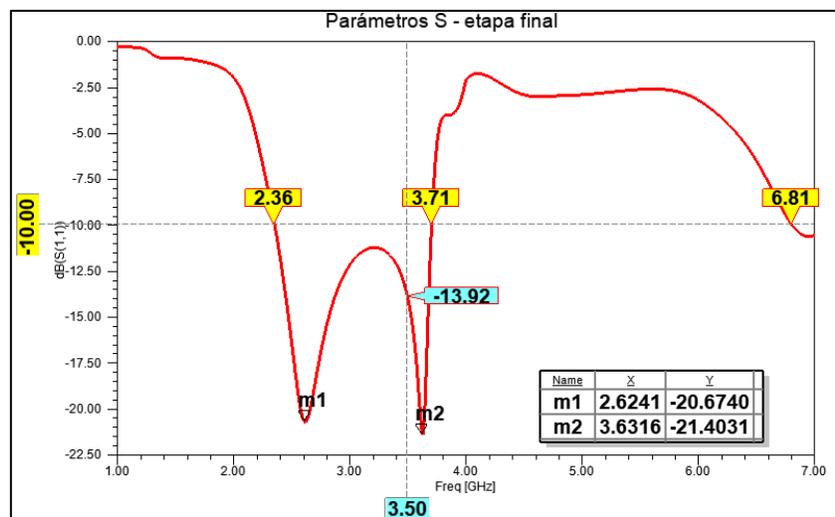


Figura 74. Parámetros S – antena parche tipo yagi-uda

3.9.2. Relación de Onda Estacionaria (ROE)

Se muestra el proceso de obtención de la gráfica de los resultados de la Relación de Onda Estacionaria (ROE), donde se puede observar la curva de reflexión debajo del límite de los 2 dB, los pasos a seguir son los siguientes:

En la Figura 75. se muestra el proceso para generar el reporte de resultados del ROE, se hace Clic derecho en >Results >Create Modal Solution Data Report y luego se selecciona >Rectangular Plot.

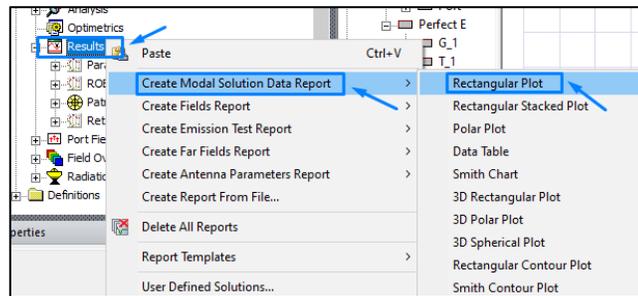


Figura 75. Rectangular Plot – Parámetros S

Seguido a ello se abre una ventana del reporte como se aprecia en la Figura 76., en la sección de >Category se selecciona >VSWR, correspondiente a Voltage Standing Wave Ratio (VSWR o ROE), en >Quantify se selecciona VSWR (1), el valor 1 corresponde al puerto de alimentación, si en caso se tiene 2 puerto nos indicará otro valor, pero con VSWR (2).

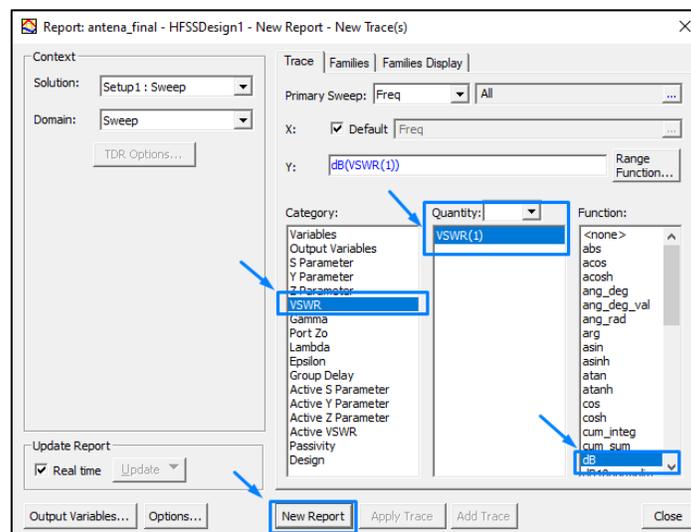


Figura 76. Generar Rectangular Plot

3.9.2.1. Resultados relación onda estacionaria (ROE)

En la Figura 77. se presenta el resultado del ROE, cuyo valor es de 1.5, el cual se encuentra por debajo del límite permitido para aplicaciones inalámbricas que corresponde a 2 dB, además se aprecia que en el rango desde 2.34 GHz hasta 3.71 GHz se mantiene debajo del valor permitido, de esta manera el diseño de la antena cumple con la frecuencia de 3.5 GHz en este rango del análisis del ROE.

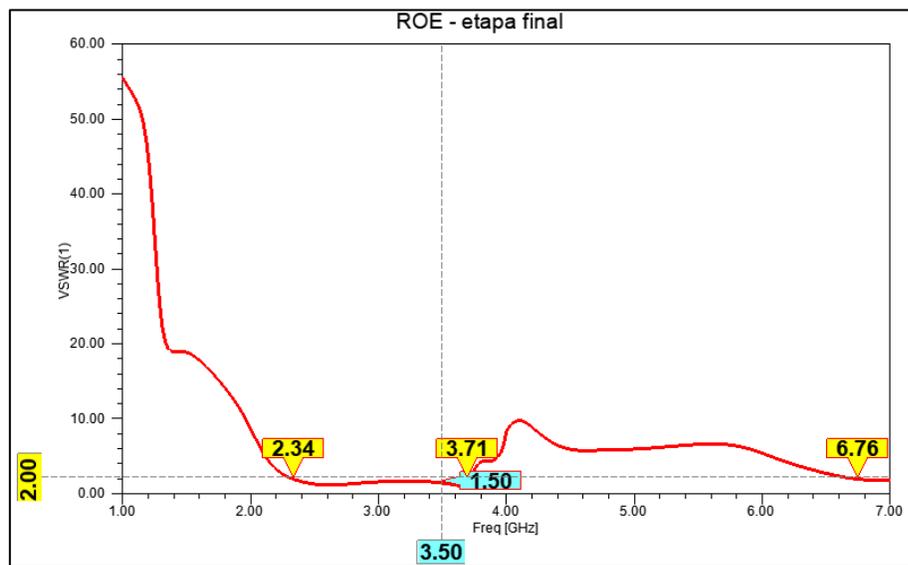


Figura 77. Resultado ROE – antena parcheo tipo yagi-uda

3.9.3. Retardo de Grupo (GD)

Se detalla el proceso de obtención de la gráfica para los resultados del Retardo de Grupo (GD), el cual indica la curva de reflexión que debe estar por debajo del límite del 1 [ns].

En la Figura 78. se muestra el proceso para obtener los resultados del Group Delay o retardo de Grupo, para ello realizamos los siguientes pasos, clic derecho en Results seguido a Create Modal Solution Data Report y por último se selecciona Rectangular Plot.

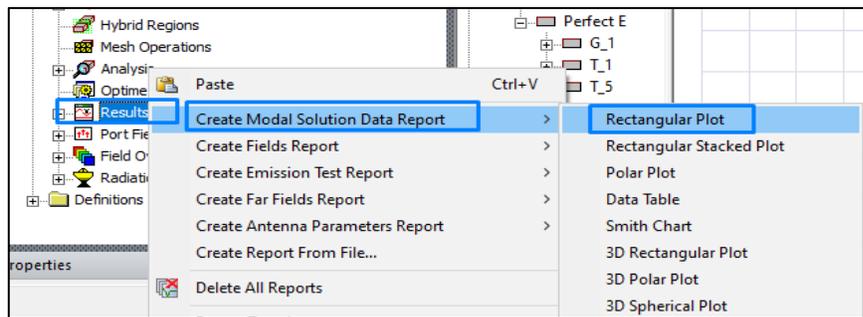


Figura 78. Rectangular Plot del Retardo de Grupo

Posterior al paso anterior encontraremos una ventana, en la cual se indica varios parámetros y se debe buscar el que tenga el nombre de *Category* seguido a *Group Delay*, así mismo se selecciona el puerto en el cual se está realizando el reporte, en este caso *GroupDelay (1, 1)* y por último se escoge la unidad de función de salida que será *dB*, como se indica en la Figura 79.

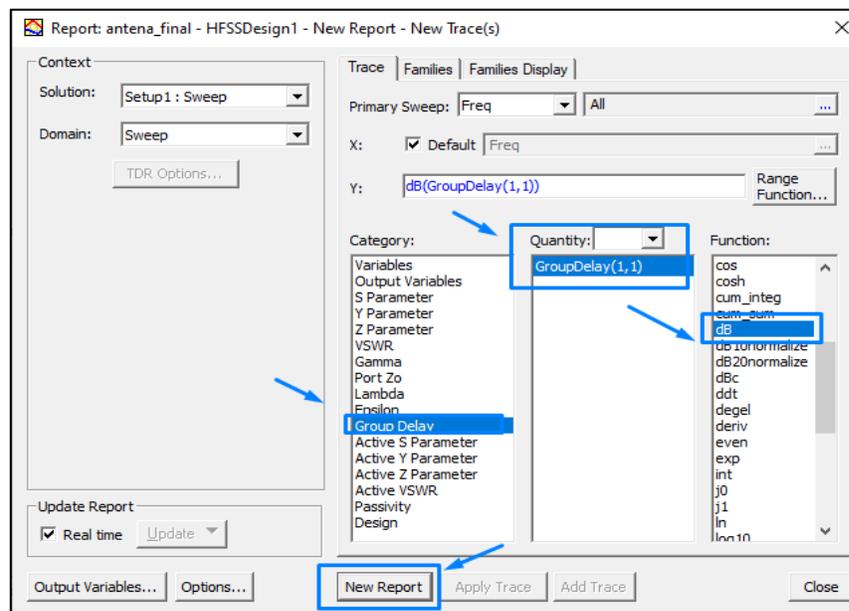


Figura 79. Generar Rectangular Plot del Retardo de Grupo

3.9.3.1. Resultados retardo de grupo (GD)

El retardo de grupo es necesario analizar para determinar si la antena presenta distorsión al momento de enviar la señal electromagnética. Según (Haoyu, SongZhenfei, & WangHongmin, 2017) menciona que: el análisis de este parámetro permite minimizar el error debido a reflexiones múltiples entre antenas en la medición de Group Delay (GD) convencionales, cuyo valor debe ser inferior a 1 [ns].

Para la presente investigación de la antena yagi uda se muestra en la Figura 80., el análisis del retardo de grupo, donde se aprecia la antena mantiene un valor inferior a 1 [ns] a lo largo del espectro que inicia en la frecuencia 1 GHz hasta 3.70 GHz (marcador celeste), en esta última frecuencia se aprecia que supera el 1[ns], lo que demuestra que a partir de la frecuencia de resonancia 3.70 GHz la antena presenta reflexiones múltiples y posibles distorsiones, sin embargo, la frecuencia de operación de la antena es de 3.5 GHz y en esta frecuencia se tiene un GD de 0.37 [ns] (marcador amarillo), valor que cumple con la regla del 1[ns].

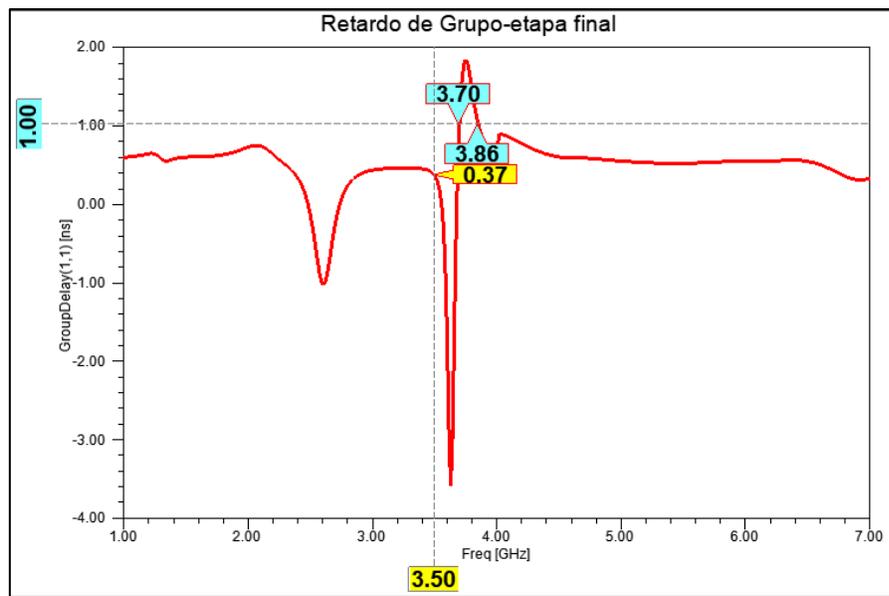


Figura 80. Resultado - Retardo de grupo

3.9.4. Patrón de Radiación

El proceso de obtención para la gráfica de los resultados del Patrón de Radiación es detallado en los siguientes pasos, permitiendo obtener la gráfica que nos indica la distribución de energía en las distintas direcciones del espacio.

Para generar la gráfica del resultado de Patrón de Radiación, se realiza clic en Result seguido a Create Far Fields Report y luego en Radiation Pattern, como se aprecia en la Figura 81.

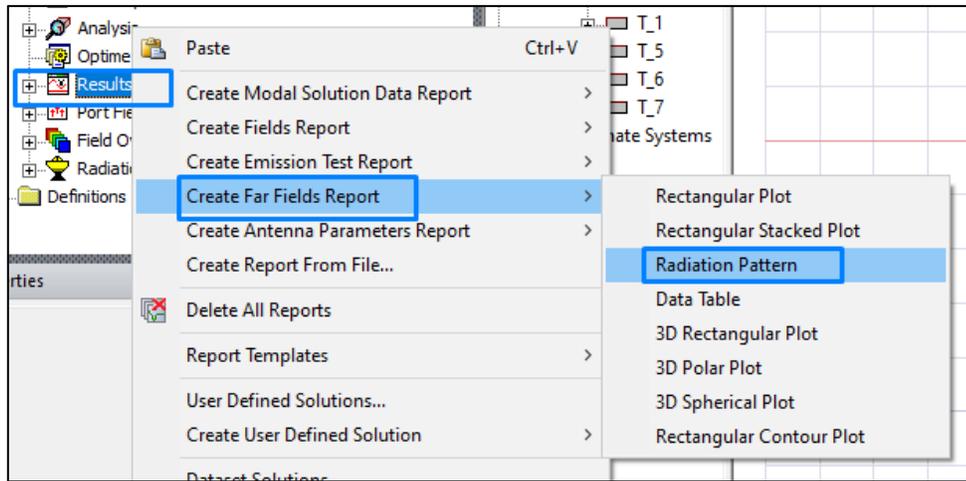


Figura 81. Radiation Pattern

Seguido al paso descrito, se abrirá una ventana, en donde se configurará *Category*, en esta parte se selecciona *rE*, adicional en *Quantify* se escoge *rETOTAL* y por último en *Function* seleccionamos la unidad *dB*, para finalmente hacer clic en *New Report*, como se muestra en la Figura 82, esto generará la gráfica del patrón de radiación con los lóbulos de radiación respectivos.

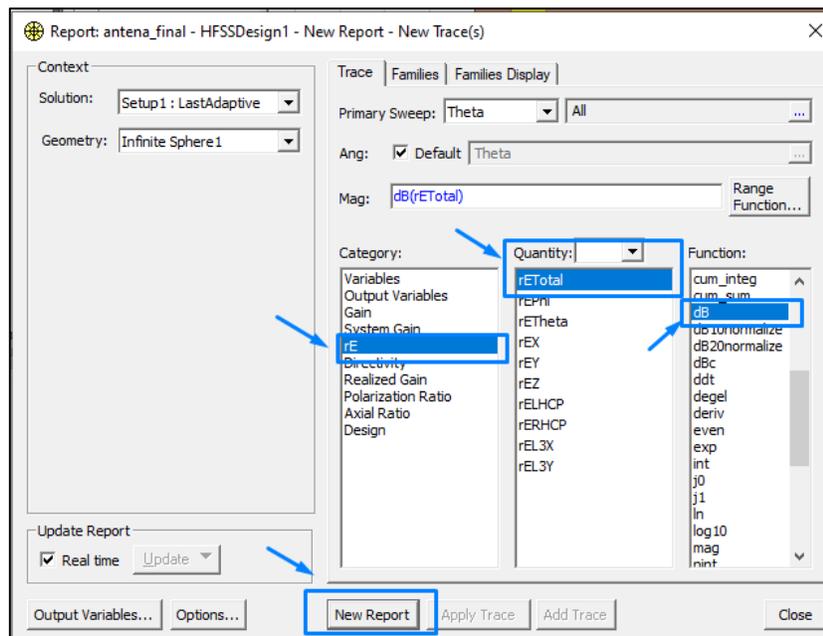


Figura 82. Generar el Radiation Pattern.

3.9.4.1. Resultados patrón de radiación

El patrón o diagrama de radiación permite demostrar la concentración y direccionalidad que toman las radiaciones electromagnéticas que proviene de la antena, así como observar la concentración de la potencia radiada a determinadas direcciones y a raíz de ello concluir que tipo de patrón presenta, sea omnidireccional o directivo. En ese sentido, en la Figura 83. se muestra el resultado del análisis de la antena parche tipo yagi uda con respecto al diagrama de radiación, en el cual se observa que presenta una mayor concentración de potencia en el lóbulo principal (superior) teniendo su direccionalidad en $\text{PHI} = 0^\circ$ y una menor concentración de potencia en el lóbulo secundario (inferior) con dirección en $\text{PHI} = 180^\circ$, a raíz de este esquema se concluye que la antena presenta un típico patrón de radiación directivo, ideal para comunicaciones inalámbricas muy utilizadas en sistema vehiculares con tecnología 5G.

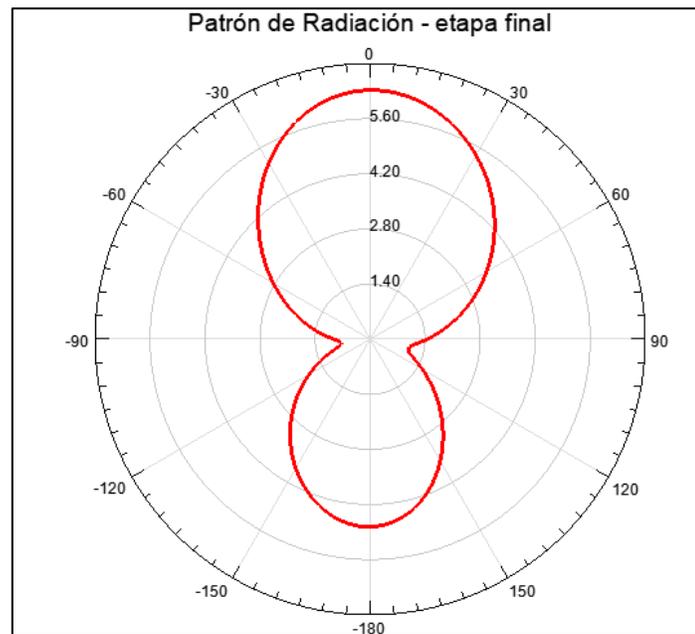


Figura 83. Patrón de Radiación – antena parche tipo yagi-uda

3.9.5. Densidad de corrientes superficiales en Magnitud

Se procede a detallar el proceso de obtención de la gráfica de los resultados de la Densidad de corrientes superficiales o Retardo de Grupo (GD), donde se puede observar la intensidad de energía que se concentra en diferentes partes de la antena. Se determinan los siguientes pasos:

En la Figura 84. se muestra el proceso para obtener el resultado del comportamiento que tienen las corrientes en el parche de la antena. Se debe seleccionar los directores, los reflectores y la línea de alimentación; para saber si la estructura está siendo seleccionada, se notará que cada estructura cambia de color a un tono violeta.

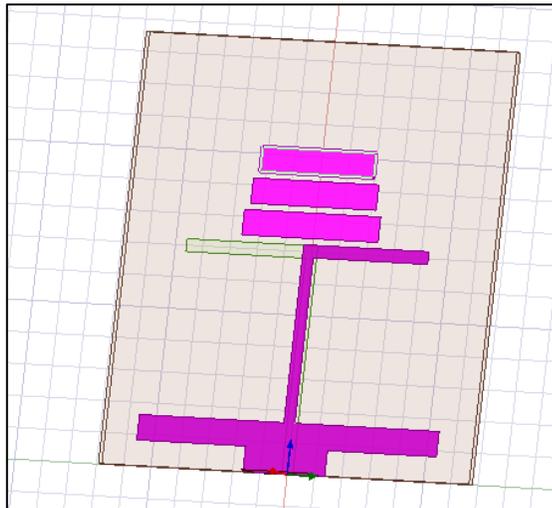


Figura 84. Selección de la estructura de la antena yagi

Una vez seleccionada la estructura, se procede a generar la gráfica de corrientes, para ello se sigue el proceso que se muestra en la Figura 85.; como primer paso (a) se hace clic derecho en *Field Overlays*, a continuación (paso b) se escoge *Plot Fields*, para seleccionar *E*, y finalmente con la selección de *Mag_E*; en este caso la evaluación es en el campo eléctrico referente a la magnitud de los campos eléctricos.

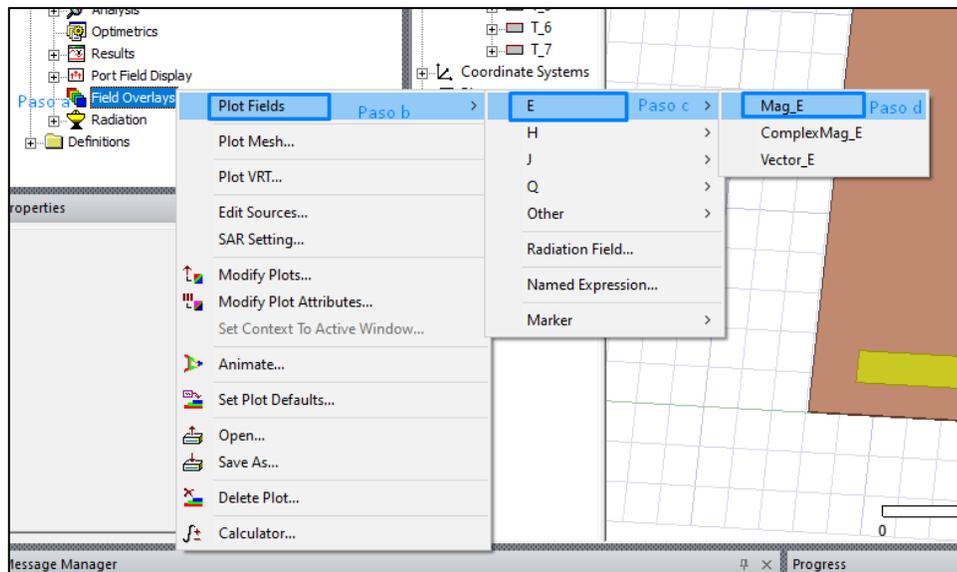


Figura 85. Generar Plot Mag_E

En la Figura 86. se muestra los parámetros adicionales para crear el Field Plot, como son las variables intrínsecas de frecuencia (Freq) y fase (Phase), en este caso se debe configurar la frecuencia a 3.5 GHz y la fase en 0 deg (grados); en Quantify (paso g) se selecciona Mag_E y en IN Volume (paso h), se escoge ALL Objects, es decir un análisis de todos los objetos que conforman la antena (puerto de alimentación, línea de transmisión, directores y reflectores). Finalmente se hace clic en Done.

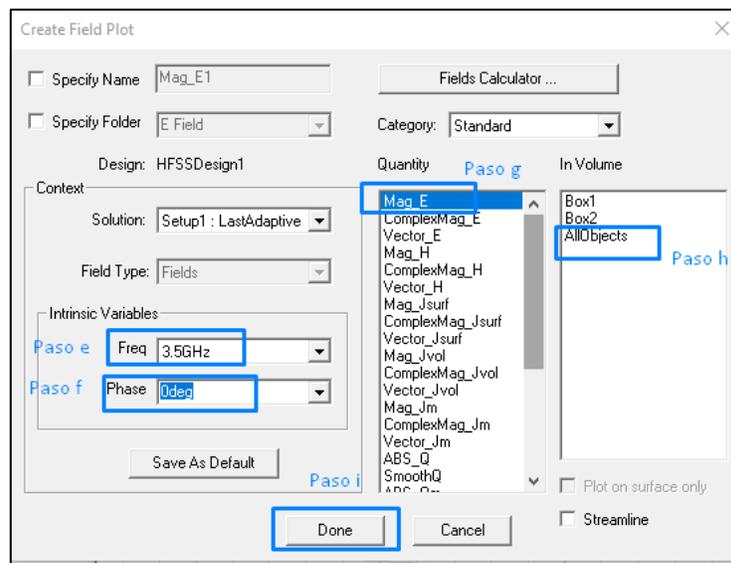


Figura 86. Generar Plot Mag_E

3.9.5.1. Resultados de la densidad de corrientes superficiales (magnitud)

En la Figura 87. se muestra el resultado de la Densidad de Corrientes Superficiales respecto a la Magnitud, esta simulación tiene por objetivo demostrar la cantidad de radiación que se concentra a diferentes puntos de la antena, donde se aprecia que en el director 2 y director 3 presenta mayor concentración de energía (respecto a la intensidad de radiación presente en la antena se tiene que, la tonalidad Azul, presenta un nivel bajo de concentración de radiación, verde y amarillo una concentración media, mientras que naranja y roja una presencia de radiación alta).

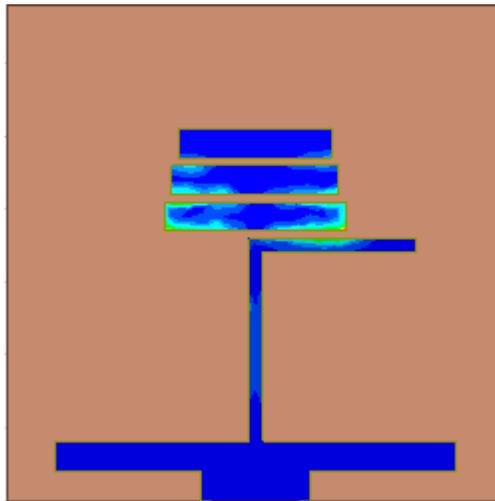


Figura 87. Densidad de corrientes superficial - Magnitud

3.9.6. Densidad de corrientes superficial respecto al Vector

El proceso de obtención de la gráfica de los resultados de la Densidad de corrientes superficial, donde se muestra cómo se distribuye las corrientes y la dirección que toman a lo largo de la antena, se detalla a continuación:

En la Figura 89. se selecciona la estructura que conforman la antena; como: los directores, los reflectores y la línea de alimentación; al seleccionar cada parte de la antena, cada estructura cambia de color a un tono violeta.

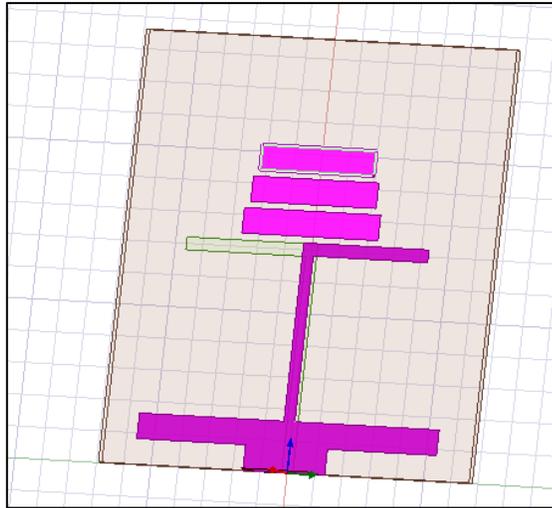


Figura 88. Selección de la estructura de la antena Yagi

Una vez seleccionada la estructura respectiva, se procede a generar la gráfica de corrientes, para ello se sigue el proceso mostrado en la Figura 90.. Dar clic derecho en Field Overlays, luego escoger Plot Fields donde se selecciona E y por último Vector_E, en este caso la gráfica visualmente mostrará los cambios de dirección que sufren las corrientes al circular por la antena.

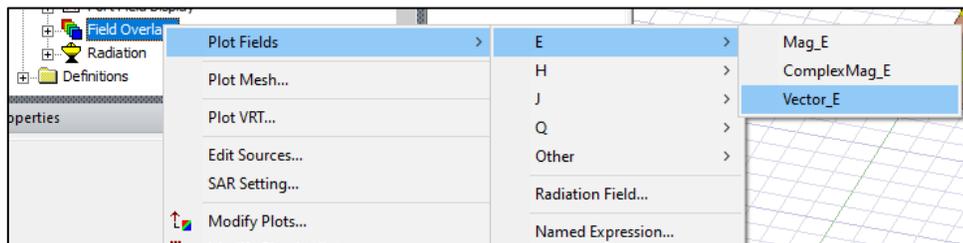


Figura 89. Configurar Vector_E

Al escoger Vector_E, en el paso anterior, se despliega la ventana de configuración que se muestra en la Figura 90., donde se escoge de igual manera las variables intrínsecas de Frecuencia (Freq) a 3.5 GHz y Fase (Phase) a) deg; en Quantify se escoge Vector_E y en In Volume, se determina ALL Objects, es decir un análisis de todos los objetos que conforman la antena parcheo tipo Yagi-Uda.

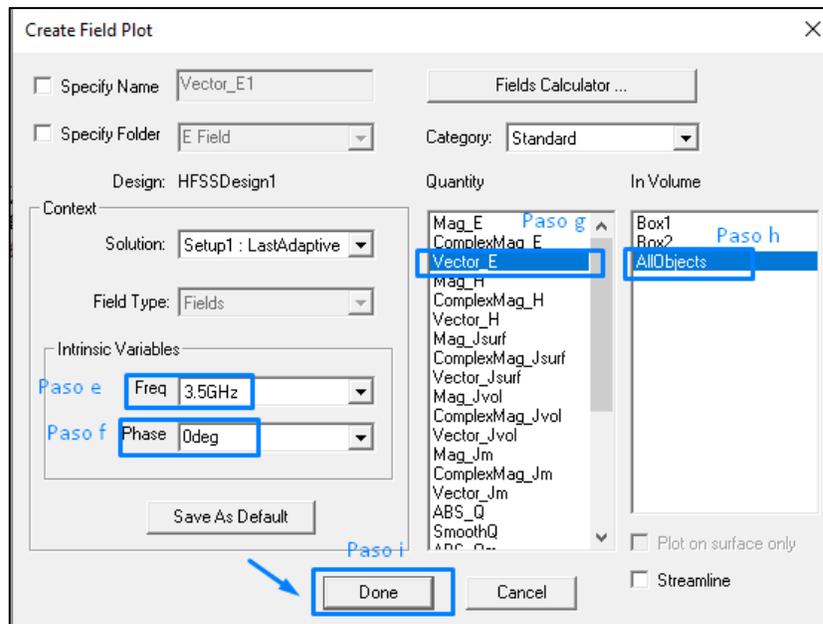


Figura 90. Crear Field Plot – Vector_E

3.9.6.1. Resultados de la densidad de corrientes superficiales (vector)

Se muestra el comportamiento de las corrientes cuando a la antena se le aplica energía, las corrientes siempre viajan desde el plano de tierra hacia el parche formando el campo electromagnético. Según (Jefferies, 2004): la corriente que viaja en el elemento (parche) que es alimentado mediante la línea de transmisión irradia un campo electromagnético (\vec{H} y \vec{E} , es así que, las corrientes son generadas debido a la interacción entre todos los elementos que conforman la antena como los directores, reflectores, línea de transmisión y plano de tierra, como se indica en la Figura 91.

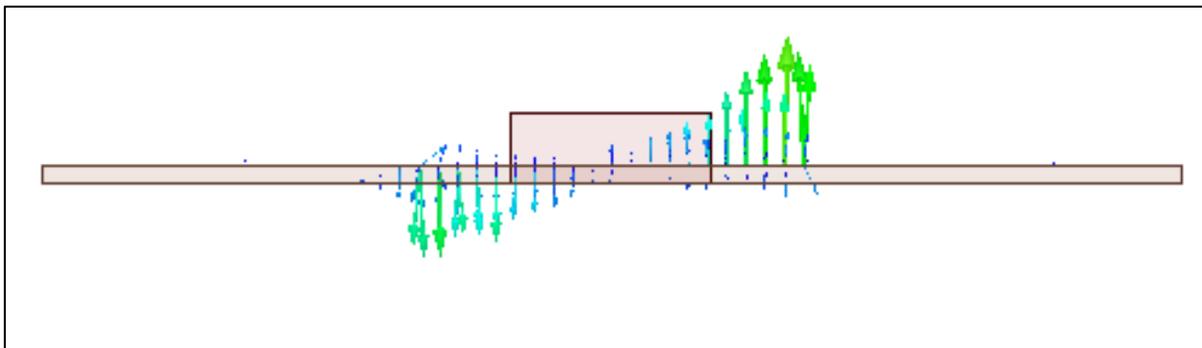


Figura 91. Densidad de corrientes superficial – Vector (VISTA PERFIL)

Además, la fase de la corriente en circulación en los directores depende de las distancias entre estos elementos que conforman la antena, tanto de la longitud como el ancho; con respecto a la amplitud también depende de estas dimensiones y de la misma magnitud que presenta la corriente de los directores que son alimentados por el puerto, como muestra la Figura 92.:

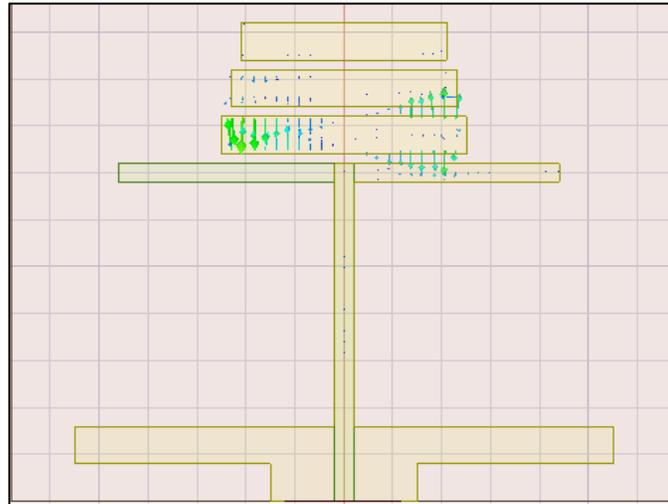


Figura 92. Densidad de corrientes superficial – Vector (VISTA FRONTAL)

CAPÍTULO IV:

FABRICACIÓN DE LA ANTENA PARCHE TIPO YAGI-UDA

Se presenta el procedimiento realizado en la fabricación de la antena parche tipo yagi-uda, en donde se da cumplimiento a una construcción que implique un bajo costo y cuyo desarrollo sea dentro del país. Se procede a su fabricación teniendo como base el capítulo 3, de donde se tomará las medidas y el diseño final que cumple con las especificaciones correctas para el modelo de antena; además el apartado de stakeholders que previo un estudio, se logró determinar el sustrato a utilizar que es el Epoxy Glass FR-4.

Es importante denotar que dentro de la fabricación de antenas se debe tener claro el enfoque aplicativo para el cuál va a ser fabricada, logrando que su adaptación a los equipos o dispositivos finales sea de manera sencilla y logre acoplarse a los mismos, por ende para el presente proyecto teniendo como aplicabilidad el internet de las cosas con tecnología 5G, se fabrica una antena simple y compacta con factibilidad de ser añadida a dispositivos de diferentes tamaños, los cuales puedan desempeñar su funcionalidad con total normalidad.

Con previas aclaraciones de diseño, se presenta el desarrollo del capítulo 4, con la finalidad de entregar el prototipo final de la antena con base a todo el estudio y cálculos realizados.

4.1. Exportar diseño de antena al software de diseño estructural

Una vez que el diseño final cumple con todos los objetivos que se requiere para ser utilizada en ambientes para aplicaciones con tecnología 5G, se procede con la fase de fabricación. En ese sentido se explica el proceso de exportación del diseño final de la antena:

En la Figura 93. se muestra el proceso de exportación, primeramente, se dirige a la opción de Modeler en donde seleccionaremos Export, cuya opción permite exportar la estructura de la antena en diferentes formatos compatibles a diferentes softwares de diseño estructural.

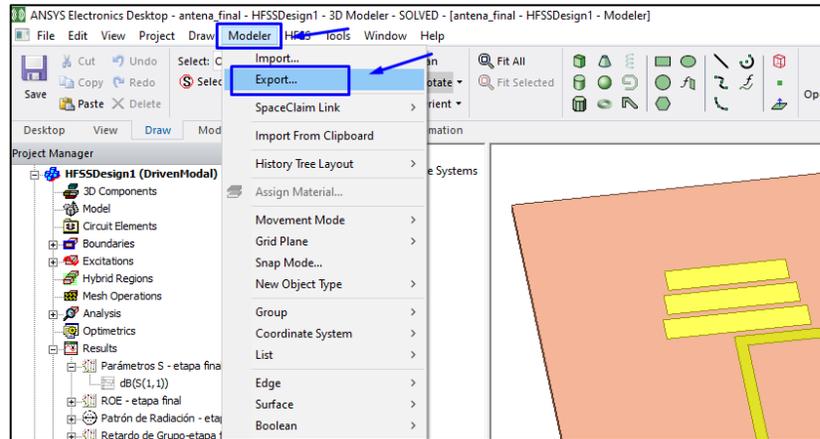


Figura 93. Exportar estructura

Posterior al anterior paso, se muestra una ventana como se indica en la Figura 94., donde se da un nombre y se selecciona el tipo de archivo en Tipo aquí se escoge el formato de exportación de la estructura, en este caso el software que se está manejando para el presente proyecto es compatible con el formato .dxf, en ese sentido, seleccionamos el formato mencionado y procedemos a aceptar los cambios.

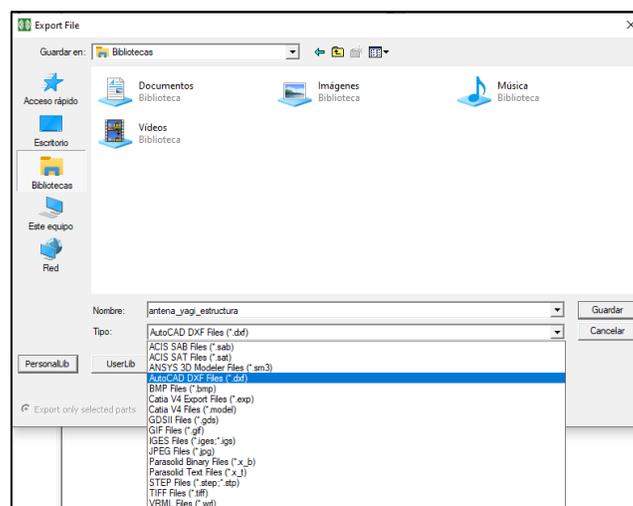


Figura 94. Formato .DXF

4.2. Creación de la plantilla de la antena Parche tipo Yagi-Uda

Una vez realizado el proceso de exportación, se obtiene el archivo en formato .DXF, como se muestra en la Figura 95. Se procede a mostrar el proceso a seguir, para la obtención de la plantilla de impresión que ayudará en la fabricación de la antena.

En el ordenador se busca el archivo exportado con el nombre que se le haya asignado, para el presente desarrollo a sido creado con el nombre de: *antena_yagi_estructura*, una vez que se tenga el archivo, se procede a ejecutarlo con un software de diseño de estructuras.



Figura 95. Archivo DXF de la antena

Una vez abierto se procede a separar el parche de la antena del plano de tierra, debido a que ambos elementos se encuentran unidos en el mismo sustrato, este proceso se debe realizar manualmente, colocando cada elemento de la antena en el lugar correcto, tal cual se encuentra en el software de simulador de ondas electromagnéticas. Como se muestra en la Figura 96., ambas caras de la antena están unidas, en el siguiente paso se explica la separación.

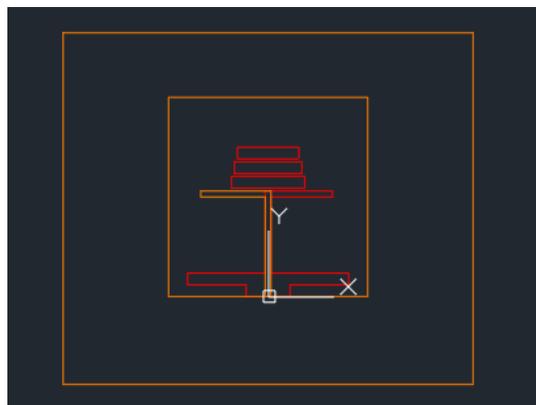


Figura 96. Estructura de la antena

La separación se realiza colocando en la parte izquierda cada elemento correspondiente a la cara frontal de la antena, la cual consta de los tres directores, los dos reflectores y la línea de transmisión, una vez que se haya distinguido estos componentes se los selecciona y se procede a arrastrarlos a la parte izquierda; para la cara posterior se realiza el mismo procedimiento, únicamente teniendo en cuenta que el componente que se tendrá es el plano de tierra, como se aprecia en la Figura 97.

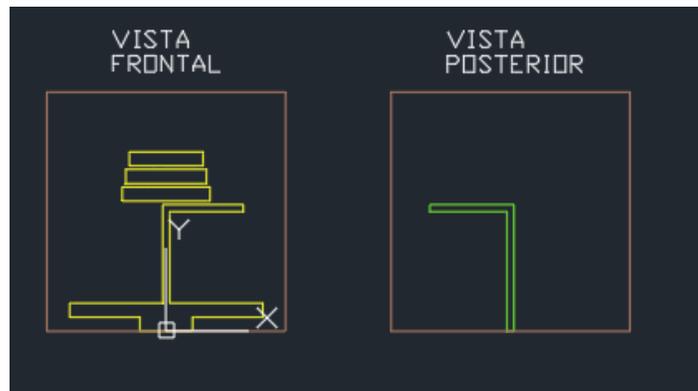


Figura 97. Vista frontal y posterior

4.3. Impresión de la plantilla – Formato A4

Una vez realizada la separación de los elementos de la antena es necesario darle color negro a cada elemento, como se muestra en la Figura 98., para ello marcamos las estructuras de la antena y procedemos a seleccionar en la opción de color el negro, esto debido a que, al momento de la impresión por láser, toda la estructura de la antena se transferirá al sustrato FR-4 y se necesita que se mantenga lo suficientemente marcado el diseño de la antena.

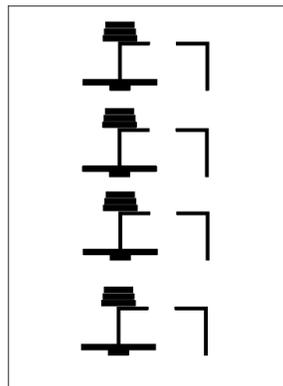


Figura 98. Planilla

4.4. Proceso de transferencia al sustrato FR-4

Una vez impresa la plantilla, el siguiente paso es transferir la estructura de la antena al sustrato FR-4, aplicando temperatura a la plantilla y presionando el papel para que se transfiera cada parte de la antena hacia la placa. Es importante tener en cuenta que la impresión debe ser mediante una impresora láser, debido a que estas impresoras impregnan pigmentos de tinta, que al aplicar calor en el papel estos se adhieren al sustrato, como se aprecia en la Figura 99.



Figura 99. Transferir plantilla al Sustrato

4.5. Proceso de revelado

En esta fase primeramente se corta la placa en las dimensiones correctas para la antena, posterior a ello se procede a eliminar el material conductor (cobre), que no forma parte de la estructura de la antena, mediante un proceso químico de revelado, el cuál mediante la aplicación de ácido cloruro férrico, permite que únicamente la parte impresa se adhiera al sustrato FR-4, proceso que se muestra en la Figura 100.:



Figura 100. Proceso de revelado

4.6. Resultado Antena Parche tipo Yagi – Uda

Se obtiene la antena fabricada, posterior a pasar por el proceso de revelado, como se indica en la Figura 101, en donde se aprecia que la antena únicamente mantiene el área de cobre tal cual el diseño que se tiene en el software de simulador de ondas electromagnéticas. La antena parche tipo Yagi-Uda es una antena que se presenta en una estructura parche de tamaño compacto, adaptable a superficies pequeñas, fabricada con un presupuesto bajo, y que termina con unas dimensiones de fabricación aproximadas a 68 mm por 68 mm.

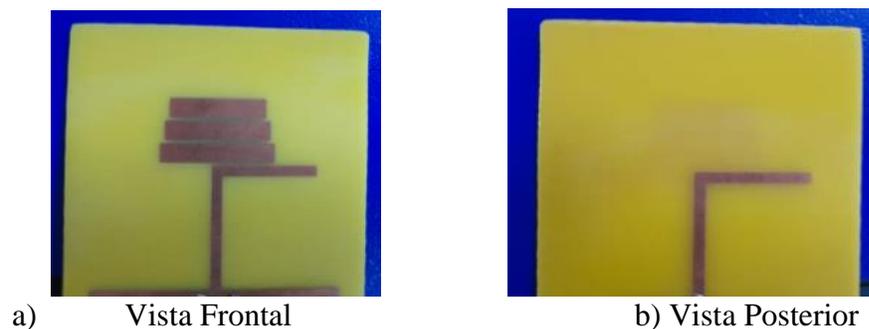


Figura 101. Antena Yagi Uda - Fabrica

4.7. Proceso de soldadura

Finalmente se debe añadir el puerto de alimentación a la antena, como se muestra en la Figura 102., en este caso se suelda un conector SMA hembra en la parte inferior de la línea de transmisión, es importante denotar que al añadir el conector en la antena se tendrá pérdidas por inserción, las cuales son pérdidas inevitables, sin embargo, se debe tomar en cuenta al momento de realizar el análisis de resultados de la antena.

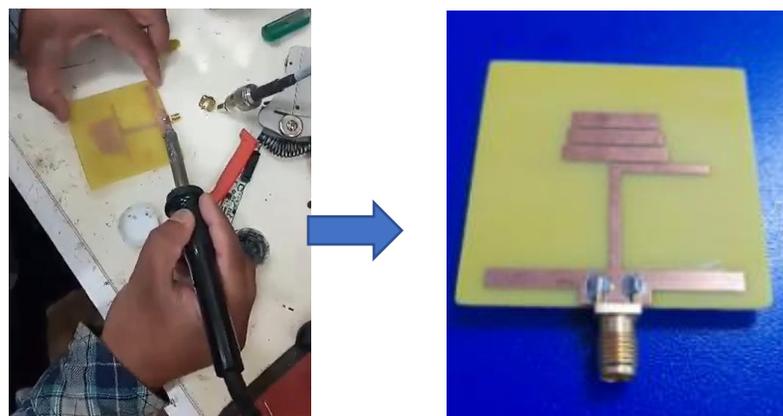


Figura 102. Antena parche tipo Yagi-Uda fabricada

CAPÍTULO V:

PRUEBAS Y RESULTADOS

El trabajo de investigación finaliza con el presente capítulo, el cual tiene como propósito dar la veracidad sobre el funcionamiento de la antena previamente diseñada y fabricada. De modo que se somete la antena a la realización de pruebas en un escenario real, con la utilización del equipo VNA conocido como analizador de redes vectoriales automático, donde nos mostrará el resultado de medición para algunos parámetros de la antena, con el interés de evaluar la antena respecto al estándar FCC y con ello poder dar el resultado sobre el cumplimiento de la antena, permitiendo la aprobación para su funcionalidad e implementación en aplicaciones que incluyan tecnología 5G, como por ejemplo el IoT.

5.1. Cronograma de Pruebas

El cronograma de pruebas representa un resumen del tipo de prueba, el procedimiento y los resultados que se esperan respecto a la medición de la antena con el equipo VNA (Analizador de Redes Vectoriales), en la Tabla 17. se detalla el cronograma establecido para la obtención de resultados para la antena parche tipo Yagi – Uda.

Tabla 17. Cronograma de Pruebas

Cronograma de Pruebas				
N° de la Prueba	Descripción	Tipo de Producto	Procedimiento de la Prueba	Resultados Esperados
Prueba N°1	Medición de Parámetros S	Antena parche (tipo Yagi Uda) 68x68x1.6 mm	Mediante el uso de un VNA se realiza la medición S11, la cual muestra resultados acerca del coeficiente de reflexión, ancho de banda y frecuencias resonantes.	Los resultados del VNA respecto a la frecuencia deben presentar una caída de frecuencia en el rango de 3.5 GHz sobre los - 10 dB.
Prueba N°2	Medición del ROE		De igual manera el parámetro ROE se mide con el VNA, posterior a la configuración de la antena con el VNA	La gráfica que se debe obtener debe encontrarse debajo de los 2 dB, este valor representa el 10% de la energía que se regresa a la fuente.

5.2. Metodología y procedimiento de la medición de antena

Para el desarrollo de la prueba y posterior verificación de cumplimiento de estándares, se identifica mediante la regulación FCC (Hernández, S. R., Castro Morales, L. G., & MaldonaArciniegas Paspuel, O. G., Álvarez Hedo Gudiño, 2021) en la parte 21- 32, la cual abarca todo lo concerniente para aplicaciones 5G para bandas no licenciadas, bandas bajas, bandas medias y bandas altas. Para el caso de estudio la antena opera en una frecuencia 3.5 GHz, valor de frecuencia que se encuentra en las bandas medias (2.5 GHz, 3.5 GHz y 3.7 GHz a 4.2 GHz), bandas que comúnmente se han convertido en ideales para la construcción de 5G, debido a la cobertura equilibrada y características de capacidad.



FCC PARTE 21 - 32
SUBPARTE C - SECCIÓN 1 Y 2



REPORTE DE PRUEBA DE

ANTENA MICROSTRIP TIPO YAGI-UDA

Quito, Ecuador

FCC ID: N/A

Tipo de Reporte: Reporte Original	Tipo de Producto: Antena Yagi Uda
Número de reporte	00-01
Fecha de reporte:	18-08-2022
Revisor:	MSc. Domínguez Limaico Hernán Mauricio hmdominguez@utn.edu.ec
Autor:	Hinojosa Oscar Norberto onhinojosas@utn.edu.ec 0979100722

5.2.1. Detalles generales de la antena parche tipo Yagi-Uda

En la Tabla 18. se describe los detalles de la antena yagi uda

Tabla 18. Detalles del producto

Producto	Antena parche tipo yagi uda
Dimensiones	68mm x 68mm x 1.6mm
Modelo Probado	00-01
Rango de Frecuencia	3.5 GHz
Rango de voltaje	1 dBm (1.26 mW)
Fecha de la prueba	18-08-2022
Estado de la Muestra	NUEVA

5.2.2. Objetivo

Este reporte se prepara en nombre de HINOJOSA OSCAR NORBERTO de acuerdo con la Parte 21 - 32 – Subparte C Y Subparte E referente al reglamento de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC).

Las pruebas se realizaron para determinar el cumplimiento de la FCC Parte 21-32, Subparte C, la sección 1 y2.

5.2.3. Metodología de Prueba

Las mediciones dentro de este informe se realizaron mediante el estándar ANSI C63.10-2013 (ANSI - Instituto Nacional Estadounidense de Estándares) para la realización de pruebas referente a dispositivos inalámbricos sin licencia.

PRUEBA N°1: PARÁMETROS S11

La prueba de reflexión para la obtención de los parámetros S11 se realizó mediante el uso del Analizador de Redes Vectoriales (VNA).

5.2.4. Configuración para prueba (Parámetros S11)

En la Tabla 18 se identifica dos parámetros como la tecnología y el rango de frecuencia de operación de la antena.

Tabla 19. Parámetros de configuración de la antena yagi

Parámetro	Descripción
Tecnología	5G – COMMERCIAL WIRELESS USE
Frecuencia de Operación	3.5 GHz

- Software de ejercicio
Simulador de ondas electromagnéticas

- Lista de equipos utilizados

En la Tabla 20. se muestra el equipo principal de medición, así como materiales adicionales utilizados en el proceso de la medición.

Tabla 20. Lista de equipos

Fabricante	Descripción	Modelo
KeySight	Microwave Analyzer	N9916A
KeySight	Calibration kit	85520A
Superbat	SMA hembra/macho	N/A
N/A	Cable externo coaxial 1m	N/A

5.2.5. Diagrama de la configuración de la prueba

En la Figura 103., se muestra el diagrama de conexión para la realización de la prueba, la cual consta de: *Fuente DC* > *VNA* > Cable coaxial de 1m de longitud (conector terminal hembra) y la Antena Yagi Uda.



Figura 103. Configuración de antena

5.3. Resultados de pruebas

Como primer punto se presenta la Tabla 21., que especifica las condiciones climáticas del día de la prueba.

Tabla 21. Clima Agosto – Quito

Fuente: (AccuWeather, 2022)

Temperatura	20° C
Humedad relativa	89 %
Presión atmosférica	0.71 atm

5.3.1. Parámetros S

En la Figura 104. se muestra la medición realizada por el VNA, donde se obtiene los resultados reales de la antena en base al cumplimiento del parámetro ROE (línea continua amarilla), demostrando una curva bajo los -10 dB por lo tanto cubre la frecuencia de 3.5 GHz con un coeficiente de reflexión de -13.81 dB. Permitiendo dar un resultado aceptado para la medición realizada.



Figura 104. Resultados VNA – Parámetros S

5.3.2. Ancho de Banda

Se procede a mostrar el resultado sobre el cálculo de ancho de banda en la prueba realizada, donde se define una frecuencia menor (F_L) de 3.3 GHz (*marcador A*) y una frecuencia mayor (F_H) de 6.2 GHz (*marcador B*), ambas frecuencias se las precisa en la banda de los -10 dB (*línea continua azul*). Como se indica en la Figura 105., permitiendo la determinación que la antena cuenta con un ancho de banda de 2.9 GHz.

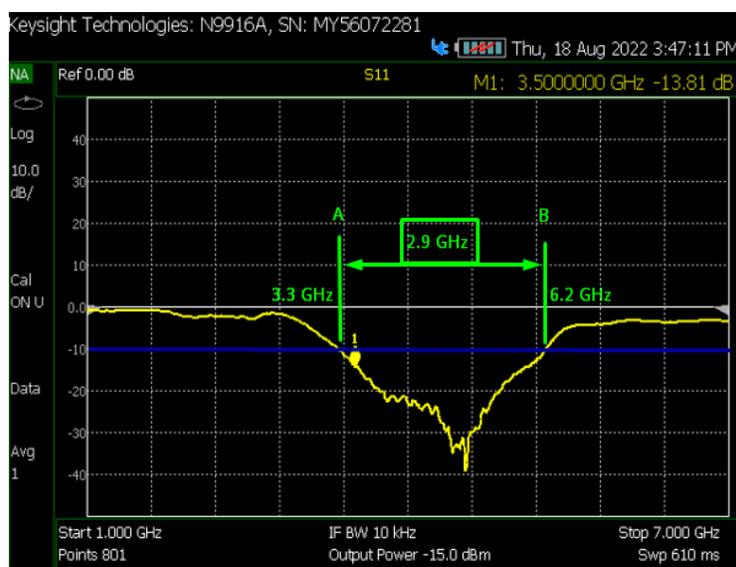


Figura 105. Resultados VNA-Ancho de banda

Es importante denotar que el resultado simulado (ver Figura. 54), presenta una variación notoria con el resultado real (ver Figura 76. y Figura77.), por lo tanto, se aprueba el cumplimiento de los parámetros S de la antena, más sin embargo, se determina que el problema causante de la variación es el método de impresión de la antena al sustrato RF4, debido a que en procedimiento realizado se añaden pedazos o pigmentos de cobre sobre el sustrato RF4, lo cual modifica la eficiencia de la antena y altera los resultados, de tal manera, dicho procedimiento debe ser desarrollado con equipos profesionales para antenas, mismos que no se han encontrado dentro del país.

5.4. Resultados Finales– antena parche tipo Yagi-Uda

En la Tabla 22 se muestra el resultado de la prueba correspondiente a los parámetros S de la antena, específicamente el coeficiente de reflexión en la frecuencias menor y mayor.

Tecnología: WIRELESS - 5G

Frecuencia de operación: 3.5 GHz

Frecuencia menor (F_L) – Marcador A: 3.3 GHz (Fig. 77)

Frecuencia mayor (F_H) – Marcador B: 6.2 GHz (Fig. 77)

Tabla 22. Resultados coeficiente de reflexión

Frecuencia (GHz)	Pérdida de retorno (dB)	Distancia de medición (m)	Veredicto
3.3 GHz	-10	1.0	Pasa
6.2 GHz	-10	1.0	

A continuación, se muestra el resultado sobre la resonancia central, como se observa en la Figura 106., el resultado de la resonancia central es determinado en 5 GHz (*marcador A*) con un coeficiente de reflexión de -39 dB, debido a que es el punto donde se tiene la mayor resonancia total de la antena, de modo que, en el ambiente real la antena presenta una frecuencia mayor a la

previamente simulada, consecuente de usar un sustrato con un grosor mayor al que fue simulado; a consecuencia de que dentro del país no existe el sustrato RF4 de 1mm de grosor, por tal razón, las ondas electromagnéticas comienzan a generarse dentro del sustrato provocando una alteración dentro del mismo y generando mayor resistencia para que la expansión de las ondas sea directamente al ambiente, razones por la cual se tiene el cambio en la resonancia central.

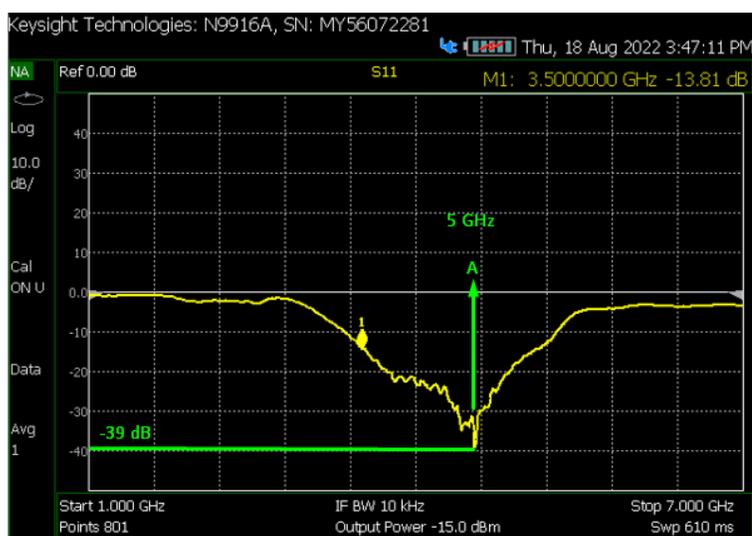


Figura 106. Resultado VNA-Resonancia de la antena

A continuación, se determina la Tabla 23, que detalla la resonancia medida, la cual se encuentra dentro del rango de frecuencias de la antena parche tipo Yagi-Uda correspondiente a los valores desde 3.3 GHz a 6.2 GHz, cubriendo la frecuencia central de 3.5GHz, por tal motivo, la antena es aceptada para su funcionamiento en dicha frecuencia.

Tecnología: WIRELESS – 5G

Rango UWB: 3.5 GHz

Frecuencia 1 de Resonancia: 5 GHz

Tabla 23. Resultado Resonancia

Frecuencia (GHz)	Pérdida de retorno (dB)	Distancia de medición (m)	Polarización	Altura de la antena (mm)	Veredicto
5 GHz	-39.0	1.0	Lineal	1.6	Pasa

5.5. Resultado en base a la FCC §Parte 21-32. C (1) y (2)

Tomando como base los resultados de las pruebas de parámetros S, se establece la Tabla 24, la cual describe el resumen de la prueba sobre la antena parche tipo Yagi-Uda, y se muestra la regulación específica de la FCC (parte, subparte y sección) para su respectivo cumplimiento. (Hernández, S. R., Castro Morales, L. G., & MaldonaArciniegas Paspuel, O. G., Álvarez Hedo Gudiño, 2021)

Tabla 24. Resumen de prueba

Especificación de Prueba	§FCC Parte 21-32. C (1) y (2)		
Modo de Prueba	VERIFICADA	Veredicto: PASA	
Fecha	18-agosto-2022	Temperatura	20 ° C
Humedad Relativa	89%	Presión Atmosférica	0.71 atm
Fuente AC:	110 AC	Potencia del puerto	1 dBm (1.26 mW)

Consiguiente se desarrolla la Tabla 25. que muestra la regla FCC que se está cumpliendo, describiendo la parte y secciones regulatorias para aplicaciones inalámbricas con tecnología 5G. En donde la comisión (FCC) propuso licenciar la banda de 3.45 GHz en bloques de 10 MHz, tal como se muestra en la Figura 107, con el propósito de promover el uso eficiente y robusto de la banda para las tecnologías inalámbricas de próxima generación, incluyendo la tecnología 5G.

Tabla 25. Resumen de estándares

Regla FCC	Descripción de la prueba	Resultado
§21-32.C (1)	Tamaños de Bloque	Cumpliendo
§21.32.C (2)	Configuración de bloque de espectro	Cumpliendo

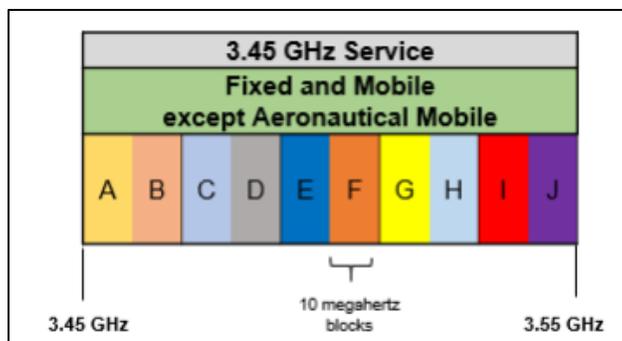


Figura 107. Plan de bandas 3.45 GHz

En cuanto al cumplimiento, la antena opera en la banda de 3.5 GHz (ver Figura 77), en el BLOQUE E, espectro accesible para despliegues de redes de banda ancha, además que, el uso de esta frecuencia permite el alcance en zonas rurales y cuya flexibilidad permite adaptar las aplicaciones en esta banda a las necesidades futuras respecto a tecnología 5G.

5.6. Resumen de resultados de las pruebas realizadas

Modo de operación: Prueba de Reflexión – *Parámetros S*

Fecha: La prueba fue realizada por Oscar Hinojosa el 18 de agosto del 2022.

En la Tabla 26. se muestra los resultados de la medición de la antena Yagi UDA mediante el VNA, en donde se tiene un rango de frecuencia que va desde los 3.3 GHz hasta los 6.2 GHz, cubriendo la frecuencia requerida de 3.5GHz. Ver Anexo1 para observar el total de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas

Tabla 26. Resultados de la medición

Descripción del resultado		Valor
Frecuencia menor (GHz)	F_L	3.3
Frecuencia mayor (GHz)	F_H	6.2
Frecuencia Central (GHz)	$(F_H + F_L)/2$	5.0
Ancho de banda fraccional	$2(F_H - F_L) / (F_H + F_L)$	0.61

Tomando en cuenta los resultados finales de las pruebas realizadas, se puede aprobar el funcionamiento de la antena parche tipo yagi-uda para aplicaciones con tecnología inalámbrica 5G, citando a la organización 3GPPP (GSMA, 2019b), donde se detalla las bandas de frecuencias operacionales para nombrada tecnología, permitiendo verificar que la frecuencia central de la antena que es de 3.5 GHz, se encuentra dentro del rango frecuencial permitido; adicional a ello la FCC (Hernández, S. R., Castro Morales, L. G., & MaldonaArciniegas Paspuel, O. G., Álvarez Hedo Gudiño, 2021), propuso licenciar la banda de 3,45 Ghz a 5,5 Ghz para su uso en tecnologías de próxima generación donde está inmersa la tecnología inalámbrica 5G, admitiendo el funcionamiento de la antena para trabajos a futuro.

CONCLUSIONES

El previo estudio sobre la teoría de antenas permitió tener un conocimiento acorde sobre los parámetros fundamentales, mismos que fueron determinados, analizados y verificados, permitiendo poner en práctica y consolidando los estudios con la fabricación del prototipo de antena y más aún con el desarrollo de las pruebas a escenario real, logrando demostrar las variaciones que se obtienen de un ambiente simulado a un real y permitiendo concluir que el desarrollo dentro de este tipo de investigaciones debe ser fabricado con equipos especializados en antenas, sin desmeritar la posibilidad de realizarlo acorde a los implementos que se cuenta en el medio común, ya que el alcance de obtención de los resultados logra ser eficiente y positiva, tal y como fue el caso.

La importancia de desarrollar la antena en varios ciclos, permite ir moldeando la antena para los resultados esperados y la construcción de un prototipo que logre adaptarse al ambiente necesario, de tal manera que el desarrollo como se llevó a cabo en el presente trabajo, permitió aceptar las modificaciones de los directores de la antena, obteniendo el conocimiento respecto a la radiación de frecuencia en las antenas tipo yagi – uda, el cual depende en gran parte de los directores, como se demostró en el presente trabajo, realizando el corte en los directores a fin de lograr la disminución de la frecuencia central, obteniendo los 3.5 GHz, misma que es aceptada en el funcionamiento de aplicaciones con tecnología 5G.

Gracias al uso del analizador de redes vectoriales (VNA) se pudo verificar el correcto funcionamiento de la antena, demostrando que para la frecuencia de 3.5 GHz se tiene una pérdida de retorno bajo los -10 dB, siendo de -13.81 dB, valor que permite la aprobación de la antena para la aplicación requerida y además contando con un gran ancho de banda de 2.9 GHz, lo cual es óptimo para la correcta transferencia de datos a distancias cortas, que es lo que se pretende con la tecnología 5G el tener lo más cerca posible las antenas de los dispositivos a conectarse.

Se ha generado un gran aporte con la presente investigación hacia la provincia de Imbabura, directamente al desarrollo tecnológico, que por el momento se depende de los avances internacionales. De modo que, con la realización del presente trabajo de titulación se demuestra que se puede desarrollar dispositivos para tecnología de vanguardia y se motiva a que en un futuro se pueda implementar dispositivos tecnológicos creados dentro de la provincia, logrando generar un gran avance para el desarrollo tecnológico de la provincia y con la posibilidad de ser un referente a nivel mundial.

RECOMENDACIONES

Es muy necesario el estudio previo de los fundamentos de antenas, basándose en material literario de referencia y teniendo en cuenta que el desarrollo de antenas se ha generado desde hace mucho tiempo atrás lo que provoca una gran información sobre estas, adicional que el aporte que entrega a las telecomunicaciones presenta un avance diario en el desarrollo de antenas, más sin embargo el concepto básico y de funcionamiento no presenta una gran variación a las actuales.

Es de suma importancia realizar los cálculos correctos previo al diseño de la antena, a consecuencia de que cada antena logra resultados diferentes, por tal motivo el desarrollo del diseño va ligado con el correcto cálculo de las medidas de la antena y posteriormente tener la precaución necesaria para trasladar los valores calculados al software de simulación con los valores exactamente iguales, a fin de evitar variaciones en los resultados de la antena.

Es recomendable que para la fabricación de la antena se haga un previo estudio de mercado sobre los componentes que se pueda lograr a encontrar, los cuales deben ser de las mismas características a los elegidos en la simulación de la antena y al momento de fabricarla tomar las precauciones necesarias para que el sustrato pueda permanecer lo más limpio posible, evitando que en él se añadan partículas las cuales pueden generar radiaciones espurias, por último al momento de soldar el conector de alimentación respectivo de la antena debe realizarse con una suelda cubriendo totalidad los pines en el sustrato para no provocar pérdidas en la radiación de la antena.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguado. (2016). *Diseño de una antena parche a 8.7 GHz basado en una estructura metamaterial*. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/22938/DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS DE PARCHE PEQUEÑAS A 3.7 GHZ BASADO EN UNA ESTRUCTURA METAMATERIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ARCOTEL. (2017). *Boletín Estadístico*. http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICO-Marzo-2018_f.pdf
- ARCOTEL. (2020). Infraestructura Y Cobertura. *BOLETIN ESTADISTICO*.
- Asamblea Constituyente. (2013). *Constitución de la Republica del Ecuador*. https://www.oas.org/juridico/mla/sp/ecu/sp_ecu-int-text-const.pdf
- Balanis, C. (2008). *Modern Antenna. HandBook*. Wiley.
- Balanis, C. A. (2008). *Modern Antenna*.
- Beltrán, E. M. (2019). *Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G*.
- Cardama, Á., Roca, L., Rius, J., Romeu, J., Blanch, S., & Bataller, M. (2004). *Antenas* (2nd ed.). Alfaomega.
- Consejo Nacional de Planificación. (2017). *PLAN NACIONAL DEL BUEN VIVIR*. <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
- Cuzme Rodríguez Fabian Geovanny. (2015). *El internet de las cosas y las consideraciones de seguridad*. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8492/INTERNET DE LAS COSAS TESIS Y CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD - FINAL.pdf;sequence=1>
- Dahlman, E., Mildh, G., Parkvall, S., Peisa, J., Sachs, J., Selén, Y., & Sköld, J. (2014). 5G

- Huidobro, J. (2013). *Antenas de telecomunicaciones Publicación patrocinada por*. 18.
- Huidobro, J., & Luque, J. (2014). *Comunicaciones por Radio. Tecnologías, redes y servicios de radiocomunicaciones. El espectro electromagnético*. Alfaomega.
- Hurlburt, G. F., Voas, J., & Miller, K. W. (2017). The internet of things: A reality check. *IT Professional*, 14(3), 56–59. <https://doi.org/10.1109/MITP.2012.60>
- IEEE, S. (2020). *29148-2011 - Norma internacional ISO / IEC / IEEE - Ingeniería de sistemas y software - Procesos del ciclo de vida - Ingeniería de requisitos*.
<https://standards.ieee.org/standard/29148-2011.html>
- Irene Oñate. (2019). *Antenas optimizadas para IoT - comunicacionesinalambricashoy.com*.
<https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/antenas-optimizadas-para-iot/>
- ITU Telecom. (2018). <https://www.itu.int/es/itutelecom/Pages/default.aspx>
- José Luis Masa Campos. (2014). *Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip MAX*.
http://rfcas.eps.uam.es/web/sites/default/files/trabajos_academicos/Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip MAX2838.pdf
- Julio Cerezo y Pepe Cerezo. (2017). El impacto de 5G. *Evoca*, 1–42.
[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00019-5)
- Kramer, O., Djerafi, T., & Wu, K. (2010). Vertically multilayer-stacked yagi antenna with single and dual polarizations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(4), 1022–1030. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2041155>
- Lucía, I. L., Suárez, P., Díaz Sánchez, F., Santo, U., De, T. F., & De Telecomunicaciones, I. (2018). Estudio de prospectiva en el uso de la tecnología 5g en Colombia al 2025.
Instname: Universidad Santo Tomás.

- Next Generation Mobile Networks Alliance 5G Initiative. (2018). 5G White Paper. A *Deliverable by the NGMN Alliance*, 124. <https://doi.org/10.1021/la100371w>
- Salazar Ramírez, J. A. (2018). *Diseño y construcción de una antena para su aplicación en 5G*. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/25480>
- Society, P. (2018). *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation IEEE Antennas and Propagation Society IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation* (Vol. 2013).
- Sreelakshmi, K., Bora, P., Mudaliar, M., Dhanade, Y. B., & Madhav, B. T. P. (2018). Linear array Yagi-Uda 5G antenna for vehicular application. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(1.1), 513–517. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i1.1.10158>
- Stalling, W. (2005). *Wireless Communications and Networking*. In I. Pearson Education (Ed.), *Fixed-Mobile Wireless Networks Convergence* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1017/cbo9780511536748.005>
- Torrecillas, J. (2018). *Diseño de una antena de parche con ancho de banda mejorado usando técnicas de adaptación de impedancias*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA.
- Trafficcomm, K. (2015). *Design of Microstrip Patch Antennas at 5.8 GHz*. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/156053.pdf>
- Vaca Parra, S. A., & Venegas López, B. P. (2011). *Diseño y construcción de una antena tipo patch en la banda de 5.4 GHZ*. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2973>
- VALENCIA, U. P. DE. (2016). *ANTENAS. Tema 1 Consideraciones Generales Sobre Antenas. Parámetros*. http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/transparencias/parametros_antenas.pdf

Villamil, S., Hernández, C., & Tarazona, G. (2020). An overview of internet of things.

Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), 18(5), 2320–2327.

<https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v18i5.15911>

Wang, C. X., Haider, F., Gao, X., You, X. H., Yang, Y., Yuan, D., Aggoune, H. M., Haas, H.,

Fletcher, S., & Hepsaydir, E. (2017). Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 122–130.

<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736752>

ANEXOS

El siguiente apartado contiene el total de los resultados obtenidos en la realización de las pruebas de la antena con el equipo VNA, especificando el valor exacto en cada punto del todo lumbral en que la antena es efectiva para su funcionamiento.

1. Anexo I – Resultados Reales - VNA

Keysight Technologies N9916A: A.09.57

!Date: Thursday, 18 August 2022 15:47:07

!TimeZone: (UTC-05:00) Bogota, Lima, Quito, Rio Branco!Model: N9916A

!Serial: MY56072281

Freq [GHz], "dB(St(Circulo_Principal__T1,Circulo_Principal__T1)) ["]

#	Hz S	DB R
1000000000	-0.693973822759483	139.243347640393
1007500000	-0.717907379900008	137.392774173375
1015000000	-0.775505805347331	135.200499642566
1022500000	-0.844135106053713	133.250955836017
1030000000	-0.847190389014572	130.874660888902
1037500000	-0.897814390221654	128.827145866959
1045000000	-0.926399322475943	126.543622941953
1052500000	-0.940294257922436	124.341517775083
1060000000	-0.936658909555813	122.276505768718
1067500000	-0.899295766604082	120.22736990252
1075000000	-0.885709590692805	118.151050617494
1082500000	-0.887805159832617	116.141399255087
1090000000	-0.871576069734886	114.097441353704
1097500000	-0.901392141727127	112.211904246528
1105000000	-0.93602235719038	110.176591478176
1112500000	-0.97988487125289	108.130266218783
1120000000	-1.01487735503007	105.909540989178
1127500000	-1.07268533880251	103.612899294855

113500000	-1.10029393016297	101.311024494607
114250000	-1.09113717421633	99.1158184495296
115000000	-1.08854631073663	96.8068567597168
115750000	-1.08116969000505	94.4983066154647
116500000	-1.03539370192861	92.2924306834107
117250000	-0.984584977000291	90.256638094058
118000000	-0.981735697590478	88.0987513012835
118750000	-0.97290899615273	86.1012541110738
119500000	-0.980223867379646	83.9129835333871
120250000	-1.013125019096	81.7908579089282
121000000	-1.04463299843904	79.5176800145026
121750000	-1.06502578636598	77.2379845182389
122500000	-1.09943801033778	74.8004653835039
123250000	-1.07306692394727	72.2683939230616
124000000	-1.08461996588268	69.8395207740201
124750000	-1.05629785198504	67.3556812751849
125500000	-1.0492953976597	64.8639825879738
126250000	-0.984894588100453	62.5617491644386
127000000	-0.935408036981089	60.1688641499757
127750000	-0.906687755405814	57.684621316156
128500000	-0.877006694352499	55.57479073414
129250000	-0.86530354340143	53.3157868892661
130000000	-0.902631058966439	50.7865681589324
130750000	-0.917856213337116	48.3764789760602
131500000	-0.9419291887716	45.8460536040755
132250000	-0.960187581716254	43.0744394238886
133000000	-0.972654054544066	40.434618062986
133750000	-0.973066728970432	37.801163407313
134500000	-0.949801834824855	35.0207668494014
135250000	-0.905973922547854	32.4757431475254
136000000	-0.840661721027409	29.8741089825321
136750000	-0.827040419435721	27.1927333414455
137500000	-0.802439843979534	24.8763351767573
138250000	-0.782049442000845	22.3965931114383

1390000000	-0.782131569576557	19.9030894444814
1397500000	-0.80001379782443	17.2599101964645
1405000000	-0.849410737238991	14.8834763079258
1412500000	-0.863006381956278	12.1025310012348
1420000000	-0.901498210456518	9.22060614979156
1427500000	-0.898365323383277	6.26721897209688
1435000000	-0.892267129821132	3.60197556950227
1442500000	-0.866378811042696	0.904352944197916
1450000000	-0.833316243738134	-1.75431747904322
1457500000	-0.790478464759509	-4.59884881227923
1465000000	-0.748563852728771	-7.27744786562133
1472500000	-0.753636759454538	-9.66882774812719
1480000000	-0.74586267784119	-12.1251747106408
1487500000	-0.738963500058988	-14.6619868186254
1495000000	-0.776413801671744	-17.3842650823678
1502500000	-0.790655727227013	-19.8995946261974
1510000000	-0.886439520016706	-22.7405922030495
1517500000	-0.88512386408737	-25.542578763777
1525000000	-0.888634011500736	-28.384263043693
1532500000	-0.895842188963882	-31.1616340327192
1540000000	-0.900159460370176	-33.9368962178029
1547500000	-0.857240572886589	-36.6231795861346
1555000000	-0.82698475677253	-39.3205158010931
1562500000	-0.804018864347336	-41.8759154825917
1570000000	-0.771303091018853	-44.3419225628418
1577500000	-0.77592543717848	-46.9342394273794
1585000000	-0.811175931351668	-49.2290726906133
1592500000	-0.851558478557857	-51.8526317598017
1600000000	-0.90560941555013	-54.5598818171717
1607500000	-0.928350652793465	-57.0330782397913
1615000000	-0.952028847394606	-59.924111061719
1622500000	-0.98184140353642	-62.6815237715838
1630000000	-0.983169624861332	-65.4793840778292
1637500000	-0.969484558354645	-68.0947558413456

1645000000	-0.939727218346828	-70.6594821813624
1652500000	-0.928894819741634	-73.1273338609219
1660000000	-0.9099112562233	-75.8735949886977
1667500000	-0.903536676375672	-78.2327821097064
1675000000	-0.914971182431809	-80.58692634079
1682500000	-0.948082273339958	-83.045153013123
1690000000	-0.993202138613342	-85.4615899347341
1697500000	-1.05326811203531	-88.0486103084225
1705000000	-1.09511428713104	-90.7433309366744
1712500000	-1.1468022174133	-93.2323022137947
1720000000	-1.17241312640612	-95.8633168884109
1727500000	-1.18126890323576	-98.4656015134324
1735000000	-1.17869542712571	-101.074759510039
1742500000	-1.18295597180253	-103.471866731337
1750000000	-1.16046876794095	-106.067014516028
1757500000	-1.19321116461548	-108.353226442608
1765000000	-1.20738820932566	-110.577428240697
1772500000	-1.23931795435311	-112.791416302081
1780000000	-1.31572944925419	-115.169607096269
1787500000	-1.38040405445393	-117.456239175923
1795000000	-1.47636322612024	-119.922685795856
1802500000	-1.5517607162895	-122.446890650129
1810000000	-1.64277227600372	-124.784409917816
1817500000	-1.69373343980247	-127.183718627948
1825000000	-1.72077895805127	-129.48444250241
1832500000	-1.74809943224767	-131.729319809695
1840000000	-1.80145631823347	-133.846464753488
1847500000	-1.78396678048633	-135.901272914578
1855000000	-1.81268025426264	-137.768971621306
1862500000	-1.86237602195528	-139.594508728662
1870000000	-1.93744826353905	-141.567829553192
1877500000	-1.99172742691216	-143.363598689858
1885000000	-2.07682237632798	-145.178476819558
1892500000	-2.16920051368337	-147.159990154077

1900000000	-2.22946641796712	-149.228922776874
1907500000	-2.29611343893838	-151.367356863572
1915000000	-2.35169412276298	-153.343004287396
1922500000	-2.40621247274528	-155.087823305994
1930000000	-2.40708851596819	-157.145176678066
1937500000	-2.39094161922794	-158.696050291978
1945000000	-2.39147589487657	-160.363494866516
1952500000	-2.37945209957806	-162.194929568421
1960000000	-2.39672583230093	-163.528092055315
1967500000	-2.41503466960778	-164.97828186073
1975000000	-2.4524040518133	-166.433898873344
1982500000	-2.48499421243577	-168.00674962099
1990000000	-2.50926839513102	-169.611958186157
1997500000	-2.56763819438603	-171.457285000145
2005000000	-2.58250456400206	-173.277155665707
2012500000	-2.58067307663491	-174.986440607472
2020000000	-2.5551596272767	-176.880944026322
2027500000	-2.52940176008036	-179.028944779271
2035000000	-2.47688600951755	179.55428501387
2042500000	-2.39720001320483	177.79786963596
2050000000	-2.35494963419033	176.138641286476
2057500000	-2.34191780365177	174.571422998683
2065000000	-2.31424778361057	173.09363797956
2072500000	-2.27779409211923	171.425565746294
2080000000	-2.32312374064284	169.621917430935
2087500000	-2.32263214845264	167.997383878803
2095000000	-2.33713886619858	165.935415040099
2102500000	-2.35284966715304	164.13937903546
2110000000	-2.32748236083302	162.053077846659
2117500000	-2.34359030359453	160.013148192221
2125000000	-2.29730135573132	158.135806950701
2132500000	-2.25984151670614	156.080668170206
2140000000	-2.18707163624468	153.971574893599
2147500000	-2.17338162664478	152.358799105922

215500000	-2.13011848978217	150.948311583933
216250000	-2.14443358186441	149.161749286378
217000000	-2.15912207722213	147.732859567067
217750000	-2.19145088470261	145.94085797629
218500000	-2.23263103939598	144.336655104343
219250000	-2.23602041437269	142.290556998142
220000000	-2.24124972465353	140.266158663303
220750000	-2.29281062730417	138.427741333358
221500000	-2.28279857271075	136.246658887853
222250000	-2.28012966810888	134.434511502964
223000000	-2.22228600739737	132.44683278701
223750000	-2.22031347985245	130.510559016883
224500000	-2.18555669699062	128.895515115623
225250000	-2.16130603965307	127.43098066899
226000000	-2.17349821564727	125.686855770877
226750000	-2.14644921130379	124.160383825759
227500000	-2.22812029078802	122.310806770041
228250000	-2.25807557542201	120.641825098927
229000000	-2.35548254035725	119.015235565114
229750000	-2.36579455236665	117.074753697744
230500000	-2.39619573593296	115.389492606554
231250000	-2.41857628703004	113.414766009006
232000000	-2.46294188215459	111.679713703399
232750000	-2.45351402771496	109.682710167122
233500000	-2.4284706390925	107.99353251942
234250000	-2.37571512307297	106.381871082745
235000000	-2.38590657165099	104.906604339919
235750000	-2.37186329678657	103.627708340032
236500000	-2.41886521905767	102.28441573118
237250000	-2.45327230807427	100.889086312184
238000000	-2.45380013144596	99.2783249238241
238750000	-2.49594902349722	97.6496758874104
239500000	-2.49260825439844	96.1174471829942
240250000	-2.51845496003214	94.3529942055493

241000000	-2.53360162251783	92.3651632020517
241750000	-2.48581278599875	90.749465125095
242500000	-2.47739759444371	88.9717677444894
243250000	-2.43324506638158	87.2485781789477
244000000	-2.38026831401466	85.461457595519
244750000	-2.32304970056193	83.7612388115407
245500000	-2.34873810194835	82.170099722207
246250000	-2.34115832821243	80.5015646998155
247000000	-2.35528601497151	78.8376523404793
247750000	-2.42593151704357	77.0823068554327
248500000	-2.52147421975619	75.1382683193872
249250000	-2.60745030483575	73.4601999879218
250000000	-2.67845229674406	71.7484919780733
250750000	-2.75456200205431	69.7233446545398
251500000	-2.78512204806672	68.1802252813435
252250000	-2.85385720438547	66.5191827969989
253000000	-2.93030992737009	65.1901914341056
253750000	-2.9640093092966	64.277766080112
254500000	-2.99866085235177	63.5062741317873
255250000	-3.00961768494331	63.1557247632036
256000000	-2.97511847292758	62.8657788994091
256750000	-2.87476270961164	62.1543569723104
257500000	-2.77337031247083	61.4535469062712
258250000	-2.70558848704981	60.3765399132167
259000000	-2.58232883489683	59.0646055457652
259750000	-2.44868630228113	57.3409136767409
260500000	-2.31548688193019	55.4398948831326
261250000	-2.22563795730355	53.3280452694645
262000000	-2.10359143594313	51.0663216241712
262750000	-1.97201125419927	48.9742807725005
263500000	-1.88886662191421	47.0285882790784
264250000	-1.76819875852051	44.788292941341
265000000	-1.69332296487859	43.087054380234
265750000	-1.6273576266664	40.9385192145981

266500000	-1.60627253538898	38.899851584514
267250000	-1.58996482018593	36.918281013287
268000000	-1.59714799501316	34.925260474953
268750000	-1.59984386393699	32.65673617423
269500000	-1.60867320745627	30.4313837707988
270250000	-1.63676808906401	28.1644249029651
271000000	-1.61812203681107	25.9402294225855
271750000	-1.59966249590749	23.6290078811779
272500000	-1.58412030016806	21.3955421730889
273250000	-1.56559966096661	19.2825943356248
274000000	-1.55419741466923	17.3969275718963
274750000	-1.54037086659439	15.2169616198837
275500000	-1.57425429318208	13.3715507924026
276250000	-1.59002739749435	11.5313763885005
277000000	-1.61804547860827	9.54916801663539
277750000	-1.67195175440867	7.4969614904531
278500000	-1.72532719565348	5.14056971709795
279250000	-1.77165700880023	3.16382088006073
280000000	-1.81788011073278	0.893537423464381
280750000	-1.83819965559792	-1.34079142866341
281500000	-1.88065723960087	-3.41068325183944
282250000	-1.88304950392973	-5.54380814908876
283000000	-1.90628296108682	-7.67695069691944
283750000	-1.90168009735033	-9.70656084814017
284500000	-1.90709389739619	-11.6878583269657
285250000	-1.96866590715668	-13.6941376501889
286000000	-2.02236858655346	-15.5819099719844
286750000	-2.11745701718172	-17.6825159917151
287500000	-2.20322487298986	-19.6616178813681
288250000	-2.28212074577313	-21.7179404314077
289000000	-2.37982783695843	-23.9928715881715
289750000	-2.46670284387704	-26.0102679499555
290500000	-2.51359557824982	-28.1605897828887
291250000	-2.56154464045501	-30.5081301294453

292000000	-2.62436004031862	-32.5584388112602
292750000	-2.64853998951714	-34.6672569657949
293500000	-2.73220141982836	-36.6746500299757
294250000	-2.80322637948417	-38.4934479913759
295000000	-2.89620072730982	-40.508075491433
295750000	-2.96979005341786	-41.9953212012802
296500000	-3.08294720847361	-43.8331029146774
297250000	-3.1906225829336	-45.9653555782143
298000000	-3.30281062090287	-47.8885686643939
298750000	-3.4570602556439	-50.2237288452532
299500000	-3.57010834922052	-52.2961876902714
300250000	-3.69882573720106	-54.6562287536517
301000000	-3.81032554081302	-56.6934997736813
301750000	-3.87709760288371	-58.6682186322323
302500000	-3.98414370409141	-60.3633331054456
303250000	-4.03719458027673	-61.8256785200826
304000000	-4.09948459587585	-63.772627053112
304750000	-4.21526670363518	-65.2186908082623
305500000	-4.34140582075101	-67.172785146821
306250000	-4.50440503166015	-68.9298340557877
307000000	-4.68464374661636	-70.7532143913347
307750000	-4.87414510285745	-72.6334669637816
308500000	-5.06048421939192	-74.4063565760721
309250000	-5.20703596137123	-76.0766494320483
310000000	-5.33753969108492	-78.0725746504871
310750000	-5.41826865107458	-79.8943724605725
311500000	-5.53977922302251	-81.8408094303544
312250000	-5.61757868802343	-83.7811913880958
313000000	-5.74170756612541	-85.4999465887688
313750000	-5.91694612857396	-86.6880462731166
314500000	-5.96976154973823	-87.7333490535514
315250000	-6.13346171685461	-89.1147952283256
316000000	-6.31180086430183	-90.3033563667231
316750000	-6.445672606913	-91.7702436542257

317500000	-6.63352426471185	-93.6833805212025
318250000	-6.81008208791967	-95.3328003791427
319000000	-6.94106275173059	-97.0439903224481
319750000	-7.13871950191528	-99.3497250927027
320500000	-7.27709804068332	-100.778844219933
321250000	-7.4014142211474	-102.893602394199
322000000	-7.5646599930492	-104.143042549088
322750000	-7.637362676372	-105.486246368691
323500000	-7.75380066114963	-106.279975314723
324250000	-7.83718922191628	-107.598428099658
325000000	-7.91069417325606	-108.641164532277
325750000	-8.07421372154048	-109.612065242399
326500000	-8.21389509639852	-111.750930310887
327250000	-8.49210815792955	-112.972690707735
328000000	-8.70802904507702	-114.146216584706
328750000	-8.90651581006195	-115.787823147341
329500000	-9.0025151249701	-117.270780549684
330250000	-9.124744440405694	-118.909725748165
331000000	-9.08146574260776	-120.914292503812
331750000	-9.23602659657022	-123.084694329909
332500000	-9.44220071596422	-125.055171348649
333250000	-9.52730709429756	-126.22267868156
334000000	-9.79622672832529	-127.40603396534
334750000	-10.0769339512637	-128.45989128893
335500000	-10.3404695031534	-128.07240415515
336250000	-10.3851954907509	-128.18344345646
337000000	-10.4878830565063	-129.72651273348
337750000	-10.55750279112	-131.113697637405
338500000	-10.7597203875034	-133.575729328686
339250000	-10.9641760656646	-137.051778883732
340000000	-11.3834795383876	-138.909946745415
340750000	-11.5874451603299	-139.987304122589
341500000	-11.7731980607833	-141.079912387129
342250000	-11.8803055540847	-141.952338760553

343000000	-11.9754398276605	-141.958505932103
343750000	-11.988113453632	-142.33105903922
344500000	-11.9967633322564	-143.337706640643
345250000	-12.2804165355409	-145.185724022695
346000000	-12.4288888129114	-144.672606164315
346750000	-12.7717750249272	-146.871321403186
347500000	-13.0528418474518	-148.304122390582
348250000	-13.5137499805225	-149.272953300412
349000000	-13.7011601888871	-150.682496862627
349750000	-13.7623115981718	-151.719341584461
350500000	-13.9982965608393	-154.89510695575
351250000	-14.2914466587109	-155.561222957193
352000000	-14.1333616581653	-155.875839718714
352750000	-14.2475456814784	-157.507670717892
353500000	-14.4443595313474	-159.364189776914
354250000	-14.7659383544594	-160.077694097871
355000000	-15.0342606167544	-158.402089184547
355750000	-15.2917575966203	-157.765122391817
356500000	-15.523737847618	-157.226005456497
357250000	-15.892366097328	-158.434361634007
358000000	-16.0884307689546	-158.004071469805
358750000	-16.2094813516363	-161.125550336679
359500000	-16.7052115283019	-162.41203943325
360250000	-16.922243252794	-166.185832262799
361000000	-17.3730286712719	-166.550540710347
361750000	-17.3543190114793	-165.889300298123
362500000	-17.3469950220994	-167.710069599428
363250000	-17.2467083097279	-167.087031360399
364000000	-17.1453384970266	-167.341664057372
364750000	-17.3998290436184	-166.913313638165
365500000	-17.4193511182608	-167.545164514621
366250000	-17.902500048396	-168.251809338593
367000000	-18.4737741903793	-167.757462786795
367750000	-18.880499330513	-164.875879146045

368500000	-19.1465928863373	-165.312325503089
369250000	-19.4534282670933	-163.565928044118
370000000	-19.374553952916	-165.043331399788
370750000	-19.2939381013601	-167.933142912003
371500000	-19.4253448881679	-170.861946647069
372250000	-19.2748188215313	-175.239377200977
373000000	-19.8735399319628	-176.800356744307
373750000	-20.2759633296896	-174.366186797311
374500000	-19.9678829486634	-171.585807106694
375250000	-20.3171092295003	-168.793672126783
376000000	-20.1995516181707	-167.938832835859
376750000	-20.1787503325508	-167.048495291031
377500000	-20.1502610622752	-166.776058059915
378250000	-20.5348685463092	-168.79168964688
379000000	-21.6230435673711	-172.11157323088
379750000	-21.8776979399746	-168.298446630333
380500000	-22.3353354012441	-169.539880637344
381250000	-22.5272332369179	-169.814411612341
382000000	-22.2349434176047	-167.390294763143
382750000	-21.7476689765775	-168.845082407245
383500000	-21.5652546696541	-170.817151440094
384250000	-21.4333951142816	-170.853682409641
385000000	-21.3638137815032	-168.574355647913
385750000	-21.2141547614163	-168.280466882292
386500000	-21.2557704264046	-169.158792373134
387250000	-21.4884985821892	-165.436800422336
388000000	-21.805508833503	-163.959205268946
388750000	-21.9087643729315	-165.366098265601
389500000	-22.2864210914719	-164.258865667286
390250000	-22.463821799184	-164.897645636267
391000000	-22.2380288798845	-166.54530203012
391750000	-22.1618459824675	-169.374153204036
392500000	-21.883573512726	-171.809704622413
393250000	-21.7257236033563	-173.698912268938

394000000	-21.6075768773872	-176.099341953018
394750000	-21.281047540927	-175.995280073265
395500000	-21.1370793121287	-176.606817937099
396250000	-21.4000612669259	-175.839086714262
397000000	-21.4124925259524	-172.861709392275
397750000	-21.3904777945325	-174.148941646173
398500000	-21.7798372821471	-175.079600544135
399250000	-22.1570217100105	-177.456463489419
400000000	-22.7448595512912	-177.749085129823
400750000	-22.7808434057344	-179.435522795379
401500000	-23.2425736013905	179.315117614155
402250000	-23.0764181426322	178.119664001853
403000000	-23.6126538730013	174.586549727626
403750000	-22.7068164960423	176.180202571079
404500000	-22.3076869793107	170.888101035908
405250000	-22.4054218734764	171.049993111121
406000000	-22.6050660591285	170.848149705591
406750000	-22.4753439088211	173.721310899831
407500000	-22.8743621166633	173.930557159044
408250000	-23.1479312751746	178.928367607299
409000000	-23.5129431312911	-178.768680369605
409750000	-23.36864884017	-177.558986087371
410500000	-23.5263564714792	177.747296612708
411250000	-24.1408878735524	174.924169358607
412000000	-24.2163765646488	168.618260518167
412750000	-24.5820109725229	165.493808871808
413500000	-24.7693449150691	166.253645396738
414250000	-24.2060480155043	165.18615571481
415000000	-23.6897187378725	162.93214153887
415750000	-23.6042666679018	163.838241594379
416500000	-23.3680284278318	166.232716127603
417250000	-22.9995848044523	165.407613500641
418000000	-23.1723830976577	166.541602149268
418750000	-23.2887881811971	170.063607812127

4195000000	-23.6383044211529	165.977001640365
4202500000	-23.9823435459443	167.016653324064
4210000000	-24.1041485662068	163.279526319928
4217500000	-25.174941258418	157.086437190535
4225000000	-25.4860214897978	155.541425223799
4232500000	-25.342627291712	154.197458753725
4240000000	-25.1246945912782	152.542250628061
4247500000	-24.0924359832473	150.041792715815
4255000000	-23.9383783612009	149.26863809294
4262500000	-23.5805203358771	144.482632873053
4270000000	-23.6641075639673	143.138519876709
4277500000	-24.4240051691761	141.191825004408
4285000000	-25.4962163679899	143.759069915308
4292500000	-25.8308412673231	147.249704245398
4300000000	-26.9765400453119	146.780896321482
4307500000	-27.1103274785471	145.142212177725
4315000000	-27.4479578333653	143.175272780545
4322500000	-27.3524240138195	137.058173032827
4330000000	-27.7251562731267	130.363232010776
4337500000	-28.1358344689334	125.862129736432
4345000000	-29.0295264755917	124.083240546868
4352500000	-28.9059633379749	124.73452240374
4360000000	-28.9360359617848	123.260291652882
4367500000	-29.2228375780298	130.705429557635
4375000000	-28.5259757858959	138.778441431617
4382500000	-29.3396968594597	136.369838334449
4390000000	-30.7611878673083	139.939929567567
4397500000	-31.5746240820009	142.146416728363
4405000000	-32.3258358255617	150.48146572339
4412500000	-33.374546010549	153.257149054545
4420000000	-35.3959788539262	154.250654382977
4427500000	-34.1381509565121	157.985643606419
4435000000	-34.0112231991965	139.486642130366
4442500000	-33.7835047267433	135.998652773086

445000000	-33.6810163679499	128.244601384941
445750000	-32.3745672708466	134.090383323994
446500000	-32.9150973921501	133.466428434495
447250000	-33.0432668719685	143.668160737669
448000000	-33.4103787140052	147.738368226468
448750000	-33.479880549879	159.449914808368
449500000	-32.5220776243836	170.420059806683
450250000	-32.4619496769583	-176.843263899833
451000000	-31.2553563720327	-173.803549935791
451750000	-31.3632488880083	-179.582988164589
452500000	-33.8460588827308	174.65350933376
453250000	-34.9515552828347	170.356067202093
454000000	-38.2327149127546	160.879766373149
454750000	-38.7921447343426	-175.842644089248
455500000	-36.5058032030047	-173.132683242489
456250000	-35.1963694792731	-162.477274270229
457000000	-30.8580328705812	-173.16917903196
457750000	-29.9261432894255	177.404924278792
458500000	-29.5421404459788	174.80645980748
459250000	-29.4910033298248	-179.17310015341
460000000	-28.877615468779	-177.256711654317
460750000	-29.295625912758	-174.683108912797
461500000	-29.5662227611753	-170.373192220223
462250000	-28.8419273844319	-159.340608210215
463000000	-28.2615671771651	-162.510409402323
463750000	-28.2216619771928	-168.221114841717
464500000	-28.1006435127417	-173.33538652379
465250000	-28.2261765474146	178.247895588158
466000000	-28.490225194343	170.94280793693
466750000	-28.4196045114335	171.518454714595
467500000	-28.3617516200687	174.270164927871
468250000	-26.88570579405	176.116515141759
469000000	-25.8374113879834	176.33392092072
469750000	-25.0565391986706	177.806179129347

4705000000	-24.0289494284184	176.591456090308
4712500000	-24.3622647097937	170.304800626975
4720000000	-24.8005012318411	173.142593429153
4727500000	-25.1048698481617	173.983031535549
4735000000	-25.3337257968681	175.158566742444
4742500000	-24.7180110090025	174.63808208596
4750000000	-24.5577880616771	170.705165183247
4757500000	-23.7532842955884	166.068594013337
4765000000	-23.3878695683875	159.183390103269
4772500000	-23.1503191303325	155.925024124616
4780000000	-22.475764643399	155.436463050374
4787500000	-22.0935658981518	152.006248776968
4795000000	-22.052427477027	153.940380758484
4802500000	-21.5171330146408	154.745000331744
4810000000	-20.8009431546904	153.668190669679
4817500000	-20.8591849301839	152.775092039211
4825000000	-20.7394445676852	151.466638240646
4832500000	-20.7870236938214	145.961916053943
4840000000	-20.7326416388368	145.516413949245
4847500000	-20.49166901605	142.30042995002
4855000000	-20.2786316524966	138.994950955251
4862500000	-19.9843035609355	135.233196840466
4870000000	-19.8250894586044	133.240458141636
4877500000	-19.2579521392255	130.720980209697
4885000000	-18.9260160736747	128.932628914044
4892500000	-18.5343832234237	127.608224058261
4900000000	-18.109950962262	125.485242397541
4907500000	-17.8527365582407	122.899291755299
4915000000	-17.6555723085743	121.284170251678
4922500000	-17.676593759572	118.778099644674
4930000000	-17.7311290739799	115.46286696073
4937500000	-17.8117349081447	114.006862314475
4945000000	-17.5993812047362	110.951888873513
4952500000	-17.3347900808406	107.181197529845

496000000	-17.3498025128809	104.041212448501
496750000	-16.9835232879626	101.684491315605
497500000	-16.8034592049509	99.9923718875362
498250000	-16.3086872287726	97.464627329376
499000000	-16.1733805745602	94.853140017108
499750000	-16.0323142209614	93.431097129934
500500000	-15.9513877815418	91.041308553214
501250000	-16.0652248330741	90.0917158318481
502000000	-15.8792041356088	87.1300689295908
502750000	-15.7647370949005	85.3869665720491
503500000	-15.7066153101689	83.7908255701951
504250000	-15.5580149338506	80.6852278611529
505000000	-15.4765848827533	77.1814358906247
505750000	-15.2491443403133	74.5536944349172
506500000	-14.9994994519373	71.5106618890736
507250000	-14.9808093236084	69.2309564857377
508000000	-14.7246684966725	68.2035728145053
508750000	-14.5384684951674	66.2646894236487
509500000	-14.4860873911231	66.0788645555877
510250000	-14.2457882224341	64.4141282932492
511000000	-14.2221848916283	62.5177919790002
511750000	-14.1836266103888	60.1254241383749
512500000	-14.1786245393389	57.6468795647623
513250000	-14.2185295418121	55.7954785142535
514000000	-14.2060255843631	54.4964919020327
514750000	-13.9526997902352	51.8732718626989
515500000	-13.8442428315853	50.0350393211514
516250000	-13.6283029260874	48.973581501338
517000000	-13.4656015260356	46.7681525195042
517750000	-13.2706232859264	45.9189102418607
518500000	-13.0621312876702	44.1479855410319
519250000	-13.0210605354099	43.5717276699043
520000000	-12.910617532492	43.0357249197479
520750000	-12.5855682976039	41.5837878317907

521500000	-12.4593868809608	39.8543654022931
522250000	-12.3431951825235	39.7909258281922
523000000	-12.15235653712	37.5031967112383
523750000	-11.973606820418	35.4936225885284
524500000	-11.6094176884267	33.4708373423855
525250000	-11.5003274080651	31.6002659533098
526000000	-11.2243648057304	29.8279332109624
526750000	-10.8343669063641	28.7496608346137
527500000	-10.552100888036	26.7134644941499
528250000	-10.2550682703209	25.4630027525475
529000000	-9.9623118987189	23.7305689129778
529750000	-9.73551434370853	21.8906624583651
530500000	-9.53227701272386	20.2143747781847
531250000	-9.3536247466293	18.3550429694606
532000000	-9.07522630870086	16.7959573125217
532750000	-8.82859660701002	14.2447042502211
533500000	-8.61371679257914	11.2297118013397
534250000	-8.35949461753487	9.0346570792672
535000000	-8.09042239259771	6.38055758993081
535750000	-7.87922795317596	3.34478908494563
536500000	-7.6353998925337	1.16464260967343
537250000	-7.26092389177723	-1.53256875985137
538000000	-7.07883160129225	-3.51971271862758
538750000	-6.85568601416854	-6.2779373774499
539500000	-6.66068457250626	-8.65073243279607
540250000	-6.40350800139317	-11.3101493690307
541000000	-6.32118454075465	-13.83779663604
541750000	-6.19505006000564	-16.6574525275649
542500000	-6.03848287293656	-19.7127911830327
543250000	-5.92425172856479	-22.7060376919916
544000000	-5.79248759284483	-25.6721844137584
544750000	-5.67974412562392	-28.5737615259935
545500000	-5.49456319200736	-31.3543941444542
546250000	-5.36619356408391	-34.7335273239191

547000000	-5.26415268065428	-37.2685007362106
547750000	-5.11040700277705	-39.7952782426463
548500000	-5.09013222538519	-42.544568725719
549250000	-4.97908667606989	-44.8907637542947
550000000	-4.89137377740581	-47.558223696234
550750000	-4.87490864701061	-50.2719679115994
551500000	-4.83496155694452	-53.1089179662296
552250000	-4.78362889141512	-55.6814331401715
553000000	-4.78864125265186	-58.5263599587485
553750000	-4.70258782754524	-61.3454656977478
554500000	-4.65330574690924	-64.1195161762724
555250000	-4.6346252965739	-66.7204859904911
556000000	-4.53672960826648	-69.0800516152187
556750000	-4.49765540303494	-71.7421128825554
557500000	-4.43769796407105	-73.9453030429177
558250000	-4.45690740119819	-75.9778931420702
559000000	-4.43029308743057	-78.6055895235996
559750000	-4.38903844240376	-80.6513600992888
560500000	-4.41557250747275	-82.9887957463923
561250000	-4.4234663056706	-85.4539281813507
562000000	-4.42555156991686	-88.0232338136838
562750000	-4.4280379009314	-90.798293813512
563500000	-4.40839323551048	-93.0632041744724
564250000	-4.36126084101075	-95.2678387406687
565000000	-4.37194925199883	-97.3859240093381
565750000	-4.34430800071163	-99.9890031726867
566500000	-4.31537082328854	-101.796273965498
567250000	-4.38308387741311	-103.972357648428
568000000	-4.3127346100572	-106.096937099084
568750000	-4.3055122678054	-107.930673143522
569500000	-4.31323153654351	-110.18634930207
570250000	-4.35095953288479	-112.25527962108
571000000	-4.34801684655936	-114.531506246091
571750000	-4.32598741821527	-116.881881654894

572500000	-4.34270694649429	-119.410587787966
573250000	-4.37974761258758	-121.260713408291
574000000	-4.3433541980361	-123.583464279514
574750000	-4.3033357872236	-125.699936278926
575500000	-4.28725662448942	-127.871771768306
576250000	-4.28805223260559	-129.567944143207
577000000	-4.26920613291122	-131.419004827543
577750000	-4.22233548567315	-133.541095706846
578500000	-4.26010486116867	-135.686457645934
579250000	-4.23101859625412	-137.468948158017
580000000	-4.27003076451577	-139.679473527776
580750000	-4.26306362807729	-141.988696945399
581500000	-4.27694329518102	-143.906205343017
582250000	-4.25103797498327	-146.262209254941
583000000	-4.21094149105291	-148.556426204412
583750000	-4.183863083401	-150.463477716311
584500000	-4.16788580141649	-152.579565247325
585250000	-4.12606350308137	-154.843673505028
586000000	-4.09939667876556	-156.614613083037
586750000	-4.02400457334356	-158.565489875006
587500000	-4.02023712075591	-160.671534851608
588250000	-4.05648910015879	-162.560269644736
589000000	-3.96906961766792	-164.629292389005
589750000	-3.97329014707067	-166.709020069276
590500000	-3.94157398732748	-169.004160930896
591250000	-3.91121597525477	-171.317743200654
592000000	-3.88952687990434	-173.423853429971
592750000	-3.84119560846276	-175.947057803213
593500000	-3.78825553987363	-178.28911273266
594250000	-3.75084246798195	179.827636725635
595000000	-3.67971470436081	177.058171795731
595750000	-3.62414754500506	175.234241741127
596500000	-3.55923551113762	172.82936042268
597250000	-3.5382795637087	170.313027744801

598000000	-3.5149330007294	167.964042091373
598750000	-3.50535405764374	165.734733419604
599500000	-3.50777081173017	163.136968306933
600250000	-3.48506158827298	160.469663132656
601000000	-3.45749260130445	158.064049879768
601750000	-3.44370472382497	155.437848718774
602500000	-3.40734382431512	152.731675798656
603250000	-3.38616543037733	150.235882249767
604000000	-3.35881297955736	147.493036847449
604750000	-3.32733903556285	145.356945307477
605500000	-3.332843168547	143.079426337513
606250000	-3.29736989333374	140.189619420872
607000000	-3.31340896056159	137.96859132559
607750000	-3.30136559363953	135.613527520664
608500000	-3.32117303714277	133.084436573255
609250000	-3.3105924525999	130.488608597438
610000000	-3.33683696515816	127.878151064888
610750000	-3.33773786142812	125.303524827234
611500000	-3.35219945092049	122.459843495355
612250000	-3.34802357102083	119.794361297646
613000000	-3.33739268018013	117.202588331533
613750000	-3.30554222588849	114.597496561867
614500000	-3.30419775541968	112.395738275438
615250000	-3.31687209855819	109.992048385176
616000000	-3.28815545600312	107.572720105765
616750000	-3.3389034813467	105.120758079516
617500000	-3.32142914922065	102.585908468837
618250000	-3.32716140147552	99.998447140046
619000000	-3.39515341275141	97.633362604156
619750000	-3.39789264692802	95.0382850703525
620500000	-3.43418373895801	92.2348716907393
621250000	-3.42810612204769	89.3224008799801
622000000	-3.42399678615862	86.9248209969433
622750000	-3.43124989691454	84.3160667759529

623500000	-3.39994727137497	81.8001523572698
624250000	-3.39712575023449	79.6613260722359
625000000	-3.3896061845078	77.301792488512
625750000	-3.4169381657843	75.0320037183689
626500000	-3.42531331779724	72.6469359548394
627250000	-3.47543860088976	70.1005216787164
628000000	-3.52652909927858	67.8278459967505
628750000	-3.51974536268659	65.4357391059387
629500000	-3.57194090200853	62.8514358861016
630250000	-3.62058519921824	60.2853088121635
631000000	-3.59239307383252	57.5489533856699
631750000	-3.60041547642687	54.9877908703825
632500000	-3.58831499403849	52.7071798731615
633250000	-3.58109318018668	50.5064750236453
634000000	-3.56099393170839	48.0831194298742
634750000	-3.59472164471586	45.8501931773799
635500000	-3.60625755332251	43.9548811635745
636250000	-3.60261694335648	41.8705484919119
637000000	-3.64765615110668	39.6635592461072
637750000	-3.66823574821134	37.459025079958
638500000	-3.71869229687283	34.8980272672744
639250000	-3.73718430032647	32.8553956325943
640000000	-3.75158947684016	30.395957937917
640750000	-3.73682171523026	28.0872232645004
641500000	-3.76087732629025	25.8996192678917
642250000	-3.71151941976515	23.5326464790025
643000000	-3.69916226700084	21.4824627521211
643750000	-3.68028003293255	19.3933914816903
644500000	-3.66840393740877	17.550830657156
645250000	-3.67558556610921	15.645111983251
646000000	-3.66807958062154	13.5562446049891
646750000	-3.70769056411654	11.7500820448278
647500000	-3.72435825240661	9.61887845573059
648250000	-3.71285339608162	7.39703427141395

649000000	-3.71467591569862	5.17108292236604
649750000	-3.71453260818007	2.73582272825969
650500000	-3.68513758592502	0.624140046487766
651250000	-3.67610258674885	-1.46222440384396
652000000	-3.60171352474263	-3.6449873563064
652750000	-3.6265857320071	-5.65224041010556
653500000	-3.5486667564127	-7.55695799375016
654250000	-3.53558919137606	-9.68336987788252
655000000	-3.53359543430267	-11.5045911749293
655750000	-3.51934092411972	-13.4781221183399
656500000	-3.51684442571674	-15.2530805786949
657250000	-3.53884673027057	-17.2884382471591
658000000	-3.54078311300378	-19.2405522616913
658750000	-3.55338310819272	-21.4845997837343
659500000	-3.53449592846803	-23.7187451821395
660250000	-3.5272049464678	-25.6649660258956
661000000	-3.53240137696188	-27.842058117004
661750000	-3.51664449560064	-29.9814440879691
662500000	-3.49639771069807	-31.8512519146937
663250000	-3.47641669569358	-33.9475456268924
664000000	-3.46515750298713	-35.6364861035128
664750000	-3.44482742743413	-37.3231039286731
665500000	-3.42012508262299	-39.2584396077857
666250000	-3.46282769193623	-41.132331457731
667000000	-3.4464567345161	-42.9499717972318
667750000	-3.44761925408558	-44.8829105712459
668500000	-3.41802272850623	-46.8273845079484
669250000	-3.44092562476137	-48.9514996864203
670000000	-3.40848469009897	-50.9477889163615
670750000	-3.38271948882214	-52.828390426041
671500000	-3.39795296999901	-54.876925129512
672250000	-3.32359625476013	-56.6575785360223
673000000	-3.30178936620195	-58.5179969325873
673750000	-3.32657837889554	-60.0971710582238

674500000	-3.26167977353329	-61.8417071011196
675250000	-3.25313648277544	-63.396764473772
676000000	-3.28519767515749	-65.5781505832516
676750000	-3.26736952727521	-67.0970288779173
677500000	-3.31170861400535	-69.0573209510924
678250000	-3.30111721232952	-70.9009332799468
679000000	-3.29139848030422	-72.9391038163869
679750000	-3.28992458380206	-74.8294429397109
680500000	-3.28183930685739	-76.9108216174018
681250000	-3.28449773810498	-78.6291744721996
682000000	-3.26610428551365	-80.4744142086109
682750000	-3.25570432731691	-82.2650925477573
683500000	-3.2482560763322	-83.8632764666148
684250000	-3.27733740337605	-85.7038695541764
685000000	-3.28124337146348	-87.1290337253223
685750000	-3.31568519442232	-88.7683272521441
686500000	-3.30122908063267	-90.6103784989145
687250000	-3.31285052557943	-92.5055824483305
688000000	-3.35697045161287	-94.2739461850609
688750000	-3.36459453767841	-96.1335872596883
689500000	-3.36715345999784	-97.9592311864992
690250000	-3.34810245168789	-99.8632601331545
691000000	-3.36861231395987	-101.879961412096
691750000	-3.3371268234562	-103.358180839873
692500000	-3.31928619318092	-105.091440273377
693250000	-3.33188089103114	-106.531459353281
694000000	-3.33406009508968	-108.228606012684
694750000	-3.40446605865364	-109.836636291798
695500000	-3.38562437269209	-111.436092959097
696250000	-3.42255064153594	-113.1541415817
697000000	-3.39275679250823	-114.876522743892
697750000	-3.44772350711084	-116.852601357809
698500000	-3.45515481716633	-118.66512956011
699250000	-3.45420533249489	-120.518051414374

7000000000 -3.43343645007984 -122.174739988435