

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA EN FRECUENCIA DE
MICROONDAS PARA LA PROYECCIÓN DE UN RADIOENLACE ENTRE LA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA Y LA UNIVERSIDAD DE LOS
ANDES**

ELKIN ANDRES LADINO ORDOÑEZ
BRAYAN HUMBERTO PARRA ORTEGA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
ALTERNATIVA TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2018

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA EN FRECUENCIA DE
MICROONDAS PARA LA PROYECCIÓN DE UN RADIOENLACE ENTRE LA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA Y LA UNIVERSIDAD DE LOS
ANDES**

**ELKIN ANDRES LADINO ORDOÑEZ
BRAYAN HUMBERTO PARRA ORTEGA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO Y DE TELECOMUNICACIONES**

Director:

ING. JUAN FERNANDO CORONEL RICO, PhD

Codirector:

**ING. JOHANN FACCELO OSMA CRUZ, PhD
Profesor Asociado Universidad de los Andes**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
ALTERNATIVA TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2018**



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Mayo de 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer al ingeniero Juan Fernando Coronel, director de la tesis, por la confianza depositada en nosotros para el desarrollo de este proyecto; su conocimiento y gran experiencia permitieron culminar con éxito este trabajo.

Especial agradecimiento al profesor Johann Osma, profesor asociado a la Universidad de los Andes, que con gran interés y disposición realizó el acompañamiento y orientación de este trabajo de grado, muchas gracias por permitirnos desarrollar este proyecto en compañía de su grupo de investigación. A los compañeros del Proyecto Uniandino Aeroespacial por su colaboración permanente en este proyecto y poner a nuestra disposición su conocimiento, tiempo y recursos.

Agradecemos a nuestras familias y su incondicional apoyo en los buenos y malos momentos, la perseverancia inculcada y las palabras de ánimo y aliento fueron un pilar fundamental durante estos años de carrera, gracias por estar siempre ahí.

A la Universidad Católica de Colombia, donde afortunadamente hemos podido culminar la carrera de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones, ha sido un privilegio contar con los diferentes docentes que nos acompañaron durante estos años, gracias por su tiempo, esfuerzo y dedicación.

CONTENIDO

GLOSARIO	13
RESUMEN.....	16
FICHA TECNICA	18
1. GENERALIDADES.....	19
1.1. INTRODUCCION	19
1.2. ANTECEDENTES	20
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
1.4. OBJETIVOS	27
1.4.1. Objetivo general.....	27
1.4.2. Objetivos específicos.....	27
1.5. JUSTIFICACIÓN	28
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	28
1.7. MARCO REFERENCIAL.....	29
1.7.1. MARCO TEORICO	29
1.7.2. MARCO CONCEPTUAL.....	37
1.7.3. MARCO LEGAL.....	58
1.8. METODOLOGÍA.....	59
1.8.1. Diseño metodológico:	60
1.8.2. Impacto y resultados esperados	61
2. DESARROLLO.....	62
2.1. Radioenlace, parte 1: Definición de segmento de cobertura.....	62
2.2. Análisis y elección de frecuencia:.....	65
2.2.1. Diseño de antena:.....	72
2.2.2. Investigación, documentación y elección de la antena:	72
2.2.3. Investigación, documentación y diseño de antena:	74
2.2.4. Modelado de diseño propuestos en literatura:	87
2.2.5. Propuesta de diseño y optimización paramétrica:	95
2.2.6. Fabricación y caracterización:	130
2.2.7. Radioenlace, parte 2: Perfil del radioenlace:	136
2.2.8. Simulación del radioenlace:	148
2.2.9. Análisis de resultados:.....	150

3. Descripción económica del proyecto:.....	154
3.1. Materiales.....	154
3.2. Costos.....	155
4. Recomendaciones y trabajos futuros	156
Conclusiones	158
Bibliografía.....	160
ANEXOS.....	165

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Interfaz gráfica de 4NEC2, con patrón de radiación de antena Yagi.	21
Figura 2. Coeficiente de reflexión para diferentes antenas monopolo triangular. ..	22
Figura 3. Conjunto de resultados para un anillo con radio de 3cm.	25
Figura 4. Patrón de radiación.....	33
Figura 5. Esquema y circuito Thévenin de una antena en modo de transmisión. ...	35
Figura 6. Antena dipolo.	37
Figura 7. Antena de cuerno piramidal	38
Figura 8. Antena de cuerno cónico	38
Figura 9. Antena parabólica con alimentación frontal	38
Figura 10. Antena Parabólica con alimentación Cassegrain.....	39
Figura 11. Antena microstrip rectangular	39
Figura 12. Antena microstrip circular	40
Figura 13. Antena Yagi-Uda	41
Figura 14. Concepto de refracción.....	42
Figura 15. Reflexión en terreno.....	43
Figura 16. Factor K.	44
Figura 17. Zona de fresnel.....	45
Figura 18. Atenuación atmosférica específica para un trayecto próximo a la tierra	48
Figura 19. Analizador de redes	50
Figura 20. Cámara anecoica Universidad de los Andes.	51
Figura 21. Interfaz gráfica HFSS.....	52
Figura 22. Acoplamiento por stub.	53
Figura 23. Acoplamiento por transformador de lambda cuartos.	54
Figura 24. Acoplamiento por T-match.....	55
Figura 25. Circuito equivalente de T-match	55
Figura 26. Mejoras a la configuración de T-match.....	55
Figura 27. Acoplamiento por Gamma match.	56
Figura 28. Acoplamiento por Balun $\lambda/4$	57
Figura 29. Acoplamiento por Balun $\lambda/4$	57
Figura 30. Acoplamiento por Balun Bazooka.....	58
Figura 31. Metodología del proyecto.....	59
Figura 32. Ubicación Edificio sede 4, Universidad Católica de Colombia.	62
Figura 33. Ubicación Edificio Julio Mario Santo Domingo. Universidad de los Andes.	63
Figura 34. Ubicación de terminales, Radio Mobile.....	64
Figura 35. Perfil geográfico del radioenlace.....	65
Figura 36. Antena Yagi.	73
Figura 37. Principio de funcionamiento de una antena parabólica.....	73
Figura 38. Fase de corriente en dipolo parasito relativo al dipolo conductor.	75
Figura 39. Diseño básico con un director, Milligan.....	76
Figura 40. Configuración Antena Yagi-Uda.	81

Figura 41. Curvas de diseño para determinar la longitud de los elementos en una antena Yagi.....	85
Figura 42. Efectos del espaciamiento entre reflector y elemento radiante sobre la ganancia.	86
Figura 43. Ganancia de una Yagi como función de espaciamientos constantes y longitud de 0.382λ	86
Figura 44. Curvas de optimización, incremento de los elementos dependiendo del diámetro del boom.	87
Figura 45. Reflector, boom y directores en HFSS.....	90
Figura 46. Dipolo del modelo en HFSS.....	90
Figura 47. Antena Yagi completa modelo en HFSS.....	91
Figura 48. Parámetro S_{11} , antena Yagi modelada.	92
Figura 49. VSWR, antena Yagi modelada.	92
Figura 50. Carta de Smith, antena Yagi modelada.	93
Figura 51. Ganancia total, antena Yagi modelo.	93
Figura 52. Directividad total, antena Yagi modelo.....	94
Figura 53. Patrón de radiación, antena Yagi modelo.	94
Figura 54. Ventana de control de variables.	95
Figura 55. Menú para optimización paramétrica en Ansys HFSS ®.	96
Figura 56. Ventana de ingreso de datos para parametrización.....	96
Figura 57. Ejemplo de parametrización con gap y longitud del dipolo.	97
Figura 58. Variables a optimizar en HFSS, mediante algoritmo genético.	98
Figura 59. Ventana de modificación de opciones para el algoritmo genético.	98
Figura 60. Dipolo $\lambda/2$, sin ajustes.	100
Figura 61. Variaciones paramétricas para el dipolo.	100
Figura 62. Resultados parametrización primer dipolo.....	101
Figura 63. Segunda parametrización dipolo convencional.....	102
Figura 64. Dipolo convencional optimizado.	103
Figura 65. Ganancia primer dipolo.....	103
Figura 66. Dipolo doblado, longitud inicial y separación de 0.02λ	104
Figura 67. S_{11} dipolo doblado inicial.	104
Figura 68. Parámetros S_{11} , optimización por algoritmo genético de dipolo doblado.	106
Figura 69. Modelo de dipolo doblado Final.	107
Figura 70. Ganancia dipolo doblado Final.	107
Figura 71. Valores de diseño en Matlab	109
Figura 72. Ajuste de curvas polinomial.	110
Figura 73. Grafica ajustada hasta 0.1λ	111
Figura 74. Grafica de diseño de directores, punto de diseño.....	112
Figura 75. Valor ajustado para el reflector y grafica linealizada.....	113
Figura 76. Ajuste de la longitud de directores en función del diámetro del boom.	115
Figura 77. Modelo propuesto bajo diseño de Viezbicke en Ansys HFSS.	116

Figura 78. Perspectiva del diseño de antena Yagi con dipolo doblado, frecuencia de 5.8GHz.....	117
Figura 79. Parámetro S_{11} antena Yagi propuesta sin optimización.....	117
Figura 80. Parámetros S_{11} , antena Yagi optimizada.....	118
Figura 81. Ganancia antena Yagi optimizada.....	119
Figura 82. Directividad antena Yagi optimizada.....	119
Figura 83. Patrón de radiación antena Yagi optimizada.....	120
Figura 84. Carta de Smith, antena Yagi optimizada.....	120
Figura 85. Parábola en HFSS para el plato de 30cm.....	123
Figura 86. Paraboloide de 30cm.....	123
Figura 87. Plato de 20cm.....	124
Figura 88. Antena final, Yagi con plato de 30cm.....	124
Figura 89. Antena final, Yagi con plato de 20cm.....	125
Figura 90. Parámetro S_{11} , antena Yagi final con plato de 30cm.....	125
Figura 91. Ganancia antena Yagi final, con plato de 30cm.....	126
Figura 92. Carta de Smith, Antena final con plato de 30cm.....	127
Figura 93. Parámetro S_{11} , antena Yagi final con plato de 20cm.....	128
Figura 94. Ganancia antena Yagi final, con plato de 20cm.....	128
Figura 95. Carta de Smith, Antena final con plato de 20cm.....	129
Figura 96. Dipolos fabricados de acuerdo a diseño propuesto.....	130
Figura 97. Analizador de redes (ROHDE&SCHARZ FSH8), propiedad Universidad Católica de Colombia.....	131
Figura 98. Kit de calibración incluido.....	131
Figura 99. Analizador de redes no calibrado.....	131
Figura 100. Analizador de redes calibrado.....	132
Figura 101. Parámetros S_{11} , Dipolos fabricados vs dipolo simulado.....	133
Figura 102. Booms fabricados para la implementación del proyecto.....	134
Figura 103. Directores recortados frente al material original.....	134
Figura 104. Platos parabólicos fabricados.....	135
Figura 105. Estructuras y bases para las antenas.....	135
Figura 106. Vista horizontal para ángulo de elevación de antena.....	138
Figura 107. Pérdidas por dispersión a diferentes distancias.....	140
Figura 108. Nueva zona de Fresnel, aumentando la altura de las antenas.....	142
Figura 109. Intensidad de lluvia [mm/h] de acuerdo con la recomendación P.837-1.....	145
Figura 110. Interfaz de Radio Mobile, con valores ingresados.....	148
Figura 111. Zona de Fresnel y viabilidad del radioenlace.....	149
Figura 112. Pérdidas para propagación calculadas por Radio Mobile.....	149
Figura 113. Actuación del radioenlace, valores calculados según radio Mobile.....	149
Figura 114. Simulación en línea con software de Ubiquiti.....	150
Figura 115. Materiales de fabricación de la antena.....	154

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Versión de aplicación generalizada de las ecuaciones de Maxwell.	36
Tabla 2. Resumen de características de ubicaciones de las terminales.....	64
Tabla 3. Bandas de Frecuencia, enlaces fijos punto a punto.....	67
Tabla 4. Fragmento de tabla de bandas libres: Excepciones a los límites generales.	69
Tabla 5. Dimensiones antena Yagi con cuatro directores.....	76
Tabla 6. Dimensiones antena Yagi con trece directores.....	77
Tabla 7. Cambios en la longitud de los directores en una antena Yagi, para varios diametros.	77
Tabla 8. Cambios en la longitud del reflector en una antena Yagi, para varios diametros.	78
Tabla 9. Cambios en la longitud del Boom en una antena Yagi, para varios diametros.	78
Tabla 10. Dimensiones antena Yagi, Cardama.....	79
Tabla 11. Optimización de directividad para antena Yagi de seis elementos, varía espaciamento.....	82
Tabla 12. Optimización de directividad para antena Yagi de seis elementos, varía longitud.	82
Tabla 13. Optimización de directividad variando todos los elementos.....	82
Tabla 14. Longitud de elementos para antenas Yagi-Uda de seis longitudes diferentes.	84
Tabla 15. Longitudes de directores no compensados, Yagi modelada a 5.8GHz..	88
Tabla 16. Longitudes de directores medidos a partir del punto de corte, Yagi modelada a 5.8GHz	89
Tabla 17. Longitudes finales, Yagi modelada a 5.8GHz	89
Tabla 18. Resumen de medidas dipolo doblado final.	108
Tabla 19. Longitudes de directores no compensados, Yagi modelada a 5.8GHz, modelo propuesto	108
Tabla 20. Longitudes de directores medidos a partir del punto de corte, Yagi propuesta a 5.8GHz.....	114
Tabla 21. Longitudes finales, Yagi modelada a 5.8GHz	116
Tabla 22. Longitudes finales, antena Yagi propuesta y optimizada	121
Tabla 23. Resumen de características del diseño de platos.....	122
Tabla 24. Resumen de características, equipos de radio sugeridos.....	137
Tabla 25. Perdidas de trayectoria en el espacio libre para diversas distancias a una frecuencia de 5.8GHz.	140
Tabla 26. Coeficientes de polarización a diversas frecuencias.....	144
Tabla 27. Intensidad de la lluvia excedida (mm/h).....	146
Tabla 28. Resumen de características para el radioenlace, puntos para la simulación.....	147
Tabla 29. Lista de precios del proyecto en COP.....	155

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Proceso de fabricación, perforación de booms.	165
Anexo B. Boom en fresadora.	166
Anexo C. Directores cortados para pruebas.	167
Anexo D. Medidas de corte para directores.	168
Anexo E. Prueba realizada para dipolo con perforación.	169
Anexo F. Ajustes mecánicos para el dipolo en antena Final.	170
Anexo G. Diagrama de algoritmo genético.	171
Anexo H. Método utilizado para fabricar dipolos.	172

GLOSARIO

ANE: Agencia Nacional del Espectro.

Ancho del haz: separación angular entre los puntos en los cuales el diagrama de radiación ha disminuido un 50% (3dB) en relación a su máximo valor.

Antena: un medio para radiar y/o recibir ondas de radio.

Antena dipolo: antena formada por dos conductores de medida no mayor a media longitud de onda.

Antena isotrópica: antena que cuenta con un patrón de radiación esférico perfecto y ganancia lineal unitaria.

Balun: dispositivo encargado de balancear líneas de transmisión.

Banda: margen de frecuencias entre dos límites definidos.

Decibel (dB): es la unidad de medida utilizada para expresar la relación de dos valores de potencia eléctrica, igual a diez veces el logaritmo del cociente de los dos niveles.

dBi: decibelios respecto a una antena isotrópica.

dBm: decibelios respecto a un mili-watio.

Diagrama de radiación: representación gráfica de las características de radiación de una antena en función de las coordenadas de azimut y elevación.

Dipolo doblado: elemento activo de una antena que ofrece mayor ancho de banda y cuatro veces la impedancia de un dipolo abierto.

Directividad: es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección específica.

EHF: extremadamente alta frecuencia.

FEM: Fuerza Electromotriz o voltaje inducido.

Ganancia de la antena: relación entre la potencia irradiada en la dirección indicada y la que irradiaría una antena isotrópica alimentada, bajo la misma alimentación.

Guía de onda: tubo metálico utilizado para la transmisión de ondas electromagnéticas.

HF (High Frequency): Alta frecuencia.

Interfaz: punto físico de limitación entre dos dispositivos donde se definen las señales eléctricas, conectores y protocolos.

Impedancia: relación entre un voltaje y una corriente existentes en un punto dado de una línea de transmisión o una antena.

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones.

LF (Low Frequency): Baja frecuencia.

Línea de transmisión: un medio físico mediante el cual se transporta la energía de radiofrecuencia desde un punto a otro.

Lóbulo de radiación: es el margen angular referente a la dirección de radiación.

Longitud de onda: distancia entre dos puntos sucesivos situados en la misma fase de un movimiento ondulatorio.

MF: frecuencia media.

OEM: onda electromagnética.

Onda estacionaria: es el resultado de la superposición de dos movimientos ondulatorios armónicos de igual amplitud y frecuencia que se propagan en sentidos opuestos.

Patrón de radiación: Grafico de la intensidad de la radiación emitida o recibida por una antena (en dB) en función del ángulo respecto al eje de la antena.

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, indica la potencia radiada por una antena sobre una superficie concreta. Depende de la potencia entregada a la antena y la ganancia de la misma.

Polarización: es la orientación de las ondas electromagnéticas al salir de la antena.

Relación delante/atrás: cociente existente entre la máxima potencia radiada en una dirección y la potencia radiada en el sentido opuesto.

Relación señal a ruido: cociente entre la potencia de la seña recibida y la potencia del ruido presente a la entrada del receptor.

ROE (SWR): Relación de Onda Estacionaria, es el cociente entre valores máximos y mínimos de una amplitud de onda estacionaria.

Selectividad: característica de un receptor que filtra las señales del canal de trabajo de otras señales adyacentes.

SHF(super high frequency): súper alta frecuencia.

UHF(ultra high frequency): ultra alta frecuencia.

VHF(very high frequency): muy alta frecuencia.

VLf(very low frequency): muy baja frecuencia.

RESUMEN

Código	Nombre	Doc. Identidad	Teléfono	E-mail
702002	Brayan Humberto Parra Ortega	1018480059	3212447693	Bhparra02@ucatolica.edu.co
702042	Elkin Andrés Ladino Ordoñez	1032452531	3185201551	Ealadino42@ucatolica.edu.co

En este trabajo de grado se presenta el diseño, simulación y fabricación de una antena Yagi-Uda, en frecuencia de 5.8 GHz para la proyección de un enlace punto a punto entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes.

Para ello se llevaron a cabo los siguientes pasos:

Inicialmente se realizó un estudio cartográfico, en donde se determinaron las potenciales ubicaciones de las antenas, determinando así una distancia aproximada del radioenlace.

Posteriormente se determinó la frecuencia de trabajo, basados en recomendaciones nacionales e internacionales, para radioenlaces punto a punto.

Ya con la frecuencia de trabajo, se determinó el tipo de antena para el enlace.

Luego, basados en diseños propuestos en la literatura, se realizaron varios modelos de antena para luego ser simulados en la herramienta Ansys HFSS®.

A partir de estos modelos, se proponen y realizan ciertas mejoras, revisando la viabilidad de los nuevos diseños simulados, seleccionando el mejor modelo.

Después se realiza la construcción de dos antenas basados en las medidas obtenidas del anterior paso, realizando las respectivas mediciones para verificar el correcto funcionamiento de la antena.

Finalmente, con todos los valores de la antena construida, se termina de realizar el estudio del radioenlace.

Como conclusión, se obtiene una serie de pasos para el desarrollo de un radioenlace punto a punto y una metodología para diseñar, optimizar y simular antenas en el software HFSS.

Palabras clave:

Enlaces punto a punto, optimización y diseño de antenas, frecuencia.

FICHA TECNICA

TITULO:

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA EN FRECUENCIA DE MICROONDAS PARA LA PROYECCIÓN DE UN RADIOENLACE ENTRE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

ALTERNATIVA:

Trabajo de investigación tecnológica.

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

Software inteligente y convergencia tecnológica.

EJE TEMÁTICO:

Gestión y tecnología para la comunicación de las comunidades.

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION

En los últimos años se ha desarrollado el sector de las telecomunicaciones, en donde las redes inalámbricas han adquirido mayor relevancia, gracias a su bajo costo y compatibilidad tecnológica, lo que ha facilitado y mejorado la eficiencia, coordinación y coherencia al momento de transmitir información, lo cual ha permitido la aparición de nuevas aplicaciones que utilizan esta tecnología como soporte.

Cada una de estas aplicaciones tiene distintos requerimientos en cuanto al ancho de banda, uso de frecuencia, velocidad de transmisión, etc. Una de estas son los sistemas de radioenlaces punto a punto en frecuencias de microondas, que se utilizan para transmitir o recibir señales digitales a alta velocidad.

La transmisión inalámbrica entre un transmisor y un receptor está influenciada por varios factores: una línea de transmisión (coaxial o guía de onda) conecta el transmisor o receptor a una antena; una estructura de antena que sostiene la antena a una altura y orientación apropiadas y la antena genera o recibe una señal que se propaga a lo largo de la trayectoria de la onda de radio.

Uno de los componentes principales para el radio enlace, que determina la funcionalidad de este es el tipo de antena; existen gran variedad de antenas cada uno con su diseño detallado. Otras características principales, incluyen la ganancia, el rechazo de interferencias, la altura sobre el suelo de la antena y la carga de la torre, son todos factores a tener en cuenta en la planeación de un radioenlace.

El propósito de una antena es convertir la energía eléctrica generada en el transmisor de un sistema de radio, en un frente de onda electromagnético enfocado e irradiado en la línea de transmisión, y convertir los campos electromagnéticos en voltajes y amperios alternos para la circuitería de recepción. Según Manning, las antenas se comportan exactamente de la misma manera para las rutas de transmisión y recepción.¹

Debido a esto el diseño de antenas resulta ser un factor fundamental para el correcto funcionamiento de cualquier comunicación inalámbrica, ya que de esta depende la ganancia del sistema, el ancho de banda, la directividad, la eficiencia, entre otras características importantes.

¹ MANNING, Trevor. Microwave Radio Transmission Design Guide. 2da Edición. Boston: Artech House, 2009, p. 176.

En el siguiente documento de trabajo de grado, se presenta el diseño de una antena Yagi-Uda en la frecuencia de 5.8GHz para la proyección de un radioenlace punto a punto entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes.

1.2. ANTECEDENTES

Las redes inalámbricas están generando interés en todos los campos de estudio de la ingeniería y conforme se desarrollan los avances tecnológicos en este campo, mas son los estudios realizados en esta área del conocimiento, beneficiando al mercado de tecnologías de la información en general.

Sin embargo, a partir de la búsqueda bibliográfica realizada, en el campo de desarrollo nacional, es poco común encontrar estudios en cuanto a fabricación y caracterización de antenas, o estudios sobre enlaces punto a punto, considerando las dificultades del terreno colombiano, así como los factores climáticos que están siempre presentes.

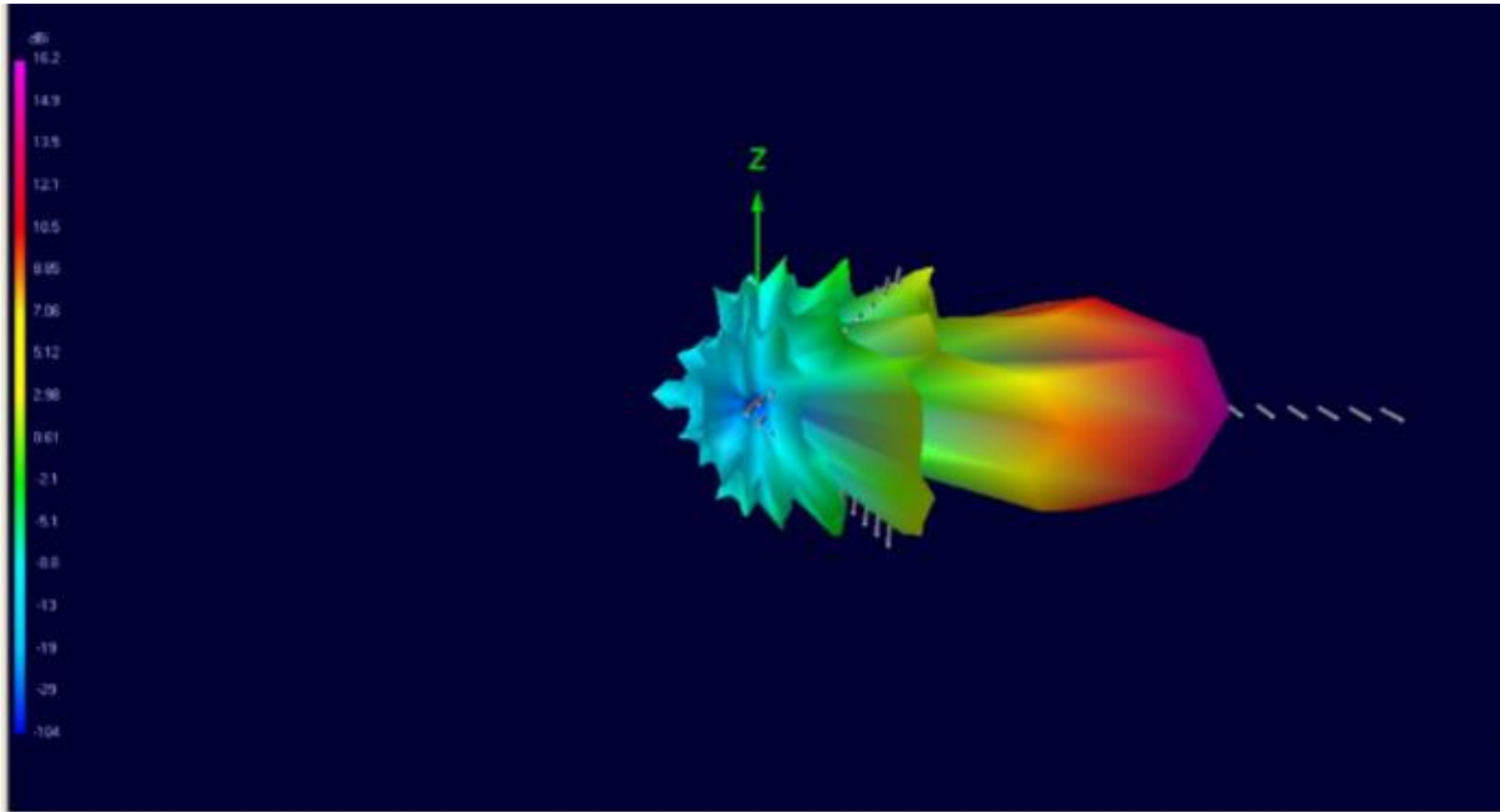
En la universidad Austral de Chile, se realizó el análisis de la implementación de un enlace punto a punto acotado por el protocolo 802.11b². Se da una introducción al protocolo, especificando arquitectura, enlaces y equipamiento, además de su desarrollo y limitaciones dentro de WLAN. Además, resalta el detalle de los procedimientos técnicos utilizados. Así como los detalles del enlace mediante un estudio de link Budget.

En la Corporación Universitaria Minuto de Dios, se realizó el diseño simulación y construcción de una antena para la propagación de señales, en una banda de 2.4GHz³. En el documento de tesis, se exponen las técnicas usadas, mediante la herramienta 4NEC2®, para una antena Yagi, bajo medidas generales de Balanis. Los autores concluyen que se logró el objetivo de obtener 15dB de ganancia reduciendo la distancia entre segmentos. De este documento se rescata la herramienta para crear, ver y optimizar estilos de geometrías de antenas en 2D y 3D, presentando sus respectivos diagramas, no se encontraron diagramas de S₁₁ (Véase Figura 1).

² MUÑOZ, Luis. Analisis de implementación de un enlace punto a punto acotado por el protocolo 802.11b. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ingeniería, Tesis, 2005, p. 9.

³ RIVERA, Roció y GOMEZ, Yenni. Diseño, simulación y construcción de una antena para la propagación de señales a una banda de 2.4GHz. Soacha: Corporación Universitaria Minuto de Dios. Programa de tecnología en informática. Tesis, 2009, p.27.

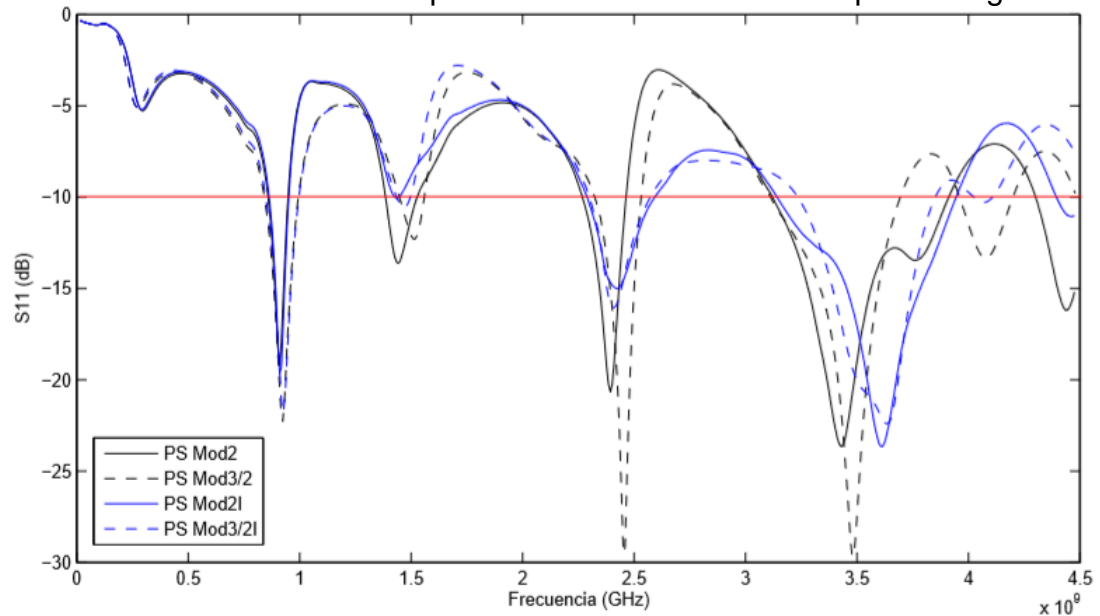
Figura 1. Interfaz gráfica de 4NEC2, con patrón de radiación de antena Yagi.



Fuente: RIVERA, Roció y GOMEZ. Yenni. Diseño, simulación y construcción de una antena para la propagación de señales a una banda de 2.4GHz. Soacha: Corporación Universitaria Minuto de Dios. Programa de tecnología en informática. Tesis, 2009, p.194.

En el ámbito nacional, con información de repositorios abiertos, se encuentra el diseño de una antena multi-banda basada en fractales para redes móviles para frecuencias entre 0.9 a 3.5 GHz⁴. El autor presenta un completo estudio de las propiedades matemáticas en las geometrías empleadas generalmente para el diseño de antenas cada una con su respectivo análisis aplicando métodos numéricos. Con las mejoras numéricas obtenidos y simuladas, se llega a una parametrización que flexibiliza el diseño de las antenas; de este estudio cabe resaltar la manera de realizar un análisis sobre las características de radiación, la influencia de los coeficientes de reflexión en gráficas dB vs frecuencia, el escalamiento que se genera en la ganancia cambiando materiales y medidas de la antena así como graficas de distribución de corriente, ejecutado con la herramienta de simulación *FDTD® (Finite Difference Time Domain)* (véase Figura 2).

Figura 2. Coeficiente de reflexión para diferentes antenas monopolo triangular.



Fuente: RAMIREZ, German. Diseño de una antena multibanda basada en fractales para redes móviles inalámbricas de banda ancha en las frecuencias de 0.9, 2.4 y 3.5 GHz. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2009, p. 85.

Otro estudio de interés, se genera en la Universidad de Málaga en donde se diseñó una red inalámbrica de banda ancha para un entorno rural⁵. En este documento se

⁴ RAMIREZ, German. Diseño de una antena multibanda basada en fractales para redes móviles inalámbricas de banda ancha en las frecuencias de 0.9, 2.4 y 3.5 GHz. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2009, p. 75.

⁵ CASTILLO, Juan. Diseño de una red inalámbrica de banda ancha para un entorno rural. Málaga: Universidad de Málaga. Departamento de electrónica. Tesis, 2008, p. 15.

presentan especificaciones de red dimensionando el sistema mediante conexiones troncales y realizando una planificación de estas, especificando cada enlace punto a punto entre estaciones. Se realiza una descripción de los equipos utilizados para este fin, así como un mapa cartográfico del terreno, el planteamiento de las ubicaciones, el diseño de la red y la realización del proyecto técnico. Entregan una visión de las herramientas de desarrollo y simulación, así como problemas generados a partir del clima, balances de potencia, equipos de radio, la norma ISO IEC 8802.11 para puntos de acceso, entre otros, la herramienta de este estudio es Radio Mobile.

En la Universidad Autónoma de Nuevo León, se realizó un estudio sobre sistemas de propagación y diseño de antenas enfocado a análisis de enlaces de comunicación⁶. En el documento se presentan consideraciones generales sobre ondas electromagnéticas, el espectro de radiofrecuencia, los parámetros de las antenas, tales como análisis matemático, transmisión en el espacio libre, posibles arreglos, radiodifusión y propósitos generales. De este documento destaca el análisis matemático y teórico en cuanto al diseño de antenas se refiere.

En el Instituto Politécnico Nacional de Culhuacán, se diseñó e implementó un sistema de comunicación de una red LAN a otra mediante microondas⁷. Se desarrollan temas de redes, direccionamiento, formas de comunicación y rendimiento, un estudio de *link Budget*, así como resultados de simulaciones y pruebas. De este documento sobresale, la solución presentada para el enlace punto a punto, mediante equipos de radio *WinLink* 1000, que permiten un ancho de banda dedicado y de amplia capacidad. También muestran una relación de las antenas a utilizar, destacando los parámetros de ganancia, ancho de haz y factor de forma. La herramienta *link Planner Radwin*, utilizada para visualizar el desempeño del enlace, en donde se agregan datos sobre el tipo de antenas y la distancia entre los puntos a enlazar.

En la Universidad Autónoma de Madrid, se realizó el diseño de antenas tipo parche para WiMAX⁸. Trata sobre generalidades y conceptos básicos de las antenas tipo parche, manejos de ganancia y distintos parámetros. De este documento se destaca el uso de la herramienta MATLAB® 2016 y CST® (*Computer Simulation Technology*), como ejes de simulación para valores resistivos y de ganancia, así como de diseño de las distintas antenas bajo estudio.

⁶ LOZANO, Antonio. Sistemas de propagación y diseño de antenas enfocado al análisis de enlaces de comunicación. San Nicolas de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Tesis, 2001, p. 125.

⁷ PELAEZ, Antonio y SERRANO, Omar. Diseñar e implementar un sistema de comunicación de una red LAN a otra LAN mediante microondas. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Electrónica. Tesis, 2013, p. 91.

⁸ YU, XueQing. Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip MAX2838. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Telecomunicaciones. Tesis, 2014, p. 15.

En la Universidad Católica de Colombia, se realizó un estudio de cobertura en redes inalámbricas con una caracterización de materiales que atenúan las microondas⁹. En el desarrollo de este documento se observa la creación de distintos obstáculos entre dos antenas, realizando mediciones de todos estos materiales, calculando su pérdida por obstáculo y la aplicación de una herramienta llamada *AirMagnet®*, en donde se visualizan los diagramas de radiación respecto al azimut con su respectiva ganancia.

No solo se realizan estudios respecto a telecomunicaciones, en facultades de electrónica, o sus similares. En la Universidad Nacional de Colombia, en la facultad de Minas de Medellín se realizó un estudio de los retos en la infraestructura de telecomunicaciones para Colombia¹⁰. Se destacan los problemas en los distintos enlaces, enunciando los protocolos de las redes de comunicación, los desafíos a nivel estructural con los *Access Point*, y un factor fundamental que se nombró anteriormente, el problema del clima en las coberturas y como este afecta el crecimiento de las redes de telecomunicación.

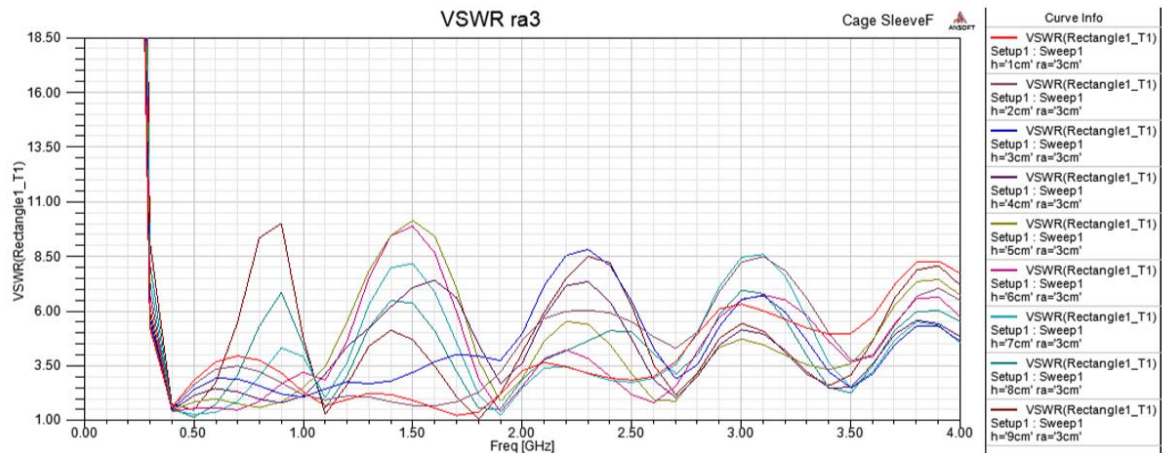
En la Pontificia Universidad Javeriana, se desarrolló una antena helicoidal cuadrífida de banda ancha para uso en instrumentación¹¹. Aplicando la técnica de mangas para modificar el ancho de banda de una antena, logro una mejora en el funcionamiento de la frecuencia de resonancia sin afectar mucho la radiación de la antena. De este trabajo se destaca el uso de la herramienta de simulación *ANSOFT- ANSYS (HFSS) ® (High Frequency Electromagnetic Field Simulation)*, siendo implementado para la simulación de estas técnicas, así como en el diseño de la antena, en la figura 3 se muestran los resultados obtenidos.

⁹ GONZALEZ, Francisco. Estudio de cobertura en redes inalámbricas y caracterización de materiales que atenúan las microondas. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 12.

¹⁰ UPARELA, Clara. Retos en la infraestructura de telecomunicaciones en Colombia para la implementación de las redes electricas inteligentes. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2014, p. 112.

¹¹ RODRÍGUEZ, Juan. Antena helicoidal cuadrifilar de banda ancha para instrumentación. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 22.

Figura 3. Conjunto de resultados para un anillo con radio de 3cm.



Fuente: RODRÍGUEZ, Juan. Antena helicoidal cuadrifilar de banda ancha para instrumentación. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 30.

Un estudio similar, acerca del diseño de una antena tipo cuerno para operación en banda ancha¹², se llevó a cabo en la Pontificia Universidad Javeriana, en donde se recopiló todo el proceso para el diseño y evaluación de la antena, para operación entre frecuencias de 1.8 a 18GHz. De este documento, nuevamente resalta el uso de la herramienta *ANSOFT-HFSS®* para diseño y simulación, así como lo reciente del desarrollo de este tipo de antenas y los costos para el proceso de manufactura.

En la Universidad Santo Tomas, se realizó el diseño para proveer servicio de internet a la fundación de la vivienda La Aldea¹³. En el trabajo se presenta toda la revisión teórica en cuanto a tecnologías y estándares de comunicación inalámbrica, el diseño de un enlace punto a punto, la simulación de un radioenlace para confirmar la ejecución del diseño y un análisis de presupuesto. De este documento se resalta el diseño de un enlace punto a punto, así como la herramienta Radio Mobile para la simulación del enlace.

Para concluir, el día 4 de octubre de 2017, en la Universidad Católica de Colombia en el marco del Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Tecnología

¹² CRIOLLO, Edgar. Antena Horn para operación en banda ancha. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 30.

¹³ MARIN, Robert y PEÑUELA, Edixon. Diseño de una infraestructura tecnológica para proveer internet por vía microondas a la fundación de vivienda La Aldea en Villavicencio (Meta). Bogotá: Universidad Santo Tomas. Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica. Tesis, 2016, p. 15.

(CONIITI 2017)¹⁴, se llevó a cabo un Workshop dirigido por el Ingeniero Gustavo Vargas, en donde se expuso la herramienta web de la ANE (Agencia Nacional del Espectro) para ingeniería de espectro y estudio de radioenlaces¹⁵. Lo destacado de esta herramienta es que a ser desarrollada por una agencia nacional, cuenta con los parámetros y factores condicionantes en detalle, así como los detalles del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias CNABF¹⁶.

Como consecuencia de los trabajos analizados en este apartado, se resaltan varios puntos: la variedad en herramientas de diseño y simulación de antenas como CST®, ANSOFT ANSYS HFSS® y FDTD®, siendo ANSYS HFSS® la opción más elegida; los diferentes factores condicionantes presentes al momento de realizar un radioenlace; las distintas herramientas web para simulación de enlaces bajo parámetros específicos, siendo la herramienta de Simulación en Línea de la ANE la opción más destacada.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Proyecto Uniandino Aeroespacial (PUA), concebido como una plataforma de actividades académicas de investigación y desarrollo, orientada a la promoción de la Ingeniería Aeroespacial en Colombia¹⁷; en el cual se plantean objetivos como construir vehículos aeroespaciales, establecer medidas de seguridad y generar componentes de comunicación, para obtener un comportamiento fidedigno, para detectar a tiempo posibles errores o aspectos a mejorar y de igual manera adquirir datos para su almacenamiento y posterior análisis.

La comunicación de esta información a base en tierra, plantea un desafío para el proyecto, en donde surge la necesidad de una aplicación de la Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones, en donde el manejo de aspectos clave como lo pueden ser el uso del espectro, el ancho de banda y los problemas técnicos que surgen debido al clima y estudios cartográficos; esto abre una puerta, a una relación académica entre la Universidad Católica y la Universidad de Los Andes, presentando el desarrollo y

¹⁴ CONIITI. Workshop, herramientas WEB para ingeniería de espectro [en línea]. Bogotá: Coniiti, 2017 [citado 2 de febrero, 2018]. Disponible en internet: <<http://coniiti.com/iiiiconiiti2017/>>

¹⁵ ANE. Sistema de simulación en línea [en línea]. Bogotá: Agencia Nacional del Espectro [citado 2 de febrero, 2018]. Disponible en internet: <<https://simulacion.ane.gov.co/se/portal/ane/login.php>>

¹⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencia (27, Julio, 2017). Por la cual se actualiza el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias – CNABF. Bogotá: Agencia Nacional del Espectro, 2017, p. 8.

¹⁷ UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Proyecto Uniandino Aeroespacial [en línea]. Bogotá: Fabio Rojas [citado 2 de Febrero, 2018]. Disponible en internet: <<https://pua.uniandes.edu.co/doku.php?id=principal>>

simulación de antenas, siendo esto un primer paso para una solución concreta al problema de desarrollar un enlace de microondas acorde a la bandas libres de la legislación colombiana generando una infraestructura para la transmisión de información mediante una comunicación punto a punto.

Desde la perspectiva académica e investigativa, en el programa de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones, se buscará evaluar parámetros eléctricos fundamentales de las antenas, tales como patrones de radiación, campos radiados, directividad, ancho de banda, entre otros (se entra en detalle y completa de estos parámetros en el marco conceptual). Otros puntos a evaluar radican en las características técnicas de la medición de antenas, en aspectos claves como frecuencia, geometría y material de fabricación, lo cual se simulará y desarrollará con herramientas de software.

Como consecuencia de este trabajo de grado, se desarrolló una antena, diseñada y fundamentada en las leyes colombianas, en términos de uso del espectro y potencia radiada, así como los estudios de ancho de banda, frecuencia de resonancia y cartografía, necesarios para evaluar un posible enlace punto a punto en tierra.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Diseñar una antena para radio enlace de microondas, para la proyección de un enlace entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de Los Andes, de acuerdo a la legislación nacional.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos técnicos y factores condicionantes para establecer un enlace de microondas.
- Diseñar una antena directiva, que cumpla con los parámetros de aplicación seleccionados.
- Implementar un banco de pruebas para caracterizar la antena fabricada.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La transmisión de información es fundamental para el desarrollo de actividades educativas, comerciales, productivas y económicas de cualquier entidad, debido a esto se implementan antenas y sistemas de comunicación más seguros que permitan la confiabilidad de los enlaces.

Dadas las condiciones cartográficas y de clima que presenta la ciudad de Bogotá, así como también el buen uso de un bien tan escaso como lo es el espectro electromagnético, se requiere de una investigación en términos legales y técnicos para realizar un enlace punto a punto, lo que genera un reto a nivel de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones, implicando un aporte a nivel teórico, técnico y de conocimiento legal como futuros ingenieros.

Para este escenario, identificar las frecuencias disponibles y los factores condicionantes para una planeación de radioenlaces punto a punto, así como el diseño, simulación y construcción de antenas que resulta ser un factor crítico ya que de ellas depende el buen funcionamiento y la confiabilidad del radioenlace, esto requiere de aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. En el PUA se incentiva la investigación aeroespacial integrando el trabajo de grupos con diversos intereses para propulsar el desarrollo tanto tecnológico como social que éste implica. Por lo cual el manejo de información, telemetría, rastreo y comunicación resulta ser de gran importancia para las actividades académicas que se llevan a cabo. En base a esto, las distintas actividades académicas se realizaron en cooperación directa con los ingenieros PhD. Johann Osma profesor asociado al departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, el Dr. Fabio Rojas profesor asociado al departamento de Ingeniería Mecánica y estudiantes que participan en el PUA, pertenecientes a la Universidad de Los Andes.

En este punto resulta conveniente para ambas universidades el desarrollo de este proyecto cooperativo, dado que se dispondrá de información compartida, generando un espacio en donde habrá más variedad de opiniones y otros puntos de vista científicos que se pueden generar en las distintas instituciones.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES

En este trabajo de grado se plantea el estudio, análisis y diseño de una antena, mediante la herramienta de simulación *ANSOFT Ansys HFSS® 18.0*, con apoyo de *MATLAB®2016* y el sistema de simulación en línea de la ANE¹⁸ y Radio Mobile

¹⁸ ANE. Op. Cit.

1.9.2.0, para la posterior proyección de un radioenlace de microondas entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de Los Andes.

Se diseñara una antena de mínimo 10dBi de ganancia, fundamentada en cumplimiento de la ley 1341 de 2009¹⁹, en términos de uso del espectro, potencia radiada y estudio de ubicación del enlace, así como el cumplimiento del ancho de banda establecido para la frecuencia de resonancia seleccionada al momento de realizar el estudio del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias CNABF²⁰ y la resolución 711 de 2016²¹.

El software *Ansoft ANSYS HFSS® 18.0*, se encuentra licenciado en la Universidad de Los Andes, por lo que esta herramienta será utilizada en compañía de los estudiantes asociados al Proyecto Uniandino Aeroespacial.

La simulación del enlace se realizó con la herramienta web de la ANE, a la cual se tendrá acceso gracias a un usuario y contraseña asignados por la agencia.

1.7. MARCO REFERENCIAL

1.7.1. MARCO TEORICO

En un radioenlace la transferencia de energía se debe obtener con la mayor eficiencia posible, para lograr esto siempre debe buscarse un óptimo acoplamiento de impedancias, entre los diversos elementos que se encuentren en el sistema de comunicación. Cuando no se acoplan las impedancias, una parte importante de la energía recibida o transmitida se va a reflejar en la línea de transmisión dando como resultado a ondas estacionarias, las cuales no contribuyen con energía útil para el sistema ocasionando además distorsiones en la señal que viaja mediante la onda electromagnética y pérdidas por calentamiento. Para que una antena radie la mayor cantidad de potencia, sus dimensiones deben estar alrededor de una longitud de onda. Físicamente las dimensiones de las antenas se sitúan alrededor de 1/8 de la longitud de onda y la longitud de onda completa.

¹⁹ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1341. (30, Julio, 2009). Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones –TIC–, se crea la Agencia Nacional del Espectro y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El Congreso, 2009, p. 15.

²⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Op. Cit.

²¹ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Resolución 711. (11, Octubre, 2016). Por la cual se establecen las bandas de frecuencia de libre utilización dentro del territorio nacional y se derogan algunas disposiciones. Bogotá: La Agencia, 2016, p. 3.

En el diseño de antenas se prioriza la efectividad, es decir que emita en mayor cuantía la energía que llegue a ella y capte la mayor energía posible para las frecuencias deseadas.

Una onda electromagnética en espacio libre o vacío viaja a una velocidad de propagación de 3×10^8 m/s. La velocidad de propagación cambia de acuerdo al medio. Un dato muy importante para entender el comportamiento de la línea de transmisión y las dimensiones de la antena es la longitud de onda, que para el grado de las microondas resulta ser pequeña.

Una antena de radio, se caracteriza por convertir la energía electromagnética, que proviene de un generador por medio de una línea de transmisión o guía de onda, en una energía electromagnética que se propaga en el espacio como medio, también destaca por adaptar la impedancia interna del generador a la impedancia del espacio.

Los parámetros para el diseño de antenas, generalizan conceptos dentro de dimensiones y formas, parámetros eléctricos y mediciones características. Una antena está formada por un conductor, cuyas dimensiones van de acuerdo a ciertos parámetros principalmente de frecuencias y otras características, estos parámetros y sus definiciones son enunciadas a continuación²²:

- Impedancia característica Z_0 .
- Altura o longitud efectiva (λ).
- Coeficiente de onda β .
- Longitud eléctrica (λ)
- Factor de atenuación α .
- Resistencia de radiación R_r .
- Inductancia L_a .
- Capacidad C_a .
- Q (factor de calidad) y ancho de banda (Hz).
- Reactancia X_a .
- Impedancia de entrada Z_e .
- Directividad.
- Área efectiva. (m^2)

Impedancia Característica:

Parámetro que depende de la relación longitud y diámetro del conductor con la frecuencia de trabajo, valor correspondiente al punto determinado.

²² GARCIA, Armando. Calculo de antenas. 4ta Edición. México D.F: Marcombo, 2012, p. 23.

Altura o longitud efectiva:

La longitud efectiva de una antena, va de la mano con el concepto de distribución uniforme de corriente, en donde la energía radiada es la misma al momento de esta ser recortada, si se tratase de un mono polo, se le conoce como altura efectiva.

Coeficiente de onda:

Este parámetro es un ángulo, representado por β , cuyo valor es $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, también se le conoce como constante de fase, corresponde a los radiales por cada metro de la longitud de onda de la frecuencia de trabajo.

Longitud eléctrica:

Teóricamente los valores de corriente en los extremos en una antena son cero, en la práctica se sabe que esto no es así y que en estos extremos hay cierto valor de corriente, conocido como efecto terminal. Esto supone una disminución de la impedancia característica, por lo que la antena debe ser virtualmente más larga, a esta distancia se le conoce como longitud eléctrica.

Factor de atenuación:

Este parámetro determina la pérdida de energía que produce en cada punto de la antena, se da en función de su longitud, su resistencia de radiación y su impedancia característica, se mide en Neper.

Resistencia de radiación:

Este parámetro se determina por la capacidad que posee una antena, para disipar la energía que recibe del generador, su valor es en ohmios.

Inductancia:

Valor intrínseco del conductor y depende de la impedancia característica, así como de la frecuencia de trabajo.

Capacidad:

Es la resultante de todas las capacidades entre los puntos del conductor, por lo que también depende de la impedancia característica y de la frecuencia de trabajo.

Factor de calidad y ancho de banda:

El factor de calidad es un parámetro que depende de la impedancia característica y de la resistencia de radiación, lo que determina la variación de la frecuencia admitida respecto a la frecuencia de trabajo y que esta tenga un rendimiento aceptable; dado esto el ancho de banda es la distancia en frecuencia de las dos frecuencias extremo, en las que la antena ha disminuido su energía radiada un 50%.

Reactancia:

Este parámetro es resultante de la suma vectorial de la inductancia y la capacidad de la antena, se da en función de la longitud y radio del conductor, así como de la longitud de onda de la frecuencia de trabajo.

Impedancia de entrada:

Este parámetro es la impedancia que presenta en su punto de alimentación, es un factor necesario de conocer para adecuar un correcto acoplamiento con la impedancia de la fuente, se compone de una parte real, conocida como resistencia, y una parte imaginaria, conocida como reactancia. Se puede representar con circuitos de constantes concentradas.

Directividad:

Este parámetro determina la ganancia orientada en la dirección de máxima radiación, este valor se da en función de la potencia media radiada, así como de su longitud efectiva y de su resistencia a la radiación.

Área efectiva:

Se define como la relación entre la potencia disponible en los terminales de la antena receptora y la potencia por unidad de superficie presente en el plano de tal antena, se mide en m^2 .

Los parámetros eléctricos fundamentales de las antenas y sus respectivas definiciones, son enunciados a continuación²³:

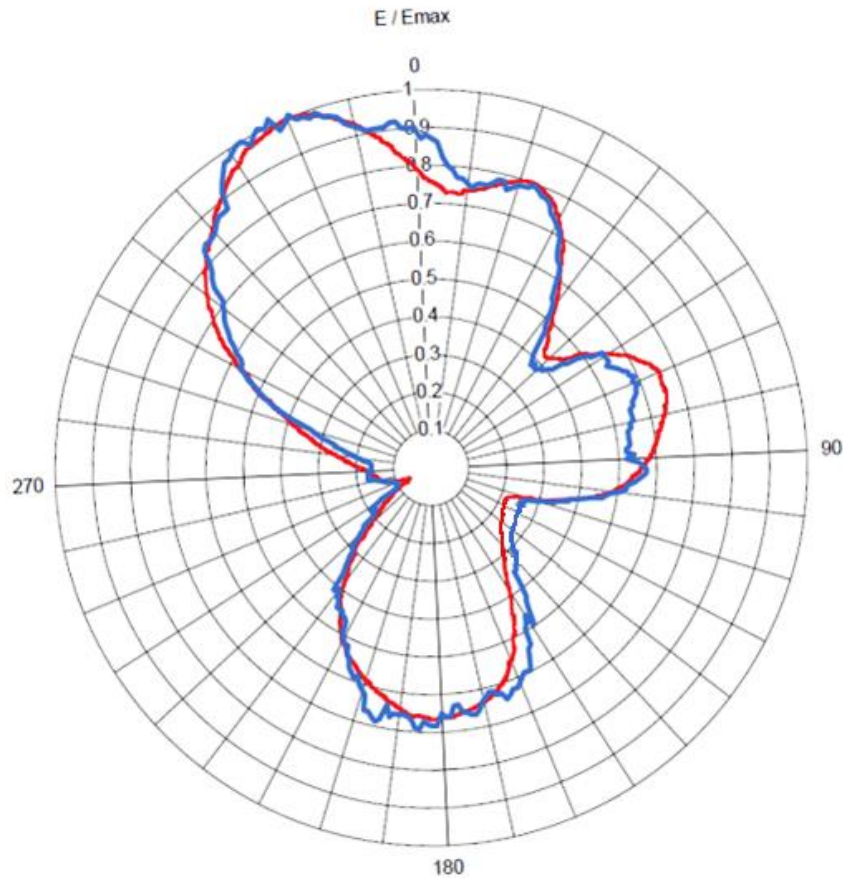
- Patrón de radiación.
- Campos radiados.
- Densidad de campo.
- Ganancia.
- Eficiencia de radiación.
- Polarización.
- Factor de pérdidas de polarización.
- Distribución de la potencia en transmisión.
- Potencia promedio.
- Coeficiente de apertura.
- Temperatura de ruido.

²³ RAMIREZ, Jaime. Antenas. Conceptos básicos simplificados de funcionamiento y diseño. 1ra Edición. Bogotá: Editorial Bonaventuriana, 2010, p. 87.

Patrón de radiación:

Es la forma geométrica que con sus ondas electromagnéticas son radiadas en el espacio, el tipo de patrón que producen las antenas se genera debido a la configuración física y geométrica de las mismas. Ver figura 4.

Figura 4. Patrón de radiación.



Fuente: ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS. Comisión interamericana de telecomunicaciones [en línea]. Barranquilla: Comité Consultivo de Radiocomunicaciones [citado 15 de febrero de 2018]. Disponible en internet: <<https://tesamerica.com/mediciones-patron-radiacion/>>

Campos Radiados:

Al fluir corriente por la antena, se produce a su alrededor un efecto electromagnético medido por su potencial eléctrico, potencial vectorial magnético, campo eléctrico e intensidad magnética.

Densidad de campo:

Se compone de una parte real (radiada) y una parte imaginaria (reactiva), la parte radiada corresponde a flujo de potencia que atraviesa una unidad de área esférica, así como la reactiva corresponde a al flujo de potencia que se disipa alrededor de la antena en forma de calor.

Ganancia:

Mide la eficiencia de una antena, como la característica más referenciada. Se da por ganancia absoluta que es la relación entre la intensidad de radiación y una determinada dirección y la ganancia relativa, que es la relación entre la ganancia de la antena en una dirección dada y la ganancia de una antena de referencia.

Eficiencia de radiación:

Es la relación que existe entre la potencia de radiación de la antena y la potencia de entrada neta de los terminales de la antena, considerando solamente las pérdidas por características óhmicas.

Eficiencia total:

Eficiencia de radiación, considerando además las perdidas por efectos de reflexión de la señal que se encuentra en los terminales de la antena, cuando no existe un acople de impedancia entre la antena y la línea de transmisión que la conecta a equipo de radio.

Polarización:

Equivale a la polarización de la onda transmitida por la antena, es la indicación de la orientación del vector de campo eléctrico respecto a la superficie de la tierra, radiada en un punto fijo del espacio en el tiempo transcurrido.

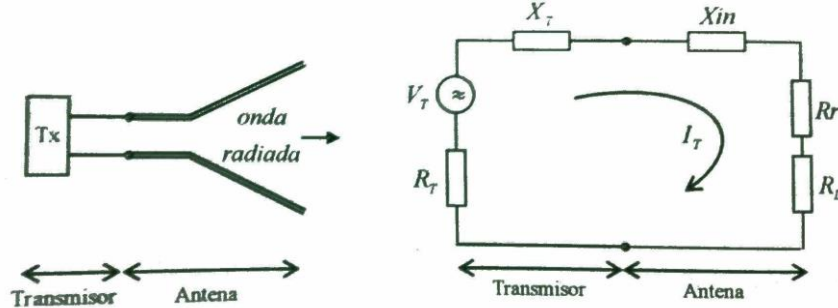
Factor de pérdidas de polarización:

Comúnmente conocido como PLF, se presenta cuando la antena receptora no coincide con la polarización de la antena emisora.

Distribución de la potencia en transmisión:

La antena en régimen de transmisión, al ser un circuito, es representada en su equivalente tipo Thévenin, sin considerar la línea de transmisión, se generaliza en el siguiente esquema. Ver figura 5:

Figura 5. Esquema y circuito Thévenin de una antena en modo de transmisión.



Fuente: RAMIREZ, Op. Cit., p.84

Potencia promedio:

La potencia promedio radiada corresponde a aquella que utiliza la resistencia de radiación, que se al espacio. Se debe generar acople de impedancias para garantizar la máxima transferencia de potencia.

Coefficiente de apertura:

Indica el porcentaje del área de la antena que es efectivamente utilizada para suministrarle potencia al receptor, lo que indica que corresponde a la relación entre el área efectiva máxima y el área física de la antena.

Temperatura de ruido:

La antena fabricada de material conductor, es un elemento ruidoso, en donde el calor presente en el medio, moviliza los electrones del material, provocando la presencia de corrientes eléctricas en el mismo produciendo así el ruido.

Ecuaciones de Maxwell:

Las ecuaciones de Maxwell son expresiones matemáticas que sirven para estudiar el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos. Estos campos son campos vectoriales, estos cumplen unas propiedades que se definen por las operaciones divergencia y rotacional, cuyas definiciones físicas dan lugar al entendimiento de cómo se comportan las ondas electromagnéticas y luego entonces el diseño de dispositivos que radian energía y transmiten información (Véase tabla 1).

Tabla 1. Versión de aplicación generalizada de las ecuaciones de Maxwell.

Forma diferencial	Forma integral	Acotaciones
$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_S D \cdot dS = \int_v \rho_v dv$	Ley de Gauss
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_S B \cdot dS = 0$	Ley de Gauss para campos magnéticos
$\nabla \times E = -\frac{\delta B}{\delta t}$	$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\delta}{\delta t} \int_v B \cdot dS$	Ley de Faraday
$\nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t}$	$\oint_L H \cdot dl = \int_S \left(J + \frac{\delta D}{\delta t} \right) \cdot dS$	Ley de los circuitos de Ampere

Fuente: SADIKU, Matthew. Elementos de electromagnetismo. 3ra Edición. México D.F: Oxford University Press, 2003, p. 384.

ρ_v : Densidad volumétrica de carga eléctrica

$\vec{\beta}$: Inducción magnética o densidad de flujo magnetico.

\vec{E} : Intensidad de campo eléctrico

\vec{D} : Inducción eléctrica o densidad de flujo eléctrico

\vec{H} : Intensidad de campo magnetico.

\vec{J} : Densidad de corriente eléctrica.

En la primera ecuación de Maxwell se entiende que no es exclusiva la existencia del campo magnético debido a una corriente eléctrica. La existencia de un campo eléctrico variable en el tiempo o corriente de desplazamiento también se tiene un campo magnético. La segunda ecuación explica que existe un campo eléctrico debido a la presencia de un campo magnético que varía en el tiempo. La tercera ecuación explica que las cargas eléctricas son fuentes del campo eléctrico. Por último la cuarta ecuación que nos dice que nos hay cargas magnéticas²⁴.

Vector de Poynting:

Es el modelo matemático, que busca explicar el fenómeno de la conversión de la energía eléctrica en energía electromagnética y viceversa.²⁵ Las antenas sirven como transductores, de la energía eléctrica en energía electromagnética; si esta trabaja en modo de transmisión o en modo de recepción respectivamente.

²⁴ RESTREPO, Jairo. Ingeniería de telecomunicaciones. Conceptos básicos. 1ra Edición. Medellín: Universidad de Medellín, 2014, p. 84.

²⁵ SADIKU, Op. Cit., p. 223.

1.7.2. MARCO CONCEPTUAL

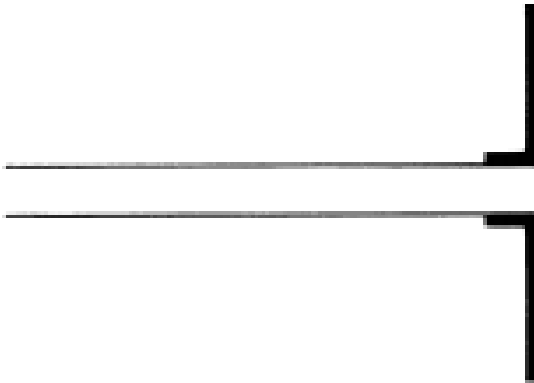
Las radiocomunicaciones se especifican como una telecomunicación que se realiza por medio de ondas radioeléctricas. La UIT (unión internacional de telecomunicaciones), “define las ondas radioeléctricas como las ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin una guía artificial y con una frecuencia límite de 300 GHz”²⁶.

La técnica de la radiocomunicación consiste en la superposición de la información que desea transmitir en una onda electromagnética soporte de mayor frecuencia que se denomina portadora. La transmisión de esa información mediante esa señal u onda portadora se denomina modulación. La onda modulada se envía al medio de propagación a través de un dispositivo de acoplamiento en el medio, denominado antena. Existe una gran variedad de tipos de antenas, las más relevantes son las de aplicaciones para bandas libres.

Antena Dipolo:

Las antenas dipolo son básicamente dos conductores conectados a una fuente de alimentación de un extremo de cada conductor (ver figura 6). Cada conductor debe medir un cuarto de longitud de onda.

Figura 6. Antena dipolo.



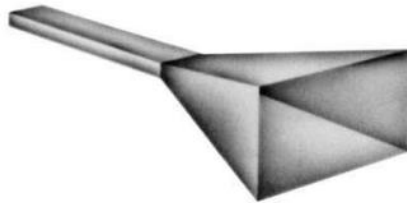
Fuente: BALANIS, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edición. New Jersey: Wiley – Interscience, 2005, p. 5.

²⁶ UNION INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). Reglamento de radiocomunicaciones. Edición de 2016. Ginebra: International Telecommunication Union, 2016, p. 7.

Antena de cuerno:

Las antenas de cuerno o de apertura son muy utilizadas para UHF y frecuencias más altas (ver figura 7 y 8). Son antenas con una alta ganancia que varía entre 10-25 dB.

Figura 7. Antena de cuerno piramidal



Fuente: BALANIS, Op. Cit., p. 6.

Figura 8. Antena de cuerno cónico



Fuente: Ibíd., p. 6.

Antenas de reflector parabólico:

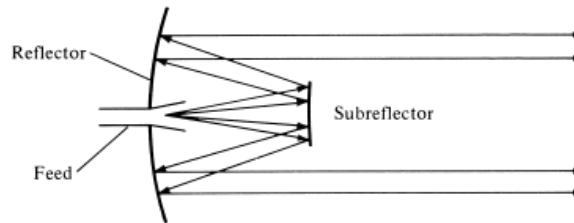
Figura 9. Antena parabólica con alimentación frontal



Fuente: Ibíd., p. 6.

Este tipo de antena solo tiene un reflector y es alimentada por el foco en la parte frontal como se observa en la Figura 9. Las ondas rebotan en el plato de tal forma que las ondas salgan en una sola dirección.

Figura 10. Antena Parabólica con alimentación Cassegrain



Fuente: *Ibíd.*, p. 8.

Esta antena se alimenta por una mínima abertura que se encuentra en el plato parabólico, Esta abertura se apunta directamente hacia un sub-reflector que hace rebotar las ondas hacia el plato parabólico y que estas posteriormente reboten hacia una dirección como se muestra en la Figura 10.

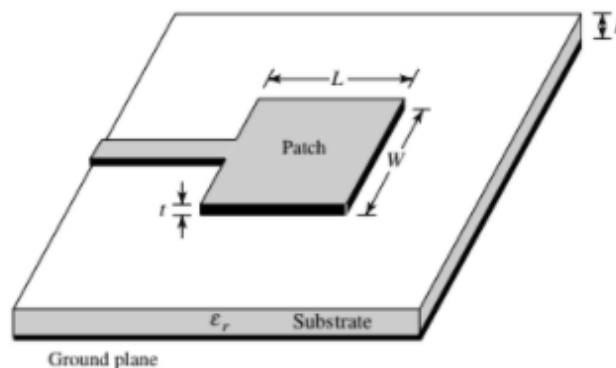
Este tipo de antenas son muy directiva por el plato parabólico ya que las ondas siempre viajaran en la misma dirección.

Antenas microstrip:

Las antenas microstrip son un parche metálico sobre un sustrato conectado a tierra. Estas antenas tienen un gran uso para aplicaciones en las que el tamaño exiguo es muy importante, algunas de estas aplicaciones son: aviación, satelital, aeronáutica, comunicaciones móviles. Son usadas principalmente para UHF.

El parche metálico puede tomar diferentes configuraciones. Sin embargo, los parches rectangulares y circulares, son los más populares debido a la facilidad de análisis, fabricación y sus atractivas características de radiación, especialmente baja radiación de polarización cruzada²⁷ (ver figura 11 y 12).

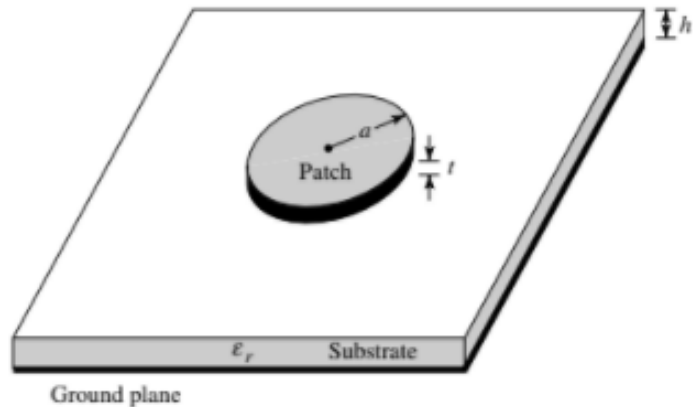
Figura 11. Antena microstrip rectangular



Fuente: *Ibíd.*, p. 813.

²⁷ *Ibid.* p. 811.

Figura 12. Antena microstrip circular



Fuente: Ibíd., p. 813.

h: grosor del sustrato (mm)

t: grosor del cobre (mm)

L: largo del parche (microstrip rectangular) (mm)

W: Ancho del parche (microstrip rectangular) (mm)

a: Radio del parche (microstrip circular) (mm)

ϵ_r : Constante Dieléctrica

Antena Yagi-Uda:

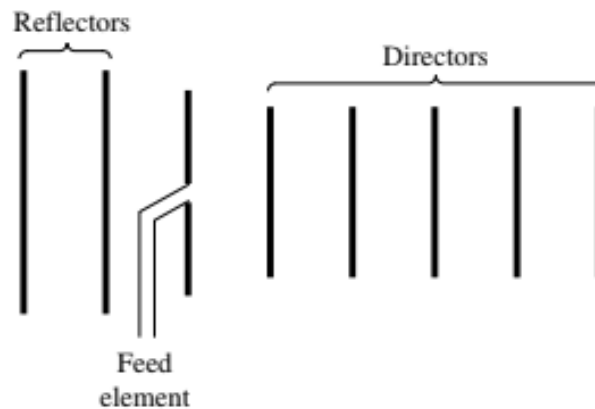
La antena Yagi es una antena direccional creada por el ingeniero eléctrico japonés Hidetsugu Yagi. Esta antena se compone de un arreglo de piezas o elementos individuales de los cuales solo un elemento transmite ondas radiales. Este elemento activo o excitado produce un campo electromagnético que induce una corriente sobre los diferentes elementos que componen la antena.

Esta antena es un arreglo que se compone básicamente de dos tipos de elementos: Elementos excitados y elementos parásitos. El elemento excitado de la antena es un dipolo, el cual se encarga de inducir corrientes a los elementos parásitos. Entre los elementos parásitos se encuentran los directores y el reflector.

Los directores son los elementos más cortos de la antena, la longitud y distancia de separación de estos depende de la longitud de onda. Su longitud se va reduciendo del primer hasta el último director que se tenga en cuenta al momento del diseño, lo que quiere decir que el primer director va a ser el más largo y el último el más corto. La ganancia y directividad de esta antena son directamente proporcionales al número de directores de la antena, por ejemplo, para una antena de 6 directores esta tendría una ganancia teóricamente de alrededor de 12 dB y un diagrama de radiación más directivo.

El reflector es el elemento más largo de la antena, incluso más largo que el dipolo. Este se encarga de reducir la intensidad de señal que llega a la antena por el lado opuesto de transmisión y recepción de la antena. El reflector puede ser de tipo parabólico o simplemente un elemento conductor como se observa en la figura 13.

Figura 13. Antena Yagi-Uda



Fuente: Ibíd., p. 7.

En cuanto al desarrollo de un radioenlace, los conceptos básicos para el correcto funcionamiento base del proyecto, son varios y se definirán algunos de ellos.

Radioenlaces por microondas:

Las microondas son ondas electromagnéticas, que tienen longitudes de onda en el rango de 30cm a 1mm, que se refleja en una frecuencia de 1GHz a los 300GHz, siendo estas expresadas por las ecuaciones de Maxwell.²⁸

Transmisión de microondas:

Se fundamenta en la clásica formación de un sistema de comunicaciones, un transmisor, un canal aéreo y un receptor, en donde el transmisor se encarga de modular la señal a un entorno digital en la frecuencia de operación, utilizando el canal aéreo como el camino hacia el receptor, que captura el mensaje y demodularlo a su señal original.

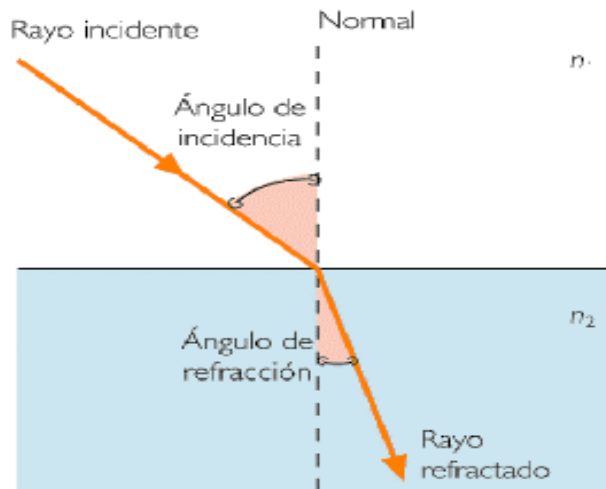
En las transmisiones inalámbricas, en su gran mayoría existen obstáculos, por lo que las alturas entre el transmisor y el receptor deben tener una mínima altura sobre dichos obstáculos.

²⁸ WUHU, Henry. Diseño e implementación de una aplicación de automatización de registros para el diseño de enlaces de microondas en sistemas de radio. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingeniería Electrónica. Tesis, 2007, p. 7.

Refracción:

Es el cambio de dirección que presenta una onda electromagnética cuando cruza una interfaz entre dos medios con características eléctricas diferentes, en diversas velocidades de propagación, este efecto generara un ángulo de incidencia y un ángulo de refracción respecto a la normal, generando así un frente de onda que se curva al cruzar los medios (ver figura 14).

Figura 14. Concepto de refracción.



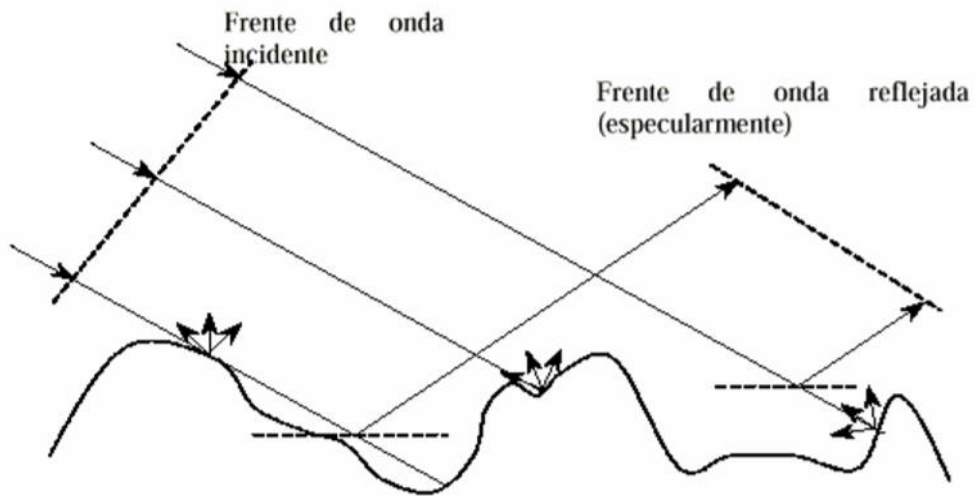
Fuente: DECONCEPTOS, Refracción [en línea]. Concepto de refracción [citado 15 de Marzo de 2018]. Disponible en internet: <<https://deconceptos.com/ciencias-naturales/refraccion>>

Reflexión:

Debido a la carencia de un frente de onda infinito y a las características eléctricas de las capas atmosféricas, las ondas de radio se propagan de manera curva y de múltiples recorridos. El fenómeno de reflexión se presenta cuando un frente de onda se encuentra con una interfaz de dos medios, y esta es reflejada (ver figura 15).²⁹

²⁹ WUHU, Op. Cit., p. 56.

Figura 15. Reflexión en terreno.



Fuente: WUHU, Op. Cit., p. 11.

Ganancia del sistema (G_s):

Se define como la diferencia entre la potencia nominal de salida de un transmisor y la potencia de entrada mínima requerida por un receptor. Esta ganancia del sistema debe ser mayor a la suma de todas las ganancias y pérdidas que le ocurren a una señal de información al propagarse.³⁰

Representa la pérdida neta de un sistema de radio. Este criterio permite calcular la confiabilidad de un sistema para los parámetros del mismo (véase la ecuación 1):

$$G_s = P_{Tx} - C_{min} \quad (1)$$

Donde: G_s es la ganancia del sistema en dB, P_{Tx} es la potencia de salida del transmisor en dBm y C_{min} es la potencia mínima en el receptor en dBm.

Umbral del receptor:

Es la potencia mínima de portadora de banda ancha a la entrada de un receptor que permita la recuperación de la señal de información, se le conoce como C_{min} ; en algunas literaturas se le considera el parámetro más importante al evaluar el funcionamiento de un sistema de comunicaciones por microondas³¹ (Ver ecuación 2).

³⁰ RESTREPO, Jairo. Compendio de telecomunicaciones, conceptos básicos para el aprendizaje de los sistemas de telecomunicación. Op. Cit., p. 159.

³¹ *Ibíd.*, p. 101.

$$C_{min} = \left(\frac{C}{N}\right)_{dB} + N_{Rx_{dB}} \quad (2)$$

En donde $\left(\frac{C}{N}\right)$ es la relación de potencia de la portadora y $N_{Rx_{dB}}$ la potencia de ruido en el receptor.

Factor de ruido o índice de ruido (NF_{dB}):

Indica cuanto se daña la relación de potencia después del modulador, al propagarse una onda desde su ingreso al sistema hasta su salida (ver ecuación 3).

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{\left(\frac{S_1}{N_1}\right)_{in}}{\left(\frac{S_2}{N_2}\right)_{out}} \right)_{dB} \quad (3)$$

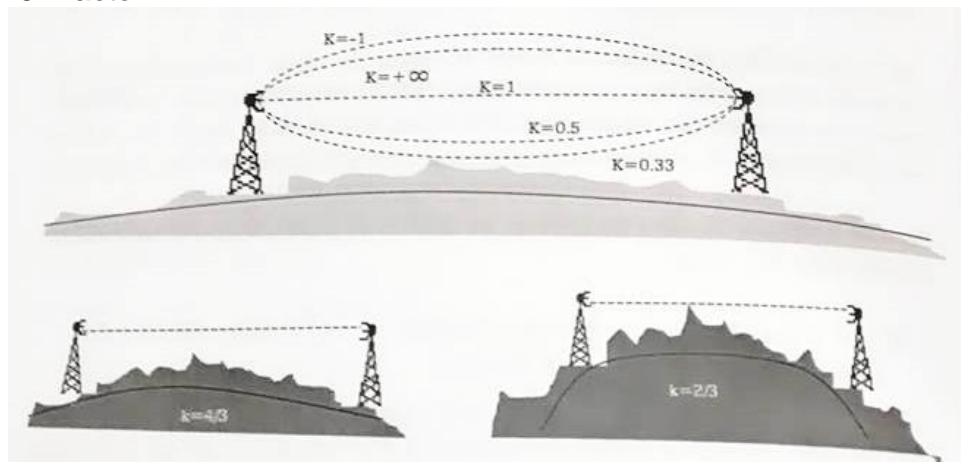
$\left(\frac{S_1}{N_1}\right)_{in}$: Relación señal a ruido de entrada (dB)

$\left(\frac{S_2}{N_2}\right)_{out}$: Relación señal a ruido de salida (dB)

Factor K:

Es un valor que indica la curvatura del rayo. Para la elaboración de perfiles, se considera un factor de corrección al radio terrestre por efecto de la refracción en la atmosfera, $K = 1$ para radioenlaces con línea de vista; $K = 4/3$ para atmosferas estándar y trayectoria refractiva normal; $K < 1$ se utiliza para trayectoria obstruida que se presenta en climas complicados; $-1 < K < \infty$ para zonas irregulares en algunas áreas (ver figura 16).

Figura 16. Factor K.

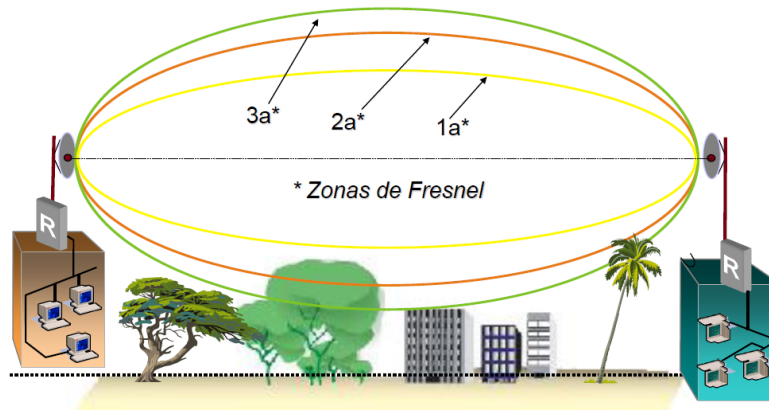


Fuente: Ibid., p.110.

Zona de Fresnel:

En el proceso de verificación visual de los perfiles para un radioenlace, es común revisar la penetración en volumen de revolución que transporta energía de propagación, más conocido como zona de Fresnel. Si existe algún objeto físico presente o interfiere con esta zona, causara una atenuación en la señal (ver figura 17).

Figura 17. Zona de fresnel



Fuente: VÁSQUEZ, Carlos. Análisis, diseño, simulación y presupuesto de un radioenlace entre Dosquebradas y las escuelas El Rincón, la colonia y las delicias. Pereira: Universidad Católica de Pereira. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2014, p. 63.

En el diseño de un radioenlace de microondas, se analizan una serie de parámetros y aplicaciones de criterios que envuelven el cálculo de factores de ganancia y pérdida asociada a las antenas transmisoras, líneas de transmisión y propagación en el medio ambiente, que calcula la distancia máxima de operación. En general se realizan cálculos de pérdidas y atenuaciones, de desvanecimiento y margen de desvanecimiento, de calidad y confiabilidad.

Cálculos de pérdidas y ganancias:

Los cálculos útiles para este proceso son el de la longitud de la trayectoria de radio, la ganancia de la antena en función de su diámetro, la pérdida de la trayectoria en el espacio libre, la atenuación atmosférica, la intensidad del nivel de portadora de recepción, el margen de desvanecimiento, la atenuación por vegetación y la atenuación debida a lluvias.³²

³² RESTREPO, Jairo. Compendio de telecomunicaciones, conceptos básicos para el aprendizaje de los sistemas de telecomunicación. Op. Cit., p. 91.

Longitud de la trayectoria de radio (PL):

Permite el cálculo de la distancia del radioenlace en función de las coordenadas geográficas (ver ecuación 4).

$$P_L(km) = R \times ArcCos[\cos \varphi_1 \times \cos \varphi_2 \times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \omega_1 \times \sin \omega_2] \quad (4)$$

Donde:

φ_i , representa la latitud del sitio i , ω_i representa la longitud del sitio i y R es el radio de la tierra (6371km, todo calculado en radianes).

Ganancia de la antena en función de su diámetro (G):

$$G(dB) = 10 \log \left(\mu \left(\frac{1}{3} \times \pi \times D \times f \right)^2 \right) \quad (5)$$

Donde:

μ , es la eficiencia de la antena, (típicamente 55%), D es el diámetro de la antena en metros, π en rad y f es la frecuencia de operación en GHz (Ver ecuación 5).

Perdida de la trayectoria en el espacio libre (FSL):

Por sus siglas en inglés, Free Space Loss. Esta se puede calcular según lo observado en la ecuación 6.

$$FSL(dB) = 10 \log \left(\frac{\pi(rad) \times P_L \times f \cdot \times}{7.5} \right)^2 = 92.44 + 20 \log P_L + 20 \log f \quad (6)$$

Con P_L en km y f en GHz.

Atenuación atmosférica ($L_{atm(dB)}$):

Debido a la longitud de onda más pequeña, este valor se considera para frecuencias altas, en donde se recomienda $f \geq 10GHz$ (ver figura 18 & ecuación 7a hasta 7e)³³

$$L_{atm(dB)} = \gamma \cdot P_L \quad (7a)$$

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_w \quad (7b)$$

Con:

³³ KIZER, George. Digital microwave communication, engineering point-to-point microwave systems. 1ra Edición. New Jersey: IEEE Press Wiley, 2013, p. 605.

$$\gamma_0 = \left[7.19 \times 10^{-2} + \frac{6.09}{(f^2 + 0.227)} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right] \times f^2 \times 10^2 \times (f - 0.01(T - 1.5))$$

(7c)

Ecuación (7d):

$$\gamma_w = \left[0.05 \times 0.002\rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right] \times f^2 \times \rho^2 \times 10^2 \times (1 - 0.06(T - 1.5))$$

Y

$$\rho = 216.7 \times \frac{H}{100} \times \frac{6.1121}{T + 273}$$

(7e)

Donde:

γ , es la atenuación atmosférica específica (dB/km)

γ_0 , es la atenuación de gas específica (dB/km)

γ_w , es la atenuación de vapor de agua específica (dB/km)

ρ , es la concentración de agua (g/m^3)

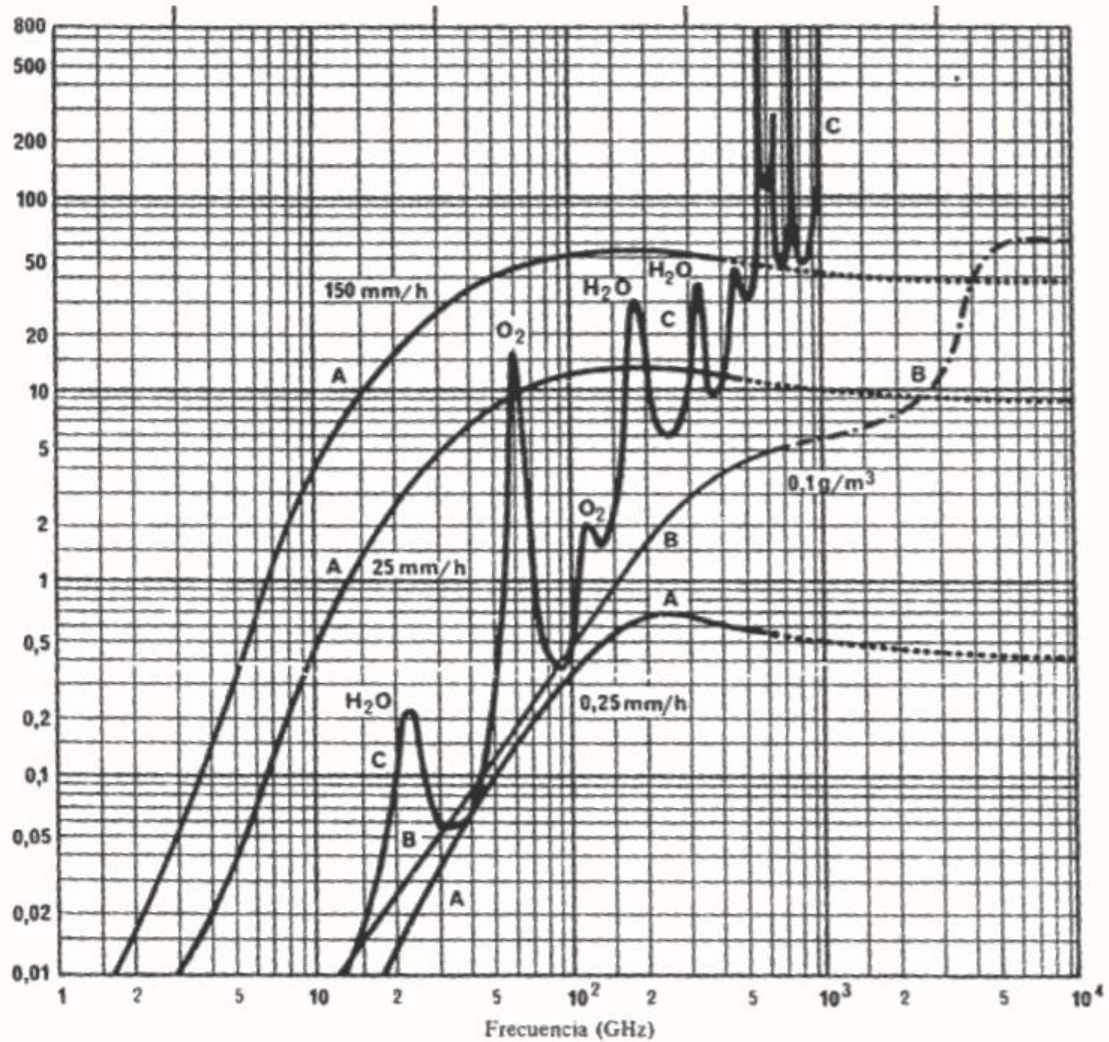
f , es la frecuencia en GHz

P_L , es la longitud de la trayectoria (km)

H , es la humedad relativa (%)

T , es la temperatura ($^{\circ}C$)

Figura 18. Atenuación atmosférica específica para un trayecto próximo a la tierra



Fuente: CARDAMA, Ángel y JOFRE, Luis. Antenas. 2da Edición. Barcelona: Ediciones UPC, 2002, p. 54.

- A: Lluvia
- B: Niebla
- C: Componentes gaseosos.

Intensidad del nivel de portadora de recepción (RCL):

$$RCL \text{ (dB)} = P_{tx} - P_{rt} - P_{la} + G_{tx} - P_{el} + G_r + G_{rx} + P_{ar} + P_{rr} \quad (8)$$

P_{tx} : Potencia del transmisor (dB)

P_{rt} : Perdida de ramificación en transmisión (dB)

P_{la} : Perdida de la línea de alimentación en transmisión (dB)

G_{tx} : Ganancia de la antena transmisora (dBi)

P_{el} : Perdida de espacio libre (dB)

A_{at} : Atenuación atmosférica (dB)

G_r : Ganancia del repetidor (eventual) (dB)

G_{rx} : Ganancia de la antena receptora (dBi)

P_{ar} : Perdida de alimentador en recepción (dB)

P_{rr} : Perdida de ramificación en recepción (dB)

Margen de desvanecimiento (F_m):

Según la real academia de ingeniería, tenemos la siguiente definición: "Número de decibelios de atenuación que se pueden añadir a un trayecto de propagación de RF antes de que la relación señal/ruido de un determinado canal disminuya hasta un valor inferior a un mínimo especificado" (véase ecuación 9).³⁴

$$F_m = RCL - \text{Umbral del Receptor} - \text{Degradación del Umbral} \quad (9)$$

Caracterización de antenas:

Para realizar mediciones en una antena, se requiere de un analizador de redes, que combina la ejecución de un transmisor y un receptor. Su función principal es la de medir los parámetros de reflexión S de un sistema, así como también se puede realizar medición de la potencia de transmisión; por lo genera estas mediciones se realizan en cámaras libres de eco y de cualquier interferencia electromagnética (cámaras anecoicas).³⁵

Analizador de redes vectorial:

Un Analizador Vectorial de Redes (VNA – Acrónimo en inglés - Vector Network Analyzer) es un instrumento de medida de precisión que sirve para conocer el desempeño en frecuencia como se muestra en la figura 19.³⁶

³⁴Tomado de: <http://diccionario.raing.es/es/lema/margen-de-desvanecimiento> (22/06/2018)

³⁵ HUANG, Yi y BOYLE, Kevin. Antennas from Theory to Practice. 1ra Edición. Wuhan: Wiley IEEE Press, 2008, p. 258.

³⁶ POZAR, David. Microwave engineering. 3ra Edición. New York: John Wiley & Sons, 1998, p. 636.

Un VNA es un sistema de medida tipo estímulo-respuesta, formado por una fuente de RF y múltiples receptores de medida. El mismo está especialmente diseñado para medir los coeficientes de reflexión directo e inverso, las características de transmisión o los parámetros S.

Figura 19. Analizador de redes



Fuente: ROHDE & SCHWARZ, [en línea], R&S ZVH Cable and Antenna Analyzer [citado 15 de mayo de 2018]. Disponible en internet: https://www.rohde-schwarz.com/lat/inicio_48230.html?rusprivacypolicy=1

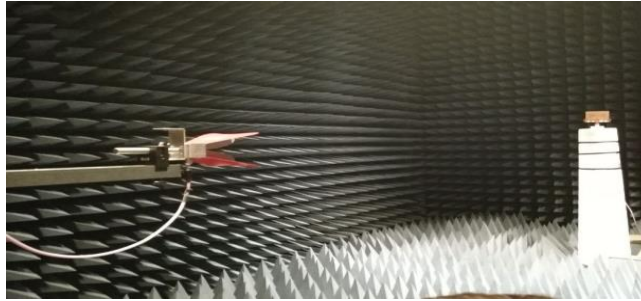
La Universidad Católica de Colombia, cuenta con un VNA que opera entre 100KHz hasta los 8GHz.

Cámaras anecoicas:

La cámara anecoica o cámara de libre eco fue desarrollada con el fin de realizar caracterizaciones de antenas. El termino anecoico significa “sin ecos”, es un cuarto protegido, cuyas paredes, pisos y techos se han cubierto con un material que permite dispersar o absorber gran parte de la energía incidente, de manera que facilite simular el espacio libre como se muestra en la figura 20. Adentro cuenta con un generador de microondas en un extremo y la antena a prueba en el otro extremo. La Universidad de los Andes cuenta con su propia cámara anecoica³⁷, la cual opera en un rango de frecuencias de 30MHz a 18GHz.

³⁷ AVILA, Alba. Centro de Microelectrónica Centro de Microelectrónica Universidad de los Andes Universidad de los Andes CMUA. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. 2009, p. 15.

Figura 20. Cámara anecoica Universidad de los Andes.



Fuente: Elaboración propia, foto tomada en la sala ML 035, cámara anecoica.

Descripción de software:

Las herramientas utilizadas en el transcurso de ejecución de este proyecto son Ansoft Ansys HFSS 2018, Matlab 2016, y el simulador en línea de la ANE.

Ansoft Ansys HFSS:

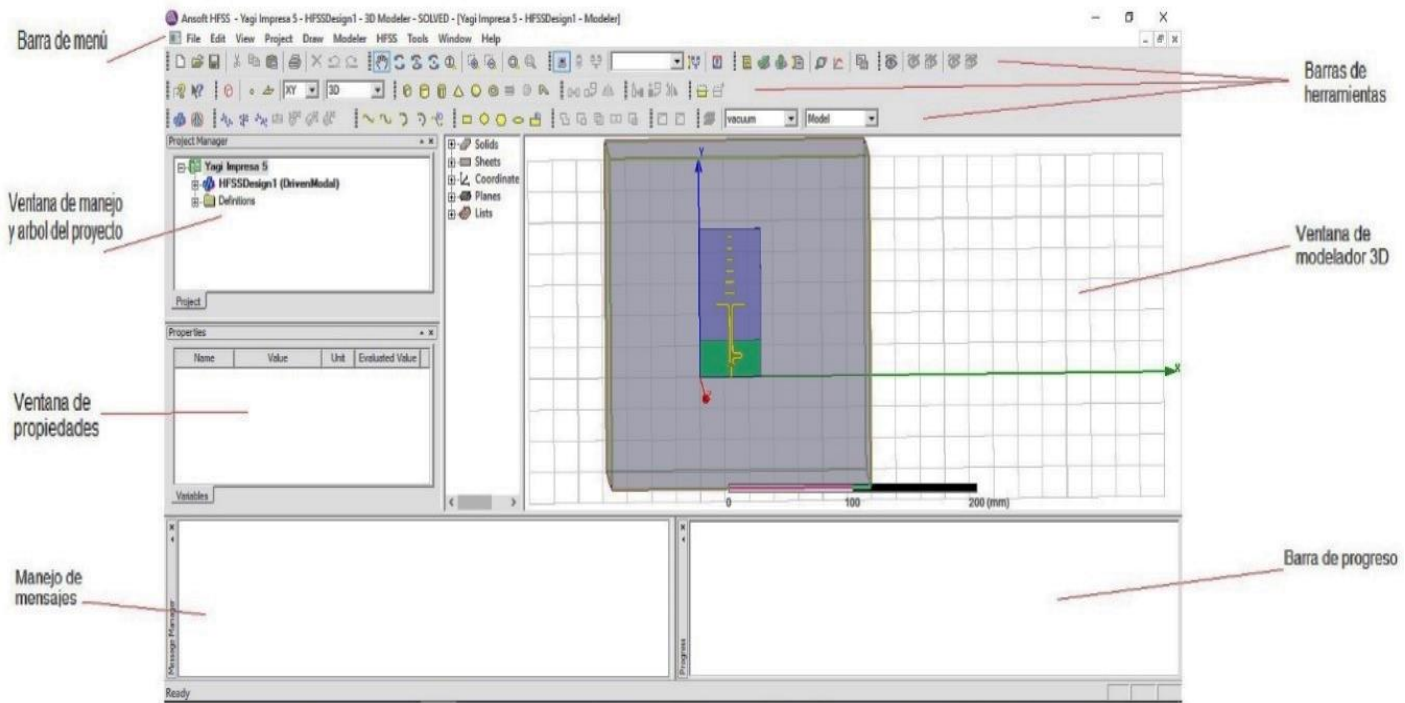
HFSS, por sus siglas en inglés (High Frequency Structure Simulator) es un simulador de campo de onda completa electromagnética (EM) de alto rendimiento para el modelado de dispositivos pasivos volumétricos 3D arbitrarios que aprovecha la interfaz gráfica de usuario de Microsoft Windows 10 (ver figura 21). Integra simulación, visualización, modelado de sólidos y automatización, donde las soluciones a sus problemas de arquitectura electromagnética se obtienen de forma rápida y precisa. Ansoft HFSS emplea el método de elementos finitos (FEM), el mallado adaptativo y los gráficos brillantes para proporcionarle un rendimiento y una percepción inigualables. Ansoft HFSS se puede usar para calcular parámetros tales como parámetros de reflexión S, frecuencia resonante y campos, entre otros.

La elección de este software se fundamentan en que cuenta con la técnica adaptativa AAMT (Acrónimo en inglés - Automated adaptative meshing technique), que responde a una alta precisión y confiabilidad de los resultados³⁸; también permite llevar a cabo soluciones de carácter paramétrico y optimización por medio de algoritmos genéticos (referencia HFSS), lo que garantiza el poder llevar a cabo una optimización adecuada, por último se puede maximizar la eficiencia de los recursos computacionales, que se verá reflejado de manera conveniente en los tiempos de simulación.

La Universidad de los Andes, cuenta con la licencia de uso, no obstante, en la página de Ansoft HFSS, se puede obtener una versión del software, con una licencia de uso académico.

³⁸ CRIOLLO, Op, Cit., p. 33.

Figura 21. Interfaz gráfica HFSS.



Fuente: Elaboración propia, basado en interfaz de Ansys HFSS.

Matlab:

Por sus iniciales en inglés Matrix Laboratory, es un programa de procesamiento, modelamiento y cómputo basado en operaciones matriciales y orientado al cálculo numérico por computadora, también es un lenguaje de programación de altas prestaciones.

Es una herramienta básica en el desarrollo de proyectos de ingeniería y para el área científica, resolviendo problemas de una manera más sencilla que en otros lenguajes de programación de alto nivel, por estas características se hace realizar la elección. La Universidad Católica de Colombia, cuenta con licencia de uso para Matlab 2016.

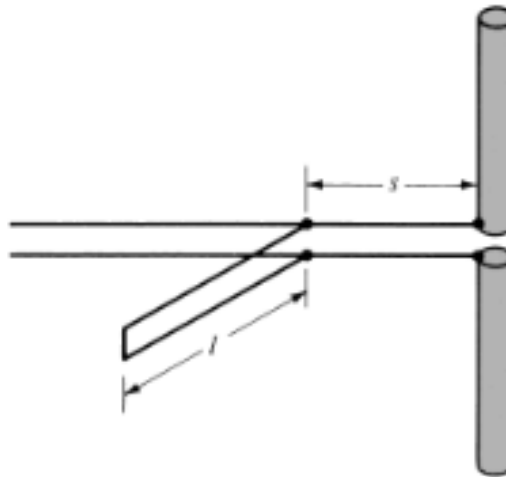
Modos de acoplamiento:

Las antenas requieren la mayoría de las veces acoplamientos de impedancia que garanticen la máxima transferencia de potencia, al momento de conectarlo a una línea de transmisión.

Acoplamiento por stub:

Básicamente este acoplamiento se puede lograr haciendo un cortocircuito o una bifurcación en circuito abierto a una distancia S de la conexión entre la línea de transmisión y la antena, la longitud del stub varia hasta que la susceptancia de este es igual en magnitud, pero opuesto en fase a la susceptancia de entrada de la conexión del stub a la línea de transmisión como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Acoplamiento por stub.



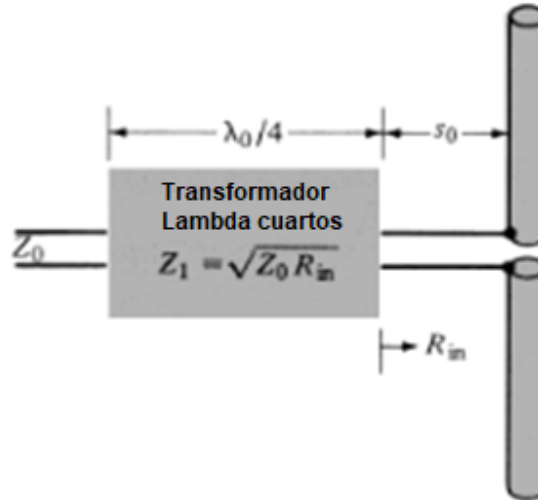
Fuente: BALANIS, Op. Cit., p. 524.

Transformador $\lambda/4$:

Esta técnica de acoplamiento depende de la impedancia de la antena, si la impedancia de la antena es netamente real, este acoplamiento se conectará

directamente a la antena, pero si la impedancia es compleja este se conectará a una distancia S_0 de la antena como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Acoplamiento por transformador de lambda cuartos.



Fuente: Ibíd., p. 524

La distancia del Transformador $\lambda/4$ (S_0) a la antena se opta para que la impedancia de entrada hacia la carga sea real. Para lograr una coincidencia entre las impedancias características se toma la ecuación mostrada en la figura 23 donde:

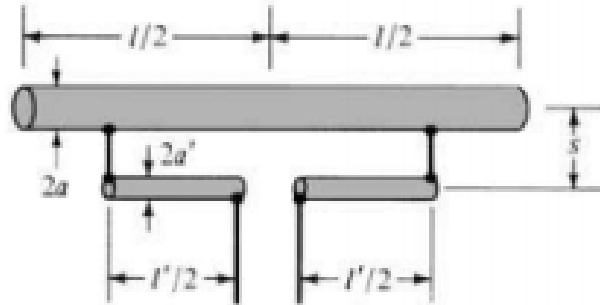
- Z_1 =Impedancia característica del acoplador;
- Z_0 =impedancia característica de la línea de transmisión;
- R_{in} =Impedancia de entrada hacia la carga.

Básicamente un Transformador $\lambda/4$ es otra línea de transmisión con la impedancia característica que se requiere.

T-Match:

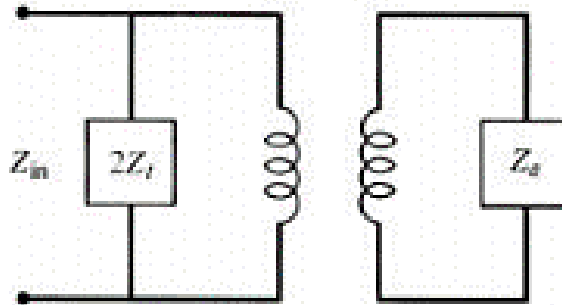
Esta configuración permite adaptar o acoplar impedancias de un menor valor, con impedancias de un mayor valor. Se trata de una conexión que en general tiene la forma de un dipolo como se muestra en la figura 24 y en la figura 25 su circuito equivalente.

Figura 24. Acoplamiento por T-match.



Fuente: Ibíd., p. 530.

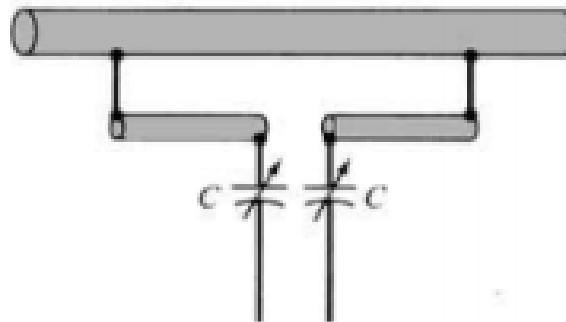
Figura 25. Circuito equivalente de T-match



Fuente: Ibíd., p. 530.

Para mejorar esta configuración se agregan dos capacitancias como se muestra en la figura 26, las cuales anularan las inductancias de las barras agregadas.

Figura 26. Mejoras a la configuración de T-match.



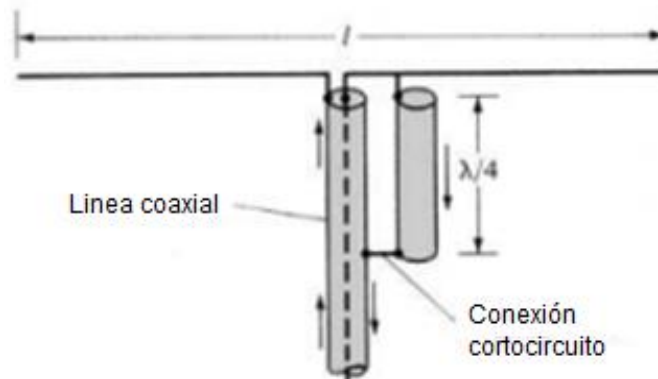
Fuente: Ibíd., p. 530.

GAMMA Match:

La configuración Gamma Match se usa para acoples que se necesitan para potencias relativamente altas. Son usadas frecuentemente para el acople de antenas dipolo y para los arreglos Yagi-Uda. Para realizar teste arreglo se tiene que

extremo al blindaje de la línea coaxial principal y por el otro extremo conectado a un lado del elemento radiante como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Acoplamiento por Balun $\lambda/4$.

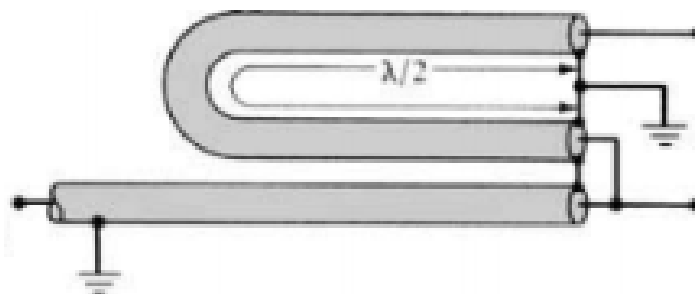


Fuente: Ibíd., p. 540.

Balun coaxial $\lambda/2$:

Como el anterior este tipo de Balun se usa para UHF y VHF. Se diferencia por su tipo de conexión y por la longitud que cambia de $\lambda/4$ a $\lambda/2$. La conexión consiste en conectar ambos extremos a la antena y conectar el blindaje entre cada extremo. La línea principal también irá conectada a la antena y el blindaje de esta se conectará al blindaje del Balun como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Acoplamiento por Balun $\lambda/4$.

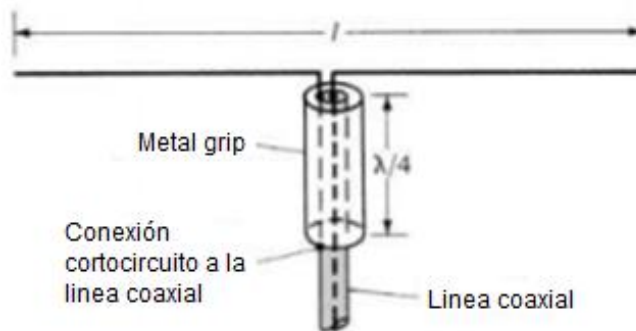


Fuente: Ibíd., p. 541.

Balun Bazooka:

Este Balun consta de una pequeña empuñadura de metal de un tamaño de $\lambda/4$ el cual tiene que estar cortocircuitado en un extremo, esta pequeña empuñadura encapsulara la línea coaxial como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Acoplamiento por Balun Bazooka.



Fuente: Ibíd., p. 540.

1.7.3. MARCO LEGAL

El gobierno Colombiano desde el año 2000 identificó la promoción de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) como un mecanismo fundamental para crear territorios y sociedades más competitivas e incluyentes³⁹. La implementación de TIC en Colombia representa un continuo esfuerzo, lo que se genera a partir de políticas públicas a largo plazo.

En la Ley No. 1341 del 30 de Julio de 2009, “por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones –TIC–, se crea la Agencia Nacional del Espectro y se dictan otras disposiciones”. En el título IV, se promueve el acceso y uso de las tecnologías de la información y las comunidades, fomentando el emprendimiento en establecimientos educativos con alto contenido en innovación.

En la Resolución No. 711 del 11 de octubre de 2016, “por la cual se establecen las bandas de frecuencia de libre utilización dentro del territorio nacional y se derogan algunas disposiciones”. En donde se nombra la Constitución Política de Colombia, que dicta, que el espectro electromagnético es un bien público inajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado. La resolución tiene por objeto establecer las bandas de frecuencia de libre utilización dentro del territorio nacional, conforme en lo dispuesto en el artículo 11 de la Ley 1341 de 2009. Los parámetros técnicos, modos de operación en las bandas, aplicaciones, bandas restringidas, límites generales para radiadores intencionales y excepciones a los límites generales, así como describir las condiciones técnicas y operativas de aplicaciones

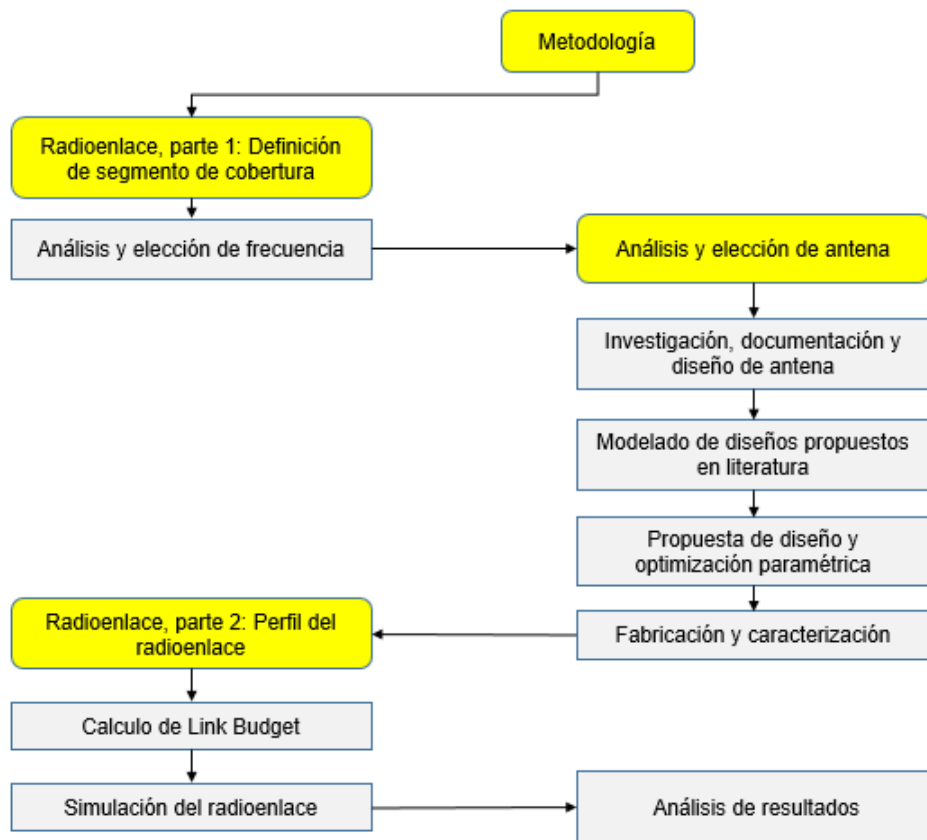
³⁹ VALENCIA, Diana. Implementación de tecnologías de la información y las comunicaciones (tic) en Colombia. En: Revista de derecho, comunicaciones y nueva tecnología. 22 de octubre de 2015. Vol. 14, no. 13, p. 82.

específicas que por su naturaleza requieren condiciones especiales de operación. En base a estos documentos, se estableció la banda de frecuencia para el enlace entre las Universidades, así como algunos parámetros técnicos y métodos de operación, que exige la Ley Colombiana.

1.8. METODOLOGÍA

En la figura 31, se puede observar parte de la metodología para el desarrollo del Trabajo de grado.

Figura 31. Metodología del proyecto



Fuente: Elaboración propia

1.8.1. Diseño metodológico:

Este trabajo de grado se basa en el diseño de un radioenlace punto a punto, enfocándose en el diseño de una antena para este fin. Para lo cual se siguieron las siguientes etapas:

- **Radioenlace, parte 1: Definición de segmento de cobertura:**

En esta etapa, se realizará el estudio inicial del radioenlace, en donde se determinó las ubicaciones de las estaciones terminales en cada universidad. Por medio del sistema de simulación en línea de la ANE y la plataforma online Radio Mobile, se determinó la distancia del radioenlace, mediante un estudio cartográfico y un mapeo de las zonas elegidas, así como también se señalaron las obstrucciones presentes en el sistema.

- **Análisis y elección de frecuencia:**

En esta etapa, se realizará una investigación de las normas técnicas nacionales e internacionales para determinar la frecuencia a la cual manejar el radioenlace. Fundamentalmente la Ley 1341 de 2009 (referencia) y la Resolución 711 de 2016 a nivel nacional y las recomendaciones de la UIT (referencia), la IEEE (referencia) y la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (referencia) a nivel internacional, en cuanto radioenlaces fijos punto a punto.

- **Análisis y elección de antena:**

En esta etapa se verificarán los tipos de antena para radioenlaces punto a punto, sus ventajas y características para realizar la mejor elección a desarrollar.

- **Investigación, documentación y diseño de la antena:**

En esta etapa se realizará una investigación en la literatura sobre los diseños existentes para la antena elegida, realizando un compendio de estos.

- **Modelado de diseño propuestos en literatura:**

En esta etapa, basados en la elección de la antena, se profundiza sobre el diseño de estas antenas, realizando un estado del arte y realizando la simulación de estos para observar sus características como lo son el parámetro S_{11} , ROE y ganancia.

- **Propuesta de diseño y optimización paramétrica:**

En esta etapa, se toma en consideración los parámetros de diseño del punto anterior y se propone uno nuevo, en donde se pueda mejorar el parámetro S_{11} sin perjudicar la ganancia. Para esto se realiza en el software de ANSOFT ANSYS HFSS 2018

una sábana de medidas paramétricas, que se simulan y optimizan obteniendo un modelo viable.

- **Fabricación y caracterización:**

En esta etapa, basado en el modelo anterior y varias alternativas, se realizó la fabricación de la antena, los materiales usados y los ajustes requeridos se especifican en detalle más adelante. Se realizaron medidas para el elemento radiante y la antena final en el VNA de la Universidad Católica de Colombia, para posteriormente llevar a cabo una completa caracterización en la cámara anecoica en la Universidad de los Andes.

- **Radioenlace, parte 2: Perfil del radioenlace:**

En esta etapa se terminan de realizar los cálculos requeridos para un radioenlace, cálculos como la pérdida de la trayectoria en el espacio libre, cálculos de ganancia y confiabilidad del sistema, zona de Fresnel y Link Budget. Se determinará la altura de las antenas, y soluciones posibles a la obstrucción presente.

- **Simulación del radioenlace:**

Con los parámetros medidos de la antena, los valores calculados y las alturas de las antenas, se realiza la simulación del radioenlace en el sistema de simulación en línea de la ANE, obteniendo otras características como frecuencias interferidas e interferentes, así como un reporte del enlace configurado.

- **Análisis de resultados:**

Se realizará la comparación de datos del simulador y los de la antena caracterizada, la verificación de cálculos para el Link Budget y principales características del proyecto.

1.8.2. Impacto y resultados esperados

Se espera obtener una antena con una ganancia adecuada, que cumpla unos estándares de diseño optimizados, en comparación a otros encontrados en la literatura. También se espera entregar una metodología de diseño y simulación para radioenlaces punto a punto y antenas, en donde se genere interés en este campo académico de la ingeniería para usos prácticos. Resaltar la importancia de elegir la frecuencia a la cual diseñar enlaces siguiendo recomendaciones nacionales e internacionales, dándole un buen uso al espectro como recurso escaso, así como la viabilidad del tipo de antena a elegir dentro de una gran cantidad de opciones, considerando sus medidas y materiales de fabricación, como un incentivo a trabajar esta problemática más a fondo.

2. DESARROLLO

2.1. Radioenlace, parte 1: Definición de segmento de cobertura

En esta sección se estudiaron las ubicaciones para el radioenlace, al contar la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes con bastantes edificios en los cuales ubicar la antena, sin tener en cuenta algún detalle en cuanto a permisos de construcción y sus relacionados ya que este radioenlace solo será simulado con el propósito y fin de diseñar antenas.

En la Universidad Católica de Colombia, se optó por utilizar como estación terminal el edificio de la sede 4, ubicado en la carrera 13 con calle 47 como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Ubicación Edificio sede 4, Universidad Católica de Colombia.



Fuente: Google Maps, [en línea]. Bogotá: zona Chapinero [citado el 19 de abril de 2018]. Disponible en internet: <<https://www.google.com/maps/@4.6344691,-74.0661218,18.75z>>

En la Universidad de los Andes, se optó por utilizar como estación terminal el edificio Julio Mario Santo Domingo, ubicado en la calle 21 No 120 como se muestra en la figura 33.

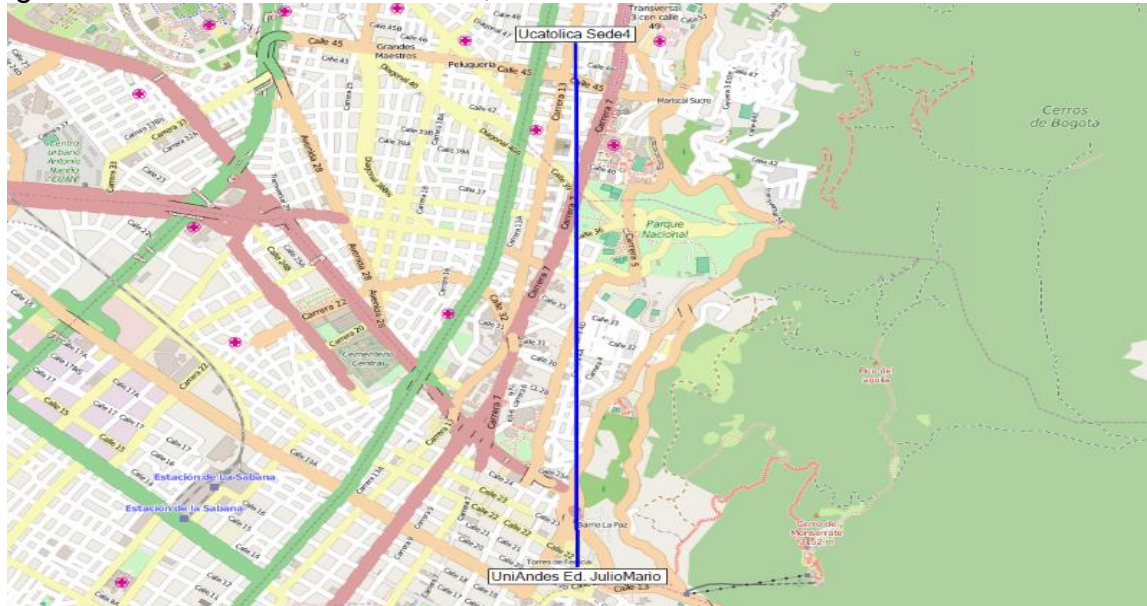
Figura 33. Ubicación Edificio Julio Mario Santo Domingo. Universidad de los Andes.



Fuente: Google Maps, [en línea]. Bogotá: zona Chapinero [citado el 19 de abril de 2018]. Disponible en internet: < <https://www.google.com/maps/@4.6041061,-74.0660323,18.42z>>

La elección tomo en cuenta los edificios más altos, considerando que se va a tener bastantes obstáculos en la línea de vista, debido a los edificios existentes en una zona urbana como Bogotá, siendo la altura de las antenas un factor fundamental al momento de simular el radioenlace. Estas direcciones son ingresadas al software Radio Mobile y al sistema de simulación en línea de la ANE, sin considerar parámetro otro alguno, la idea es obtener algunos parámetros de las ubicaciones, como latitud longitud y la distancia del radioenlace, así como también los obstáculos presentes (ver figura 34 & Tabla 2).

Figura 34. Ubicación de terminales, Radio Mobile.



Fuente: Elaboración propia en Radio Mobile.

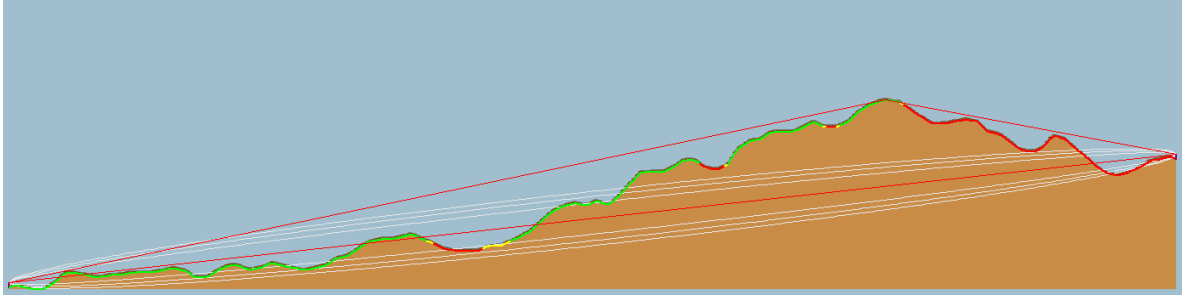
Tabla 2. Resumen de características de ubicaciones de las terminales.

	Universidad Católica, Sede 4	Universidad de los Andes, Ed. Julio Mario Santo Domingo
Latitud (°)	4.634209	4.604331
Longitud (°)	-74.06584	-74.065801
Elevación del terreno (m)	2578.8	2632.9
Azimut (°)	179.91 TN 186.93 MG	359.91 TN 6.92 MG
Distancia (km)	3.322	

Fuente: Elaboración propia.

En el estudio de relieves que se presenta en Radio Mobile, se visualiza un gran obstáculo (ver figura 35) el cual niega la línea de vista, como parte de la base de los cerros orientales.

Figura 35. Perfil geográfico del radioenlace.



Fuente: Elaboración propia en Radio Mobile.

Ya conocida la distancia, se hará un breve estado del arte en cuanto a frecuencias punto a punto, y así poder determinar la que más se adecue a la situación.

2.2. Análisis y elección de frecuencia:

La planeación del uso de frecuencias es un factor fundamental al momento de llevar a cabo una comunicación inalámbrica, ya que el espectro como recurso escaso requiere de un uso eficiente y debe compartirse entre varias aplicaciones.

El organismo internacional encargado de asignar y coordinar las frecuencias para su uso, es la Unión Internacional de Telecomunicaciones, de ahora en adelante UIT; y una de sus filiales encargadas de los asuntos de los sistemas de radio por microondas es el UIT-R (agencia de radiocomunicaciones). Cada país tiene su propio sector de regulación de espectro, como en Estados Unidos que existe la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), o en el Reino Unido, que existe la oficina de comunicaciones (Ofcom). En Colombia la entidad encargada es la Agencia Nacional del Espectro (ANE).

Generalmente, se puede dividir el espectro de frecuencia de microondas en las siguientes bandas⁴⁰:

- Menos de 3GHz: Muchos enlaces de microondas analógicos (UHF), todavía se utilizan en la banda de 400MHz, ahora con la banda de 1.4GHz se utiliza para enlaces digitales de baja capacidad. En esta banda de frecuencias bajas, se pueden implementar enlaces incluso superiores a 100km, ya que los esquemas de modulación son más robustos y requiere menos requisitos de línea de visión. Como la longitud de onda es mayor, la precisión de la

⁴⁰ MANNING, Op. Cit., p. 478.

superficie de las antenas parabólicas solidas no es estricta, por lo que las antenas son mucho más baratas, aunque son más grandes.

- 3 – 11 GHz: En este grupo de frecuencias se despliegan enlaces de banda larga con capacidad media – alta; frecuencias de 4GHz, 6GHz, 7GHz y 11GHz son típicos. La banda de 5.8GHz se usa para enlaces sin licencia. Para este grupo se requiere una línea de visión completa, y se ven afectados por el desvanecimiento por trayectos múltiples. 50km se considera la longitud del enlace ideal, en donde se equilibra la facilidad de diseño y las complicaciones de despliegue.
- 13 – 18 GHz: Este grupo de frecuencias se usa para saltos cortos, y hay una enorme cantidad de espectro. Su principal problema es el efecto de desvanecimiento causado por la atenuación que genera la lluvia. Enlaces inferiores a 30km se pueden usar en la banda de 13GHz o 15GHz. Otras frecuencias como la de 18GHz, 23GHz, 26GHz, 32GHz o 38GHz se pueden usar para estos enlaces. La banda de 24GHz se utiliza para enlaces sin licencia.
- 60 – 90 GHz: Este grupo de frecuencias se le conoce también como banda milimétrica (debido a su longitud de onda). Las bandas clave son las de 71 a 76GHz, 81 a 86GHz y 92 a 95GHz (bandas de 70, 80 y 90, respectivamente). La pérdida de ruta no es excesiva (aproximadamente 0.5 dB por km), por lo que son prácticos para distancias de unos pocos kilómetros. Cabe recalcar que en 23GHz existe un pico resonante, por lo que no existe una escala lineal de pérdidas hasta los 90GHz. 60GHz se utiliza para enlaces sin licencia.

En Estados Unidos, existe la Coalición de Comunicaciones para Enlaces Inalámbricos Fijos (FWCC), es una asociación de compañías, asociaciones e individuos interesados en las comunicaciones terrestres de microondas fijas. Es la organización más importante que representa los intereses de ambos, los usuarios y fabricantes fijos de microondas de punto a punto, y establece unas recomendaciones para frecuencias de estos radioenlaces.⁴¹

La Comisión Federal de Comunicaciones, estableció en la regulación de enlaces fijos punto a punto, dictado por la parte 101 del CFR 47 (Código Federal de Regulaciones)⁴² la tabla 3, donde referencias las bandas de frecuencias para enlaces fijos punto a punto, con sus respectivos operadores.

⁴¹ KIZER, Op. Cit., p. 175.

⁴²UNITED STATES. ELECTRONIC: CODE OF FEDERAL REGULATIONS. CFR 47 (10, May, 2018). National telecommunications and information administration, department of commerce. Part. 101. Disponible en: < <https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/technologies-systems-and-innovation-division/rules-regulations-title-47>>

Tabla 3. Bandas de Frecuencia, enlaces fijos punto a punto

Banda (GHz)	Rango de frecuencias (GHz)	Usuarios
2	1850 - 2690	FCC, NTIA, Canadá
2.4	2400 – 2483.5	FCC según CFR
4	3700 - 4200	FCC
5	4400 - 4940	NTIA
5.2	5150 - 5350	FCC según CFR
5.8	5725 - 5850	FCC según CFR
Inferior 6	5925 - 6425	FCC, Canadá
Superior 6	6525 - 6875	FCC
STL	6875 - 7125	FCC según CFR
7	7125 - 7725	NTIA, Canadá
8	7725 - 8500	NTIA, Canadá
10.5	10550 - 10680	FCC
11	10700 - 11700	FCC
CARS	12700 - 13250	FCC según CFR
15	14500 - 15350	NTIA, Canadá
18	17700 - 19700	FCC, NTIA
23	21200 - 23600	FCC, NTIA
LMDS	27500 - 31300	FCC, NTIA
38	38600 - 40000	FCC
60	57000 - 64000	FCC según CFR
70	71000 - 76000	FCC, NTIA
80	81000 - 86000	FCC, NTIA
90	92000 - 95000	FCC (licenciada y no licenciada), NTIA

Fuente: KIZER, Op. Cit., p. 665.

- FCC: Comisión Federal de Comunicaciones.
- NTIA: Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información.
- CFR: Código Federal de Regulación de EE.UU.

En todas las normatividades existen varias divisiones de frecuencias, como bandas particulares, que son de uso privativo; bandas licenciadas que se usan típicamente para enlaces punto a punto de gran capacidad, y requieren de un permiso dado por la ANE, se cobra su uso; y las bandas de libre utilización, en donde cualquier

persona puede transmitir sin necesidad de tener un permiso, pero si debe considerar los lineamientos exigidos en las normas⁴³.

El usar bandas no licenciadas trae una gran dinámica al momento de realizar proyectos, debido al coste de estas tecnologías y adopción masiva que tienen, los estándares como los de IEEE facilitan la creación de puntos de acceso bajo regulaciones y recomendaciones existentes, facilitando su implementación. Debido a esto y que la finalidad del proyecto es el de diseñar antenas, bajo un marco académico, se decidió utilizar una banda no licenciada para el radioenlace, buscando una frecuencia alta, debido a la distancia del enlace.

En Colombia, las bandas no licenciadas o de uso libre se rigen bajo la resolución 711 del 11 de octubre de 2016, la cual establece las bandas de frecuencia de libre utilización dentro del territorio nacional⁴⁴. También conforme al Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNAF), las notas colombianas establecen:

CLM 5: Se establecen dentro del territorio nacional las bandas de frecuencia de libre utilización definidas en la resolución 711 de 2016, expedida por la Agencia Nacional del Espectro, así como las aplicaciones permitidas, parámetros técnicos, modos de operación, bandas restringidas, límites generales para radiadores intencionales, excepciones a los límites generales y condiciones técnicas y operativas de aplicaciones específicas que por su naturaleza, requieren condiciones especiales de operación.⁴⁵

En la resolución, se determina el límite de potencia o intensidad de campo para cada rango de frecuencias. Las bandas de 2400 a 2483.5 MHz (de ahora en adelante banda de 2.4GHz), de 5725 a 5850 MHz (de ahora en adelante banda de 5.8GHz) y 24.05 a 24.25 GHz (de ahora en adelante banda de 24GHz), especifican que no requieren una reducción de potencia, en caso de ser usados para enlaces punto a punto. Estas bandas están incluidas en la Tabla 3, por lo que son firmes candidatas para el radioenlace.

Decisión:

Observando las recomendaciones de Manning⁴⁶, la banda ideal para nuestro proyecto, teniendo en cuenta la distancia y parámetros de diseño, sería la banda de 24GHz. A pesar de esto, se descarta su uso para el diseño de la antena, porque no

⁴³ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Resolución 711. Op. Cit., p. 13.

⁴⁴ *Ibíd.*, p. 5.

⁴⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencia. Op. Cit. p. 99.

⁴⁶ MANNING, Trevor. Microwave Radio Transmission Design Guide. 2da Edición. Boston: Artech House, 2009, p. 217.

se cuenta con el equipo necesario para caracterizarla y esta limitación obligaría al proyecto a entregar solo resultados simulados. Entonces debido a la limitación de equipos, se descarta la banda de 24GHz.

Para las bandas restantes, cada una tiene sus ventajas y desventajas en donde la banda de 2.4GHz tiene una mejor tolerancia a los obstáculos, en comparación con la de 5.8GHz, dado que es una frecuencia más baja. Así mismo la banda de 2.4GHz, solo cuenta con tres canales no sobrepuestos, y es una banda muy congestionada, al ser la banda utilizada para comunicaciones por Wi-Fi, tiene una mayor zona de Fresnel, que no es favorable, dado que nuestro enlace cuenta con un gran obstáculo natural en el camino.

La banda de 5.8GHz cuenta con una menor zona de Fresnel, que resulta ser muy favorable y tiene mucha menos interferencia de otras fuentes, pero es más intolerante a los obstáculos, como árboles o muros, en comparación a la banda de 2.4GHz. Bajo estas circunstancias, se determinó que la banda indicada para el radioenlace, es la de 5.8GHz, al ser menos congestionada, tener una zona de Fresnel menor y ser una alta frecuencia (véase tabla 4).

En la industria se encuentran equipos para el funcionamiento de esta frecuencia, en enlaces de corta distancia, los cuales serán descritos en la parte 2 del radioenlace, realizando una recomendación de equipo, que cumpla con las características de la frecuencia seleccionada y la distancia indicada.⁴⁷

Tabla 4. Fragmento de tabla de bandas libres: Excepciones a los límites generales.

Banda (MHz)	Aplicación	Límite de potencia o intensidad de campo
5725 - 5850	WAS / RLAN	Potencia de salida máxima del transmisor: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de salto de frecuencia: 1W. • Sistemas que utilicen modulación digital 1W.

Fuente: COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Resolución 711. Op. Cit., p. 26.

⁴⁷ ERC RECOMMENDATION. Recommendation adopted by the frequency management, regulatory affairs and spectrum engineering working groups. European Radiocommunications Committee. 22 de Agosto de 2011. Disponible en: <https://www.cept.org/Documents/srd/mg/933/Info_6_ERC_REC_70-03_August_2011>

Entrando más en detalle de la frecuencia seleccionada, la resolución 711 indica⁴⁸:

En caso de emplearse antenas de transmisión direccionales de mas 6dBi, la potencia máxima de salida del transmisor deberá ser reducida en la cantidad de dB que la antena exceda los 6dBi. Los sistemas que operen en la banda de 5.8GHz que sean utilizados exclusivamente para operaciones fijas punto a punto, pueden emplear antenas de transmisión con ganancia direccional mayor a 6dBi sin la correspondiente reducción en la potencia máxima de salida del transmisor. La operación punto a punto excluye el uso de sistemas punto multipunto, aplicaciones omnidireccionales y múltiples transmisores co-localizados transmitiendo la misma información.

Condición especial: Se establecen las bandas de frecuencia y condiciones operativas para los sistemas de acceso inalámbrico (WAS) y redes inalámbricas de área local (WLAN) que empleen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digita de banda ancha, baja potencia y corto alcance.

Condiciones generales de operación en las bandas de 5725 a 5850 MHz:

La potencia de transmisión pico debe ser medida sobre cualquier intervalo de transmisión continua, utilizando instrumentación calibrada en términos de un voltaje RMS equivalente. Las mediciones de emisión deberán ser efectuadas utilizando una resolución mínima de ancho de banda de 1 MHz. Una resolución de ancho de banda más baja puede ser empleada cerca del borde de la banda cuando sea necesario, siempre y cuando la energía medida sea integrada para mostrar la potencia total sobre 1 MHz.

Emisiones indeseadas por debajo de 1 GHz deben cumplir con los límites generales de intensidad de campo menores a 500 micro-voltios/metro a 3 metros de distancia. Cuando se midan los límites de emisión, la frecuencia portadora nominal deberá ser ajustada tan cerca de los bordes de los bloques de frecuencia superior e inferior como el diseño del equipo permita.

El dispositivo deberá interrumpir automáticamente la transmisión en caso de ausencia de información a transmitir o en caso de falla operacional. Estas disposiciones no tienen la intención de impedir la transmisión de la información de control o señalización o el uso de códigos repetitivos utilizados por ciertas tecnologías digitales para completar los intervalos entre tramas o ráfagas.

Los operadores y fabricantes de los dispositivos que operan en estas bandas de frecuencia son responsables de asegurar una estabilidad de frecuencia tal que una emisión sea mantenida dentro de la banda de operación bajo todas las condiciones de operación.

⁴⁸ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Resolución 711. Op. Cit., p. 39.

Condiciones específicas de operación en la banda:

Los sistemas de salto de frecuencia tendrán frecuencias portadoras por canal de salto separadas como mínimo por el mayor valor entre 25 kHz y el ancho de banda del canal a 20 dB. El sistema saltará a los canales de frecuencias que sean seleccionados a la velocidad de salto del sistema, de una lista de frecuencias de salto ordenada pseudo-aleatoriamente. Cada frecuencia se debe utilizar igualmente en promedio por cada transmisor. Los receptores del sistema harán coincidir sus anchos de banda de entrada con los anchos de banda del canal de salto de sus transmisores correspondientes y cambiarán frecuencias en sincronización con las señales transmitidas.

Los sistemas de salto de frecuencia deberán usar por lo menos 75 frecuencias de salto. El ancho de banda máximo permitido a 20 dB del canal de salto corresponde a 1 MHz. El tiempo promedio de ocupación de cualquier frecuencia no deberá ser mayor a 0.4 segundos dentro de un periodo de 30 segundos. Los sistemas que utilizan técnicas de modulación digital pueden operar en esta banda y su ancho de banda mínimo a 6 dB debe ser de por lo menos 500 kHz.

La máxima potencia pico conducida de salida del transmisor no excederá de lo siguiente:

- Para todos los sistemas de salto de frecuencia: 1 W
- Para sistemas que utilicen modulación digital: 1 W. Como alternativa a la medición de potencia pico, el cumplimiento con el límite de 1 W puede basarse en una medición de la potencia de salida máxima conducida.
- Si se emplean antenas de transmisión de ganancia direccional mayor a 6 dBi, la potencia conducida de salida del transmisor deberá ser reducida, como sea apropiado, por la cantidad en dB que la ganancia direccional de la antena exceda los 6 dBi.
- Los sistemas que sean utilizados exclusivamente para operaciones fijas punto a punto pueden emplear antenas de transmisión con ganancia direccional mayor a 6 dBi sin la correspondiente reducción en la potencia conducida de salida del transmisor.
- La operación fija punto a punto excluye el uso de sistemas punto a multipunto, aplicaciones omnidireccionales y emisores co-localizados transmitiendo la misma información.

Límites de Emisiones Indeseadas: Las emisiones máximas fuera de las bandas de frecuencia de operación deberán ser atenuadas de acuerdo con los siguientes límites:

Para transmisores que operen en la banda de 5725 a 5850 MHz: ninguna de las emisiones dentro del rango de frecuencia comprendido desde el borde de la banda hasta 10 MHz por encima o por debajo del borde de la banda, deberá exceder una PIRE de -17 dBm/ MHz; para frecuencias 10 MHz o más, por encima o por debajo del límite de la banda, las emisiones no deberán exceder una PIRE de -27 dBm/MHz.

Bajo estas restricciones, se procede a escoger y diseñar una antena de alta ganancia y directividad, que se ajuste a los parámetros establecidos en la resolución 711 de 2016.

2.2.1. Diseño de antena:

Basados en el marco conceptual, existen varios tipos de antenas, por lo que se realizara un estado del arte para antenas que resuenen en una frecuencia de 5.8GHz, escogiendo la más adecuada.

Las características que debe cumplir son:

- Frecuencia de resonancia: 5.725 – 5.850 GHz
- Ganancia: al menos 13 dBi

2.2.2. Investigación, documentación y elección de la antena:

La antena más simple es una antena dipolo, que es solo un elemento conductor a la mitad de la longitud de onda e irradia energía en todas las direcciones. Esta es la antena real más cercana a una antena isotrópica hipotética, que es una antena ideal que irradiaría potencia en un patrón esférico de forma equitativa en todas las direcciones. Una antena isotrópica teórica es una esfera, mientras que el dipolo tiene la forma de una rosquilla en tres dimensiones. Para radioenlaces de microondas punto a punto, normalmente se usan las antenas direccionales que tienen más potencia en la parte frontal de la antena que los lados de la antena.⁴⁹

En la gran mayoría, por no decir todos los enlaces en frecuencia de microondas punto a punto, se usan antenas basadas en reflectores parabólicos, para otros casos antenas Yagi, reflectores esquinados o incluso paneles.

La antena Yagi, como se explica en el marco conceptual, se basa en un elemento radiante básico como lo es el dipolo. Este viene acompañado de una serie de “directores”, que en algunas literaturas se les llama arreglo de dipolos, que no están energizados, pero que se irradian generando así una ganancia extra, también vienen acompañados de un elemento reflector (véase figura 36).

⁴⁹ GARCIA, Op. Cit., p. 84.

Las antenas parabólicas generalmente están construidas de aluminio, su fabricación varía dependiendo de las herramientas con las que se cuentan. Sus parámetros de diseño son estándar, y su foco se calcula de acuerdo a su perfil lateral parabólico.

Decisión:

A partir de esto, se toma la decisión de diseñar una antena Yagi-Uda, con el fin de poder desarrollar antenas inteligentes que hagan la función de rastreo de un vehículo en movimiento, conforme a su variabilidad de diseño, como lo es el radio de los elementos, longitud del dipolo y de sus elementos y el espaciado entre ellos; plantea un reto a nivel de ingeniería, debido a la cantidad de factores a tener en cuenta. Se espera que la optimización de estos parámetros, cumpla con las condiciones planteadas en este trabajo de grado. Al diseño regular de la antena Yagi, se le realizará el cambio del reflector, que no será longitudinal, se le pondrá en su lugar, un plato parabólico.

2.2.3. Investigación, documentación y diseño de antena:

El diseño de antenas Yagi-Uda ha recibido incontables y exhaustivas investigaciones analíticas y experimentales.⁵¹ Son muchos los autores que han tratado el diseño y características principales de estas antenas, se entrara en detalle de los más renombrados en la literatura, dando énfasis del análisis de la antena, funcionamiento general para el radiador y diseño general.

En los trabajos de grado referenciados, se encuentra que la mayoría de los diseños de antenas son del libro "Antenna Theory, Analisis and Design" de Balanis o también del libro "Antenas" de Cardama. A estas dos literaturas, se les agrega un aporte importante del libro "Modern Antenna Design" de Milligan. Se revisó también el libro de "Antenas, conceptos básicos simplificados de funcionamiento y diseño" de Jaime Artunduaga, que resulto siendo un resumen de lo expuesto por Balanis. A continuación, se entra en detalle de los diseños propuestos por estos autores.

En "Modern Antenna Design", de Thomas A. Milligan, detalla el procedimiento matemático para la relación entre la fase y la longitud de los elementos parásitos. Si se reduce la longitud del elemento de alimentación o se aumenta su diámetro, la línea divisora entre un director y un reflector se desplaza (ver figura 38).

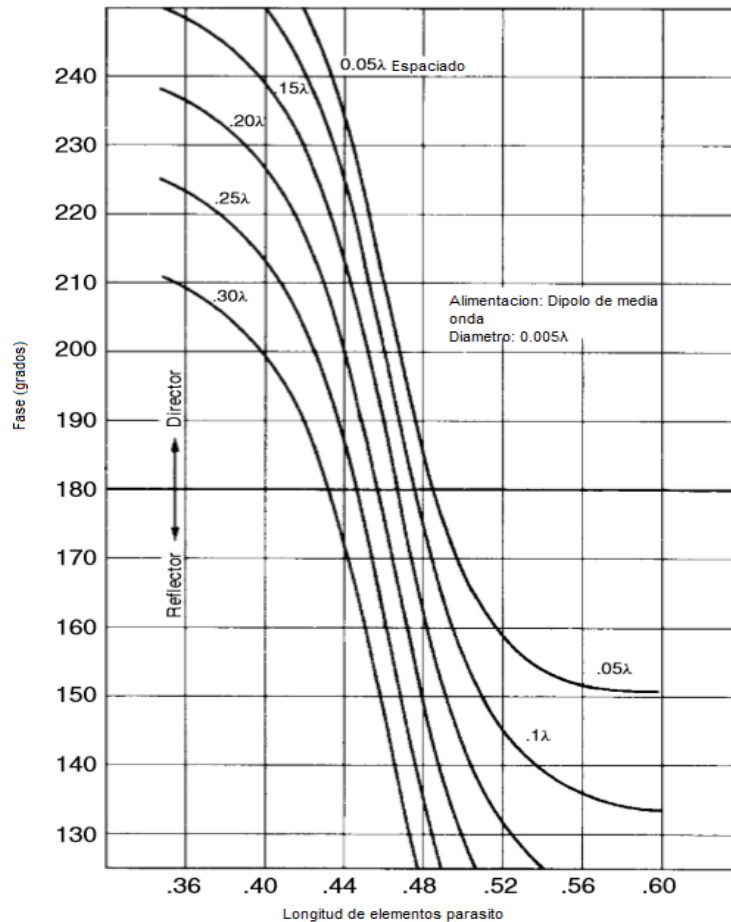
⁵¹ BALANIS, Op. Cit., p. 219.

En un diseño básico propuesto, de un reflector, un elemento radiante (dipolo de media onda) y un director, alimentado por una línea de 50Ω obtiene las siguientes características:

- Ganancia = 7.6dB
- Impedancia de entrada = $33 - j7.5$
- Ancho de haz plano (Campo E) = 64°
- Ancho de haz plano (Campo H) = 105°
- Relación delante/trasera = 18.6 dB
- VSWR = 1.57 (sistema de 50Ω)

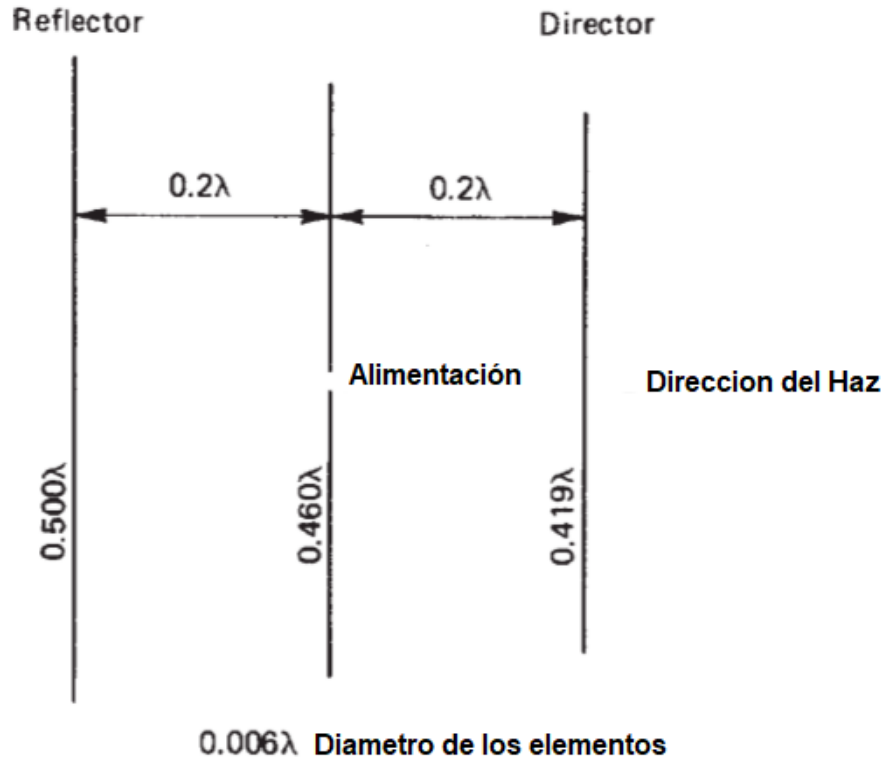
Con un acoplador de impedancias, se asegura que la ganancia aumenta 0.2dB, en 3dB el ancho de banda mejora un 15%

Figura 38. Fase de corriente en dipolo parasito relativo al dipolo conductor.



Fuente: MILLIGAN, Thomas. Modern antenna design. 2da Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, p. 389.

Figura 39. Diseño básico con un director, Milligan.



Fuente: Ibíd., p. 391.

Basados en el mismo análisis, usando integrales de Gauss-Legendre y el método de momentos, se computa las dimensiones de una antena Yagi con cuatro directores (ver figura 39). El término “Boom” se usa para identificar al elemento central que sostiene los demás elementos de la antena Yagi (Véase Tabla 5).

Tabla 5. Dimensiones antena Yagi con cuatro directores.

Elemento	Longitud (λ)	Ubicación a lo largo del Boom (λ)
Reflector	0.484	0
Dipolo	0.480	0.250
Director 1	0.434	0.400
Director 2	0.432	0.550
Director 3	0.416	0.700
Director 4	0.400	0.850
Diámetro de elementos = 0.01 λ		

Fuente: Ibíd., p. 489.

Con estos resultados de la tabla 5, se halla su frecuencia de trabajo normalizada, y factores de respuesta como ganancia máxima, relación delante/atrás, impedancia y ROE.⁵²

Posteriormente, presentan el diseño de una antena Yagi con trece directores, bajo el mismo método (ver tabla 6).

Tabla 6. Dimensiones antena Yagi con trece directores.

Elemento	Longitud (λ)	Espaciado (λ)
Reflector	0.4836	0.2628
Dipolo	0.4630	0.2188
Director 1	0.4448	0.2390
Director 2 a 13	0.4228	0.2838
Diámetro de elementos = 0.006 λ		

Fuente: *Ibíd.*, p. 490.

El diámetro del elemento afecta la longitud óptima de los elementos dipolo Yagi-Uda. En las tablas 7, 8 y 9 se muestran los resúmenes de los resultados obtenidos para optimizar la construcción de antenas, basados en el diámetro de los elementos, así mismo cual ajuste se le debe realizar para no tener pérdidas.

Tabla 7. Cambios en la longitud de los directores en una antena Yagi, para varios diámetros.

Diámetro de los directores (λ)	Cambio en la longitud de los directores (λ)	Diámetro de los directores (λ)	Cambio en la longitud de los directores (λ)
0.001	0.030	0.008	0.006
0.0012	0.029	0.009	0.002
0.0015	0.027	0.010	0
0.002	0.025	0.012	- 0.004
0.0025	0.023	0.015	- 0.010
0.003	0.021	0.020	- 0.018
0.004	0.017	0.025	- 0.024
0.005	0.014	0.030	- 0.029
0.006	0.011	0.040	- 0.038
0.007	0.008		

Fuente: *Ibíd.*, p. 491.

⁵² Fuente: *Ibíd.*, p. 489.

Tabla 8. Cambios en la longitud del reflector en una antena Yagi, para varios diámetros.

Diámetro del reflector (λ)	Cambio en la longitud del reflector(λ)	Diámetro del reflector (λ)	Cambio en la longitud del reflector(λ)
0.001	0.011	0.008	0.002
0.002	0.008	0.010	0
0.003	0.006	0.020	- 0.003
0.004	0.005	0.030	- 0.005
0.006	0.003	0.040	- 0.006

Fuente: Ibíd., p. 492.

Tabla 9. Cambios en la longitud del Boom en una antena Yagi, para varios diámetros.

Diámetro de los directores (λ)	Cambio en la longitud de los directores (λ)	Diámetro de los directores (λ)	Cambio en la longitud de los directores (λ)
0.002	0.0010	0.022	0.0158
0.004	0.0022	0.024	0.0173
0.006	0.0034	0.026	0.0189
0.008	0.0048	0.028	0.0205
0.010	0.0064	0.030	0.0220
0.012	0.0084	0.032	0.0236
0.014	0.0095	0.034	0.0252
0.016	0.0111	0.036	0.0265
0.018	0.0127	0.038	0.0283
0.020	0.0142	0.040	0.0299

Fuente: Ibíd., p. 492.

En la continuación, el autor presenta una variación a las antenas Yagi, con múltiples alimentaciones, y variando la forma de los elementos, pasando a cuadraturas resonantes y antenas de barra corrugadas.

En el libro de Antenas de Cardama⁵³, se hace referencia a las agrupaciones con elementos parásitos, la cuales analizan matemáticamente con un vector de tensiones, la matriz de impedancias por la cual la corriente circula por los elementos parásitos. La corriente que genera es inducida por la interacción con los demás elementos, por mutuas impedancias.

Con el adecuado diseño de los directores pueden conseguirse diagramas de radiación bastante directivos. Especifica que su configuración habitual es de un elemento activo, un reflector y entre uno y veinte directores.

⁵³ CARDAMA y JOFRE, Op. Cit., p. 176.

El elemento activo suele ser un dipolo doblado, con el fin de aumentar su ancho de banda. El reflector tiene una longitud 5% mayor a este y la de los directores entre 5 y 10% menor. Estos parámetros se resumen en la tabla 10:

Tabla 10. Dimensiones antena Yagi, Cardama.

Elemento	Longitud (λ)	Separación (λ)
Reflector	0.5 – 0.52	0.15
Directores	0.38 – 0.48	0.11

Fuente: Ibíd., p. 233.

Destaca las principales características de las antenas Yagi:

- La ganancia depende del dipolo $\lambda/2$ entre 5dB y 18dB. La ganancia está relacionada con la cantidad de directores, hasta un tope de 20. Se debe demostrar que cumple la condición de Hansen-Woodyard, donde la directividad es óptima.
- Relación delante/atrás entre 5 y 15dB, se mejora con la presencia de un reflector.
- Diferencia del lóbulo principal al bajo, entre 5 y 10dB. Este no es un parámetro crítico.
- Impedancia de entrada de aproximadamente 300ohmios, como consecuencia del uso de un dipolo doblado, se suele acoplar mediante un Balun coaxial.

Por ultimo en la bibliografía que se maneja en la mayoría de los trabajos, esta Antenna Theory, Analysis and Design de Constantine Balanis⁵⁴, su trabajo sobre antenas Yagi se desencanta por un análisis matemático, de procedimientos analíticos, el método de ecuaciones integrales para el método del momento, el patrón de campo lejano, una parte computacional y resultados, impedancia de entrada y técnicas de acoplamiento, procedimiento de diseño y optimización.

Típicamente, el elemento que resuena tiene una longitud de $\lambda/2$, que puede variar según el diámetro de este (usualmente 0.45 a 0.49 λ), mientras que la longitud de los directores varía entre 0.4 y 0.45 λ . Sin embargo, los directores no son necesariamente del mismo largo y diámetro.

La separación entre los directores es típicamente de 0.3 a 0.4 λ , y no es necesariamente uniforme para diseños óptimos. Se ha demostrado

⁵⁴ BALANIS, Op. Cit., p. 580.

experimentalmente que para una matriz Yagi-Uda de 6λ de longitud total, la ganancia total es independiente del espaciado entre directores de hasta 0.3λ .⁵⁵

Se observó una caída bastante significativa (5 a 7dB) en la ganancia para espaciamientos entre directores superiores a 0.3λ ⁵⁶. Para esa antena la ganancia fue independiente de los radios de los directores hasta 0.0024λ . La longitud del reflector es algo mayor que la de la alimentación. Además, la separación entre el elemento accionado y el reflector es algo menor que la separación entre el elemento accionado y el director más cercano, y se encuentra cerca del óptimo a 0.25λ .

Como la longitud de cada director es menor que su longitud de resonancia correspondiente, la impedancia de cada uno es capacitiva y su corriente conduce a la fuerza electromotriz inducida. De manera similar, las impedancias de los reflectores son inductivas y las fases de las corrientes son inferiores a las de las fuerzas electromagnéticas inducidas.

La fase total de las corrientes en los directores y reflectores no está determinada únicamente por su longitud, sino también por su separación de los elementos adyacentes. Por lo tanto, los elementos adecuadamente espaciados con longitudes ligeramente menores que sus longitudes de resonancia correspondientes (menores que $\lambda/2$) actúan como directores porque forman una matriz con corrientes aproximadamente iguales en magnitud y con los mismos desplazamientos de fase progresivos que reforzarán el campo del elemento energizado hacia los directores.

De manera similar, un elemento adecuadamente espaciado con una longitud de $\lambda/2$ o ligeramente mayor actuará como un reflector. Por lo tanto, una matriz Yagi-Uda puede considerarse como una estructura que soporta una onda móvil cuyo rendimiento está determinado por la distribución de corriente en cada elemento y la velocidad de fase de la onda progresiva. Cabe señalar que la discusión previa sobre la longitud de los directores, los reflectores y los elementos radiantes se basa en la primera resonancia. Las resonancias más altas están disponibles cerca de longitudes de λ , $3\lambda/2$, y así sucesivamente, pero rara vez se usan.

Se resume que para la antena Yagi-Uda, su rendimiento depende de la disposición del arreglo entre reflector y elemento radiante, el elemento radiante y los directores adecuadamente ubicados.

⁵⁵ CHENG, David y CHEN, C. A. Optimum element spacings for Yagi-Uda arrays. En: IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Septiembre, 1973. Vol. AP-21, no. 5, p. 618.

⁵⁶ UDA, Shintaro. Wireless Beam of Short Electric Waves. En: UDA, Institute of Electrical Engineers of Japan. Octubre, 1926. 1128, p. 1210.

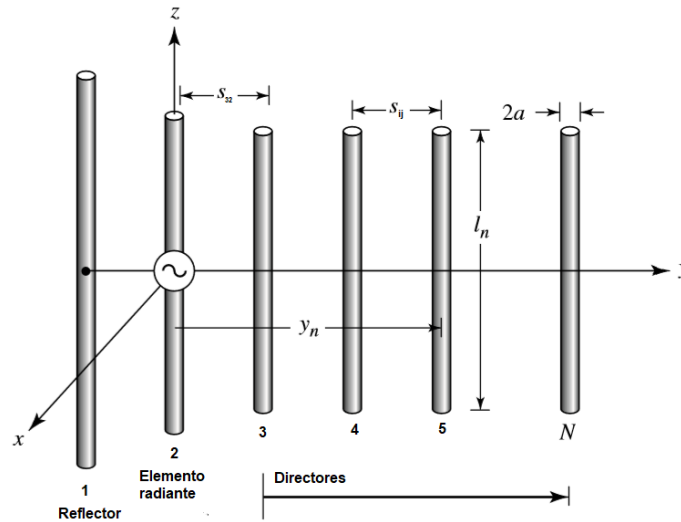
El espaciado entre el reflector y el elemento radiante en una matriz Yagi-Uda se usa para controlar los parámetros de impedancia de entrada, relación adelante/atrás y la directividad.

Optimización:

Se basa en estudios realizados por Cheng y Chen, para longitud óptima de los elementos de una antena Yagi-Uda⁵⁷ y el espaciado entre elementos óptimo para las mismas⁵⁸. Es innumerable la cantidad de variaciones que se puede realizar para estos ajustes en una antena Yagi. Tomando como ejemplo la optimización de la directividad de una antena Yagi de seis elementos (un reflector, un elemento radiante y cuatro directores).

Para el primer ejemplo se mantiene constante la longitud de los elementos, optimizando la separación entre elementos, resultados que se muestran en la siguiente tabla 11, en donde el elemento 1 es el reflector, 2 el dipolo y del 3 al 6 los directores. s_{21} , será la separación entre el reflector y el dipolo, se dejará fija la longitud de los elementos y se optimizará su espaciado (Véase figura 40).

Figura 40. Configuración Antena Yagi-Uda.



Fuente: RAMIREZ, Op. Cit., p. 249.

- N (factor de numero de directores)

⁵⁷ CHENG, David y CHEN, C. A. Optimum element lengths for Yagi-Uda arrays. Op. Cit., p. 10.

⁵⁸ CHENG, David y CHEN, C. A. Optimum element spacings for Yagi-Uda arrays. Op. Cit., p 616.

Tabla 11. Optimización de directividad para antena Yagi de seis elementos, varía espaciamento.

	s_{21}/λ	s_{32}/λ	s_{43}/λ	s_{54}/λ	s_{65}/λ	Directividad (dB)
Inicial	0.250	0.310	0.310	0.310	0.310	11.21
Optimizado	0.250	0.336	0.398	0.310	0.407	12.87
$l_1 = 0.51 \lambda, l_2 = 0.50 \lambda, l_3 = l_4 = l_5 = l_6 = 0.43 \lambda, radio = 0.003369\lambda$						

Fuente: BALANIS, Op. Cit., p. 590.

Por otro lado, también realiza la optimización ahora dejando fijos los parámetros del espaciamento, optimizando las longitudes de los elementos (véase tabla 12).

Tabla 12. Optimización de directividad para antena Yagi de seis elementos, varía longitud.

	l_1/λ	l_2/λ	l_3/λ	l_4/λ	l_5/λ	l_6/λ	Directividad (dB)
Inicial	0.510	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	10.93
Optimizado	0.472	0.456	0.438	0.444	0.432	0.404	12.16
$s_{21} = 0.25 \lambda, s_{32} = s_{43} = s_{54} = s_{65} = 0.31\lambda, radio = 0.003369\lambda$							

Fuente: ibíd., p. 590.

Para finalizar realiza una optimización de la totalidad de los elementos, variando su espaciamento y su longitud (ver tabla 13):

Tabla 13. Optimización de directividad variando todos los elementos.

	l_1/λ	l_2/λ	l_3/λ	l_4/λ	l_5/λ	l_6/λ	s_{21}/λ	s_{32}/λ	s_{43}/λ	s_{54}/λ	s_{65}/λ	Directividad (dB)
Inicial	0.510	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	0.250	0.310	0.310	0.310	0.310	11.21
Opt. s_{ij}	0.51	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422	12.83
Opt. Final	0.472	0.452	0.436	0.430	0.434	0.430	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422	13.41

Fuente: ibíd., p. 591.

Diseño:

El autor se basa en el documento de Peter Vierzicke, del departamento de comercio de los Estados Unidos⁵⁹. En este documento se especifican en detalle el procedimiento de diseño de antenas Yagi. Cabe resaltar que presento primero la parte de optimización debido a los parámetros dados de diseño variable, no obstante, la guía que se muestra en la nota técnica.

Este documento proporciona datos exhaustivos de investigaciones experimentales llevadas a cabo por el autor para determinar cómo el diámetro del elemento reflector, la longitud del elemento radiante, las separaciones entre elementos, las barras de soporte de diferentes áreas transversales, diversos reflectores, y la longitud total, afecta la ganancia medida. Aunque no proporciona todos los diseños posibles, da una idea detallada de los pasos a seguir en un diseño eficiente de antenas Yagi (Véase figura 41,42,43,44).

Numerosos datos gráficos se incluyen para facilitar el diseño de diferentes antenas de longitud para obtener la ganancia máxima. Los gráficos incluidos solo se pueden usar para diseñar matrices con longitudes globales (desde el elemento reflector hasta el último director) de 0.4 , 0.8 , 1.2 , 2.2 , 3.2 y 4.2λ con las directividades correspondientes de 7.1 , 9.2 , 10.2 , 12.25 , 13.4 y 14.2 dB, respectivamente, y con una relación de diámetro a longitud de onda de $0.001 \leq d/\lambda \leq 0.04$ (ver tabla 14).

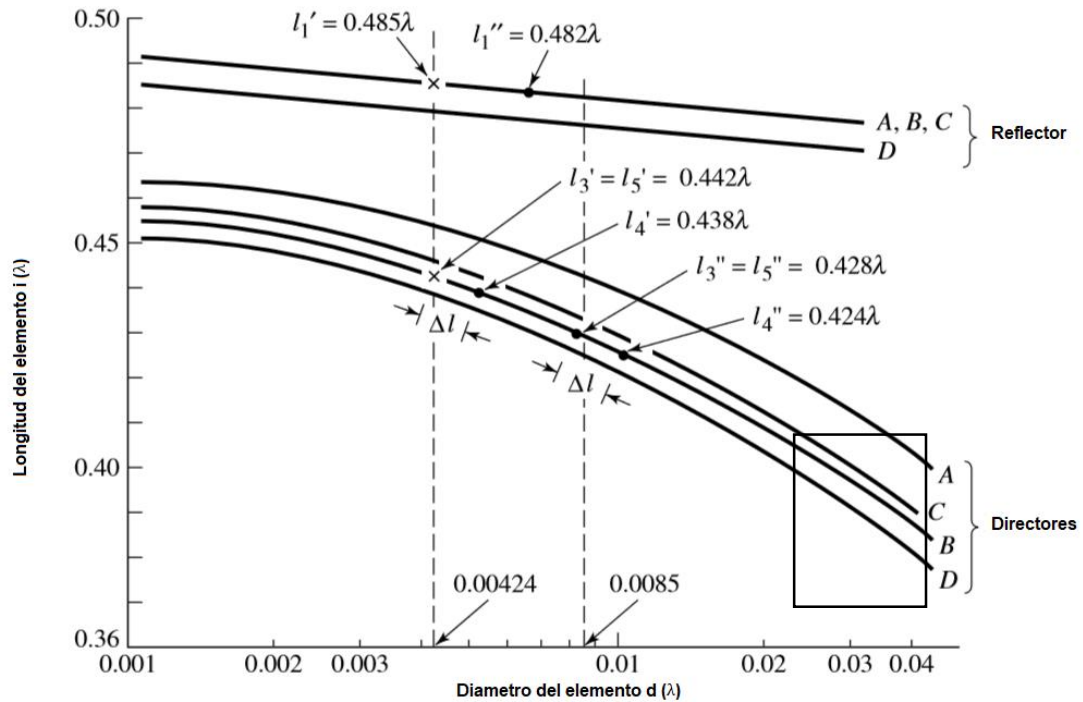
⁵⁹ VIEZBICKE, Peter. Yagi Antenna Design. NBS technical note 688. Boulder, Colorado: Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1976, p. 2.

Tabla 14. Longitud de elementos para antenas Yagi-Uda de seis longitudes diferentes.

Tipo Antena Yagi-Uda	A	B	C	D	E	F	
Longitud de la antena (λ)	0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2	
Longitud de reflector en (λ)	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475	
Directores							
Longitud de directores en (λ)	l_3	0.442	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
	l_4		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
	l_5		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
	l_6			0.428	0.398	0.398	0.407
	l_7				0.390	0.394	0.403
	l_8				0.390	0.390	0.398
	l_9				0.390	0.386	0.394
	l_{10}				0.390	0.386	0.390
	l_{11}				0.398	0.386	0.390
	l_{12}				0.407	0.386	0.390
	l_{13}					0.386	0.390
	l_{14}					0.386	0.390
	l_{15}					0.386	0.390
	l_{16}					0.386	0.390
	l_{17}					0.386	
	l_{18}					0.386	
Distancia entre directores en (λ)	0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308	
Ganancia relativa de dipolo de media onda en dB	7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2	
Curva de diseño	A	B	B	C	B	D	
$\frac{d}{\lambda} = 0.0085$			$s_{12} = 0.2\lambda$				

Fuente. ibíd., p. 7.

Figura 41. Curvas de diseño para determinar la longitud de los elementos en una antena Yagi.

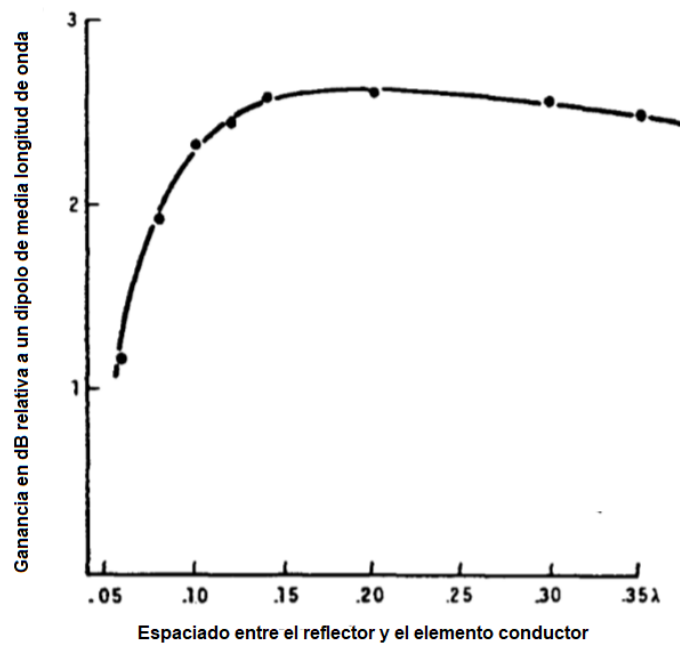


Fuente. *ibíd.*, p. 9.

Resumen de los efectos a tener en cuenta durante el diseño:

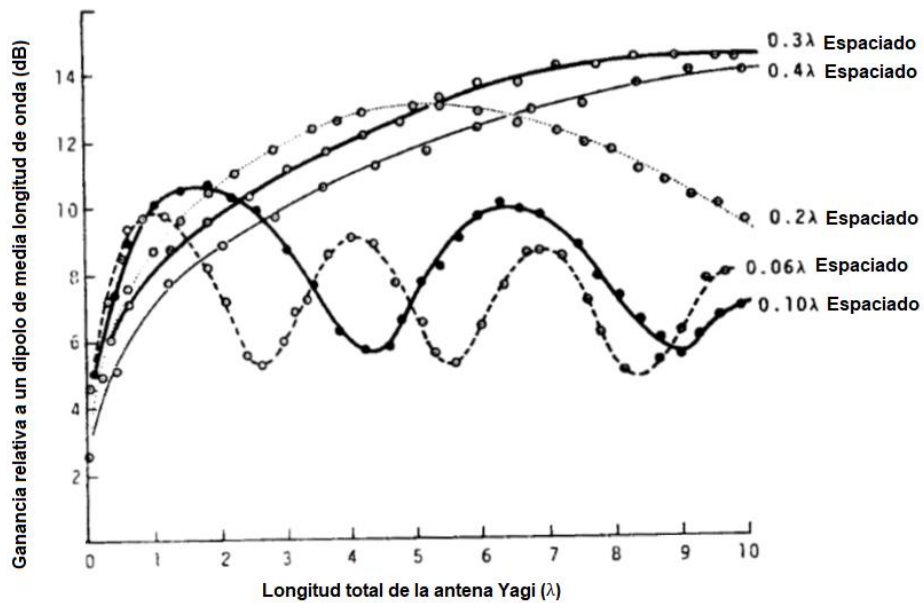
- Efecto del espaciado del reflector en la ganancia.
- Efecto de directores iguales y diferentes, su espaciado y su cantidad en la ganancia.
- Efecto de diferentes diámetros y longitudes de los directores en la ganancia.
- Efecto del tamaño del boom en el tamaño óptimo de las longitudes de los elementos.
- Efectos del espaciado y apilado de antenas en la ganancia.
- Diferentes patrones de radiación en diferentes antenas Yagi.

Figura 42. Efectos del espaciamento entre reflector y elemento radiante sobre la ganancia.



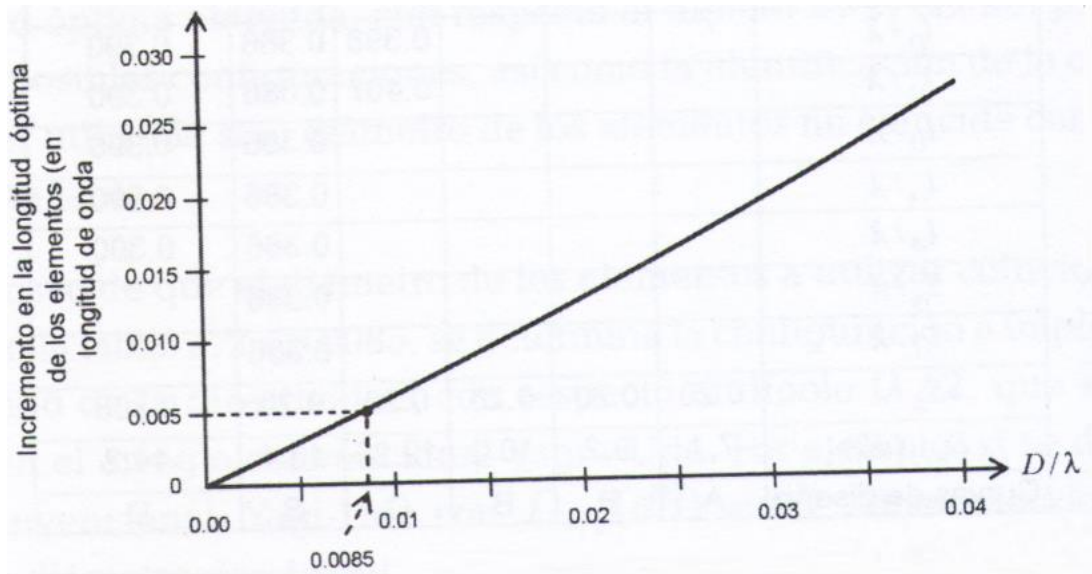
Fuente. *ibíd.*, p. 5.

Figura 43. Ganancia de una Yagi como función de espaciamientos constantes y longitud de 0.382λ



Fuente. *ibíd.*, p. 4.

Figura 44. Curvas de optimización, incremento de los elementos dependiendo del diámetro del boom.



Fuente. ibíd., p. 10.

2.2.4. Modelado de diseño propuestos en literatura:

De acuerdo a la información anterior, se realizó el diseño de una antena Yagi, siguiendo esos parámetros, se simuló en el software ANSOFT ANSYS HFSS®, y se revisaron sus características.

Con el fin de facilitar el diseño de una antena Yagi para este modelado, se tomará el valor de la máxima ganancia y directividad encontrada en las anteriores gráficas; el modelo propuesto por Vierzbicke fue realizado para antenas que resuenan a menos de 1GHz, por lo que también analizará como funciona esta guía en frecuencias superiores.

Parámetros:

- Frecuencia de operación: 5.8GHz, $\lambda = 5.17\text{cm}$
- Diámetro del elemento (tomado del recuadro de la figura 44) entonces $d = 1.8\text{mm}$
- $\frac{d}{\lambda} = 0.035$
- Diámetro del boom, $D = 2\text{mm}$
- $\frac{D}{\lambda} = 0.04$
- Espaciado de elementos, $0.3\lambda = 1.6\text{cm}$
- Longitud total, $4.2\lambda = 21.7\text{cm}$

Paso 1: A partir de la tabla 14 se obtienen la longitud de los elementos directores para 4.2λ , en donde se tendrán 13 directores, con las siguientes medidas (véase tabla 15):

Tabla 15. Longitudes de directores no compensados, Yagi modelada a 5.8GHz

Elemento	Longitud del director (λ)
l_3	0.424
l_4	0.424
l_5	0.420
l_6	0.407
l_7	0.403
l_8	0.398
l_9	0.394
l_{10}	0.390
l_{11}	0.390
l_{12}	0.390
l_{13}	0.390
l_{14}	0.390
l_{15}	0.390
l_{16}	0.390

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: De la figura 34, se obtiene el punto de curva de director, esta pasara a ser la longitud del director no compensada. Se toma la curva de diseño (D). En donde su valor es 0.385

Paso 3: Para la misma relación de radio, se determina la longitud del reflector. En este caso será aproximadamente 0.468. Longitud reflectora es 2.42cm

Paso 4: Se realiza el cruce con un compás, hasta establecer los puntos nuevos de cada director (véase tabla 16).

Tabla 16. Longitudes de directores medidos a partir del punto de corte, Yagi modelada a 5.8GHz

Elemento	Longitud del director (λ)
l_3	0.385
l_4	0.385
l_5	0.378
l_6	0.363
l_7	0.357
l_8	0.352
l_9	0.349
l_{10}	0.345
l_{11}	0.345
l_{12}	0.345
l_{13}	0.345
l_{14}	0.345
l_{15}	0.345
l_{16}	0.345

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5: De acuerdo a la figura 44 se obtiene la compensación por el boom, que para el caso de 0.04, la compensación será de 0.029 (véase tabla 17).

Tabla 17. Longitudes finales, Yagi modelada a 5.8GHz

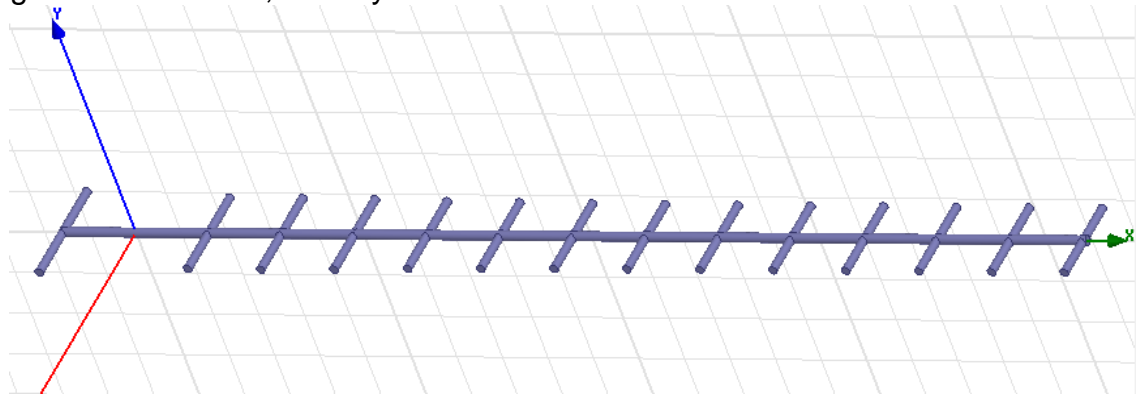
Elemento	Longitud (λ)	Longitud (cm)
Reflector (l_1)	0.468	2.42
Dipolo (l_2)	0.450	2.32
l_3	0.414	2.14
l_4	0.414	2.14
l_5	0.407	2.10
l_6	0.392	2.02
l_7	0.386	1.99
l_8	0.381	1.96
l_9	0.378	1.95
l_{10}	0.374	1.93
l_{11}	0.374	1.93
l_{12}	0.374	1.93
l_{13}	0.374	1.93
l_{14}	0.374	1.93
l_{15}	0.374	1.93
l_{16}	0.374	1.93

Fuente: Elaboración propia.

Con estas medidas de diseño, pasamos a crear la antena en el software ANSYS HFSS®.

El procedimiento de diseño, tiene una consideración más, el tamaño del gap. El gap es la alimentación de la antena, este gap tiene una medida, que puede variar y afecta la medición de la antena. Este punto será tratado más adelante. Se crean los elementos, 13 cilindros que harán la función de directores, un reflector y el elemento radiante (ver figura 45), se le asignan los valores anteriormente mencionados.

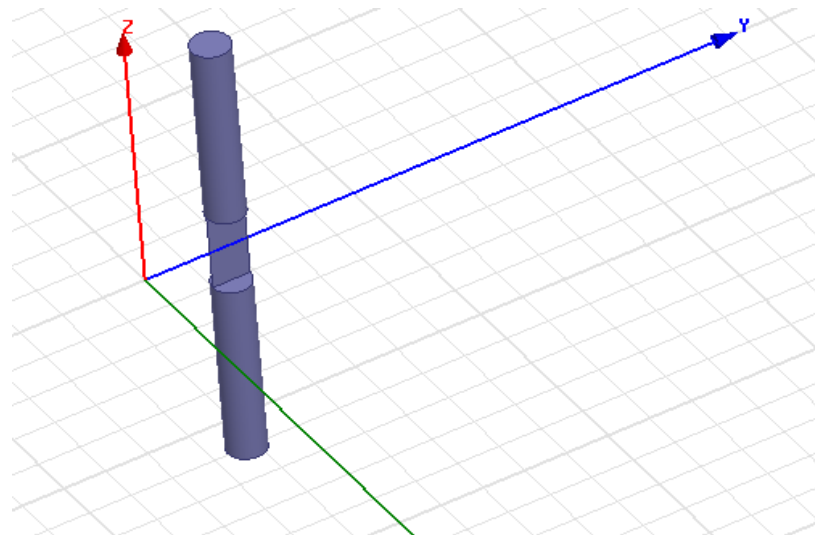
Figura 45. Reflector, boom y directores en HFSS.



Fuente: Elaboración propia.

Después se procede a crear el dipolo, es un dipolo sencillo el cual no debe tener contacto con la estructura ya establecida, por lo que se subirá 4mm (ver figura 46).

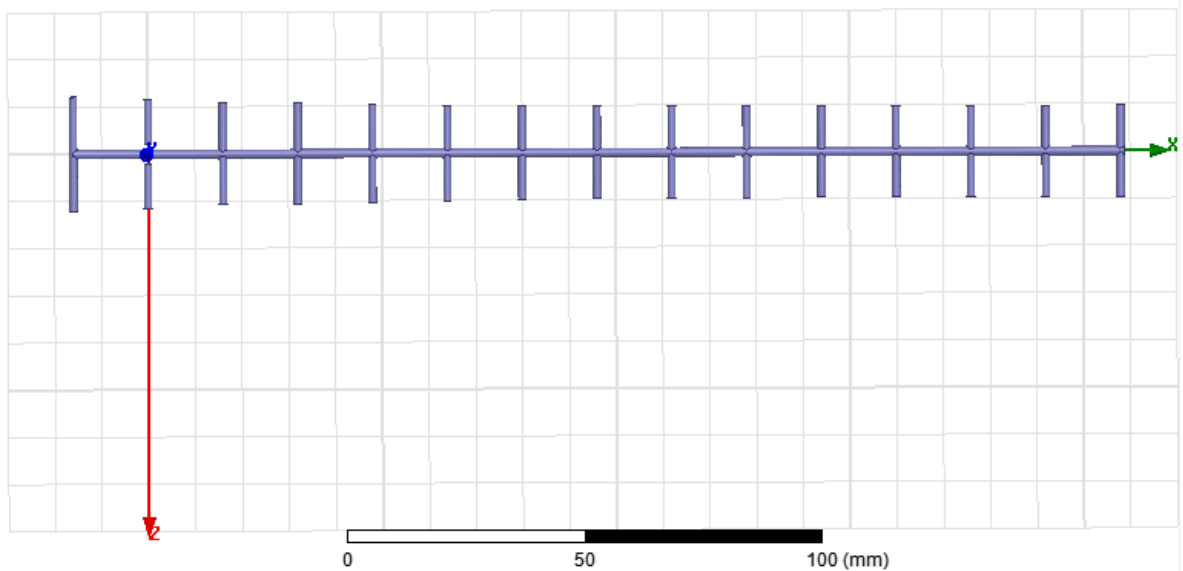
Figura 46. Dipolo del modelo en HFSS



Fuente: Elaboración propia.

El rectángulo que tiene en la mitad es el gap, se les agrega una excitación a 50 ohmios, y se agrega en la estructura (ver figura 47).

Figura 47. Antena Yagi completa modelo en HFSS



Fuente: Elaboración propia.

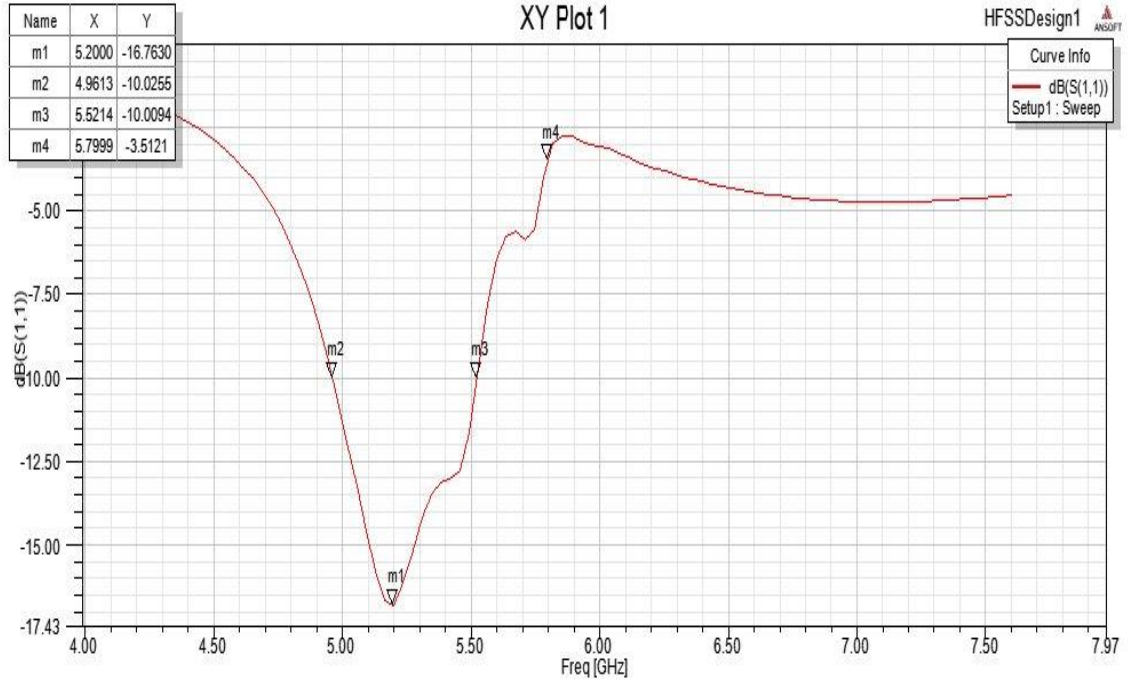
Ya terminada la estructura (ver figura 47), se le asigna el material, en este caso aluminio, se unen el boom, los directores y el reflector. Posteriormente se añade la estructura de radiación, que en este caso será de 30cm (aproximadamente 6λ). Se asigna la configuración de la solución a 5.8GHz con un máximo número de pasos en cuarenta. Se agrega un barrido de frecuencia de 4 a 7.6 GHz con un conteo de 200. Finalmente se añade una infinita esfera de radiación, normalmente se utiliza una caja para estas medidas de radiación, no obstante cualquier objeto sólido se puede utilizar para este fin.⁶⁰

La asignación de excitación al gap, configuración de solución, número de pasos, barrido de frecuencia y la esfera infinita de radiación, serán un factor constante a lo largo del diseño de este proyecto, por lo que se dará por hecho que estos pasos se realizaron de aquí en adelante.

El tiempo de simulación fue cercano a las 4 horas, arrojando los siguientes resultados: curvas de S_{11} (ver figura 48), VSWR (ROE) (ver figura 49), carta de Smith ver (figura 50), ganancia total (ver figura 51), directividad total (ver figura 52), y patrones de radiación (ver figura 53).

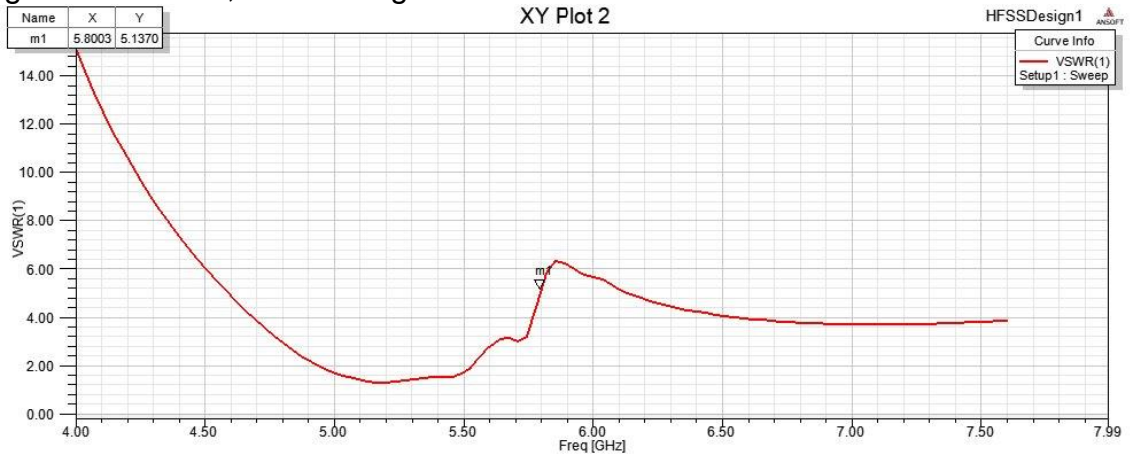
⁶⁰ ANSOFT Corporation, High Frequency Structure Simulator User's Guide, 2005, p. 51.

Figura 48. Parámetro S_{11} , antena Yagi modelada.



Fuente: Elaboración propia.

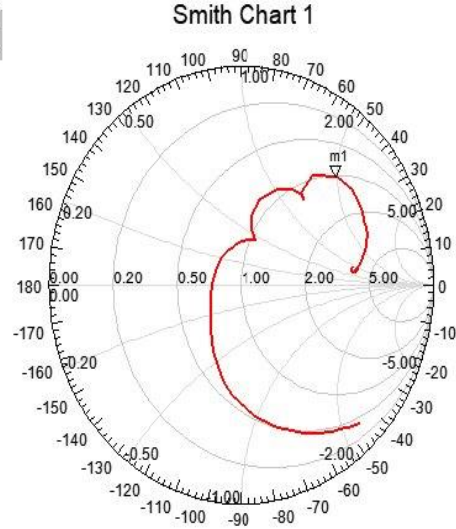
Figura 49. VSWR, antena Yagi modelada.




Fuente. Elaboración propia.

Figura 50. Carta de Smith, antena Yagi modelada.

Name	Freq	Ang	Mag	RX
m1	5.8182	44.8772	0.7081	1.0015 + 2.0071i



HFSSDesign1 

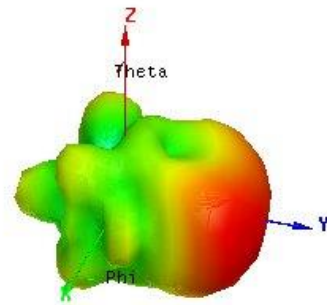
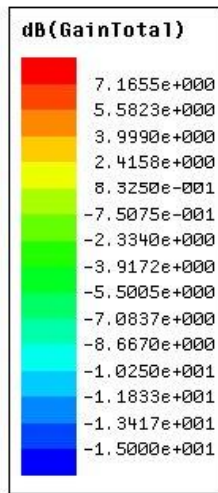
Curve Info

— S(1,1)

Setup1: Sweep

Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Ganancia total, antena Yagi modelo.



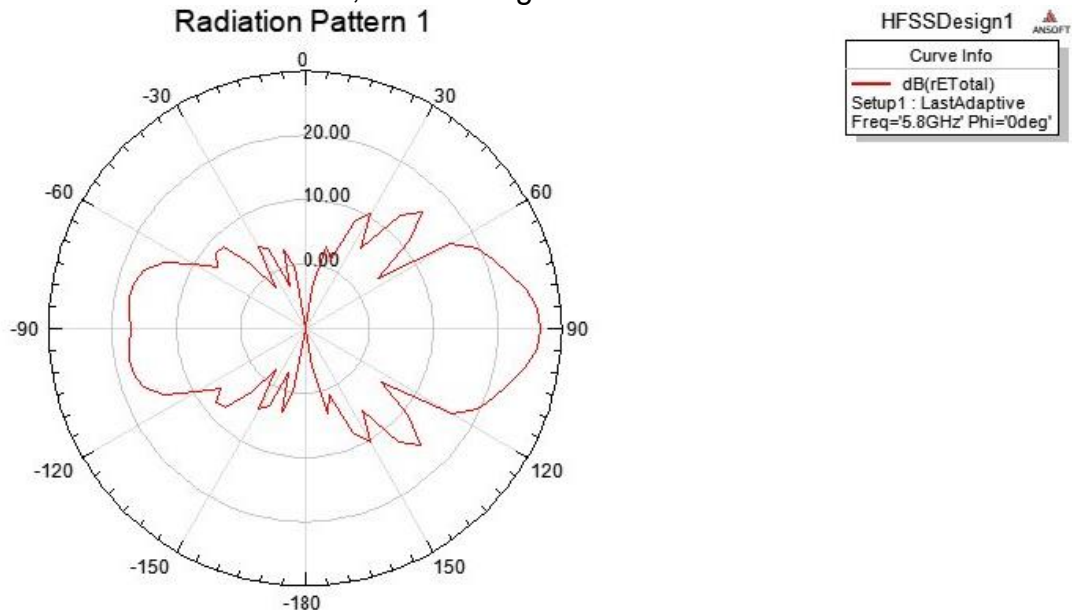
Fuente: Elaboración propia.

Figura 52. Directividad total, antena Yagi modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53. Patrón de radiación, antena Yagi modelo.



Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de reflexión (parámetro S_{11}), está lejos del punto de diseño a 5.8GHz, aun así, la antena alcanza a proporcionar una ganancia de casi 12dB para la frecuencia de diseño. Se observa con el parámetro del ROE (VSWR) y la carta de Smith, que esta requiere de un acoplamiento por Balun. La antena cumple con los requisitos de alta directividad.

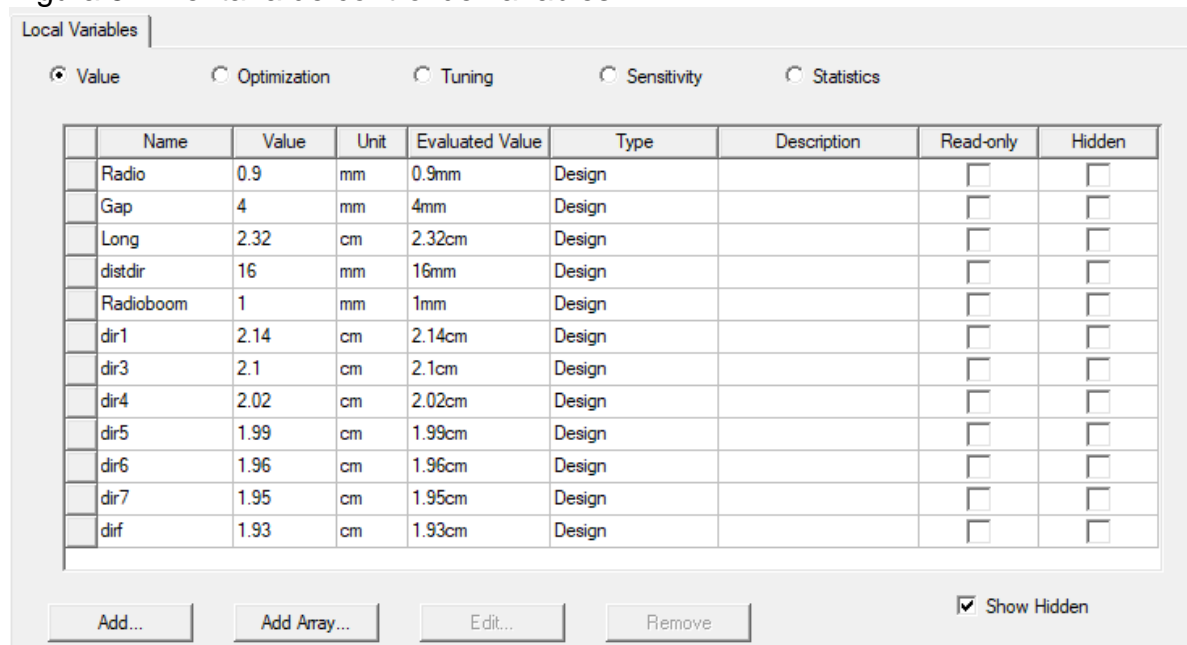
Para esta antena, el factor crucial de diseño para resonancia en 5.8GHz, es el dipolo. Con un dipolo resonando a la frecuencia de diseño, se podrá obtener un mejor desempeño de esta. Otro factor influyente es el tamaño del gap, el cual requiere también ser optimizado, su tamaño afecta considerablemente todos los parámetros medidos para este modelo.

2.2.5. Propuesta de diseño y optimización paramétrica:

Con el diseño anterior, se observaron características importantes para el desempeño de la antena Yagi. Bajo los puntos de diseño especificados en el título 2.2.3, se harán unas variaciones para lograr un mejor desempeño en la antena final, articulando con pruebas desarrolladas en el simulador, y generando un nuevo punto para generar nuevos diseños.

En este apartado la optimización paramétrica en el software ANSYS HFSS®, es un factor fundamental para su desarrollo. Para su uso, es necesario manejar las variables sensibles de la antena en variables (ver figura 54).

Figura 54. Ventana de control de variables.

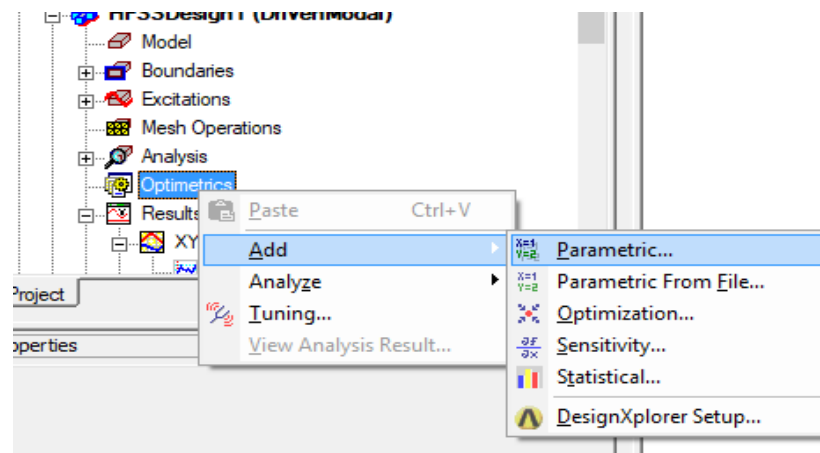


Fuente: Elaboración propia.

Con las variables ingresadas y relacionadas con cada elemento físico en la ventana de modelamiento 3D, se puede acceder al menú de parametrización, a través de la

pestaña de “optometric” ubicada en el recuadro de manejo en árbol del proyecto (ver figura 55).

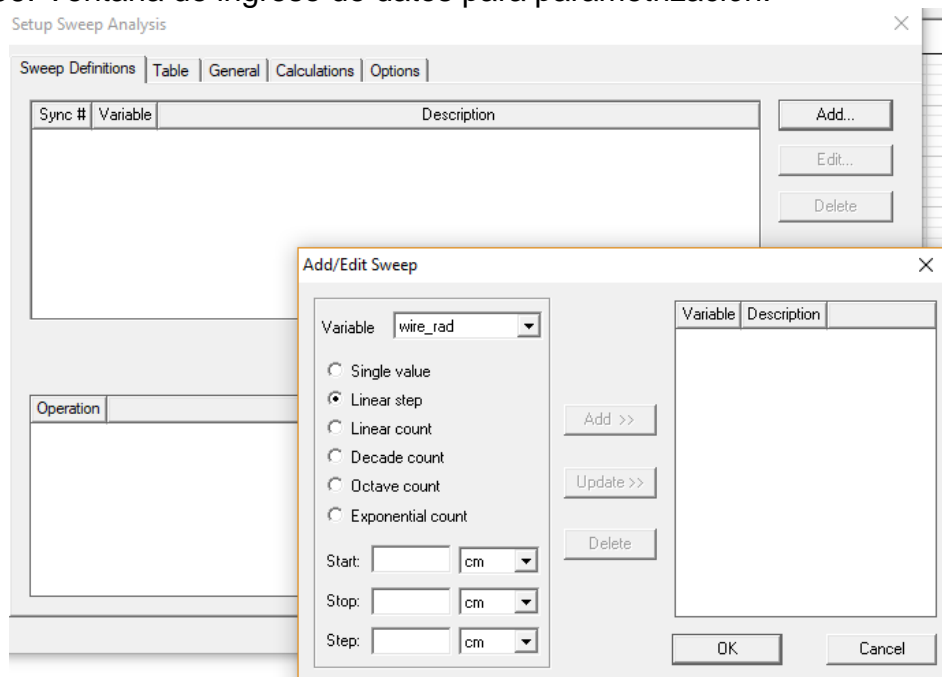
Figura 55. Menú para optimización paramétrica en Ansys HFSS ®.



Fuente: Elaboración propia

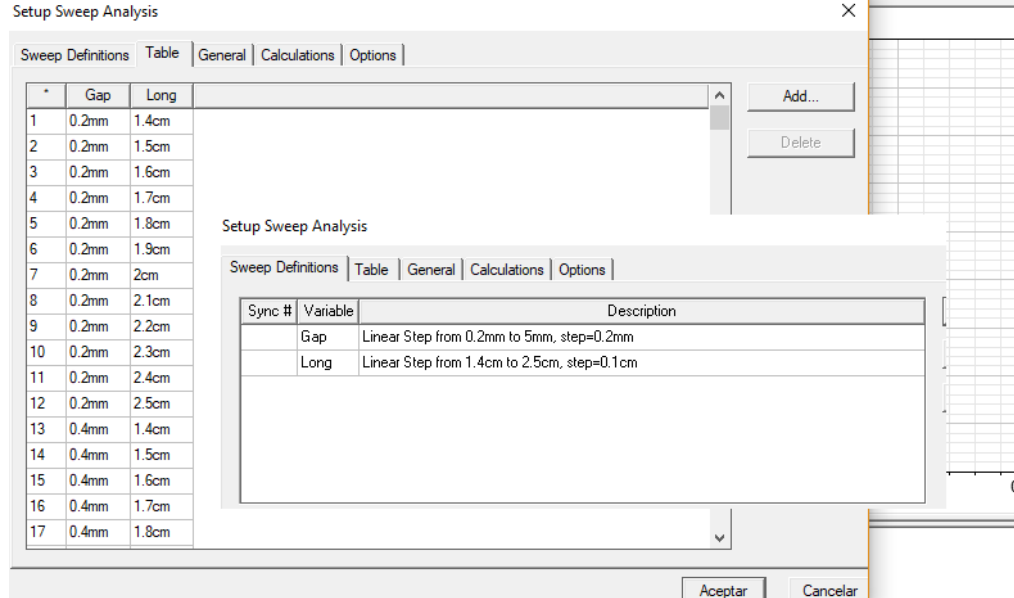
En esta opción se puede dar diversos valores a cada una de las variables, entre un rango de opciones, para después realizar una combinación de estas y simularlas (ver figuras 56 y 57).

Figura 56. Ventana de ingreso de datos para parametrización.



Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Ejemplo de parametrización con gap y longitud del dipolo.



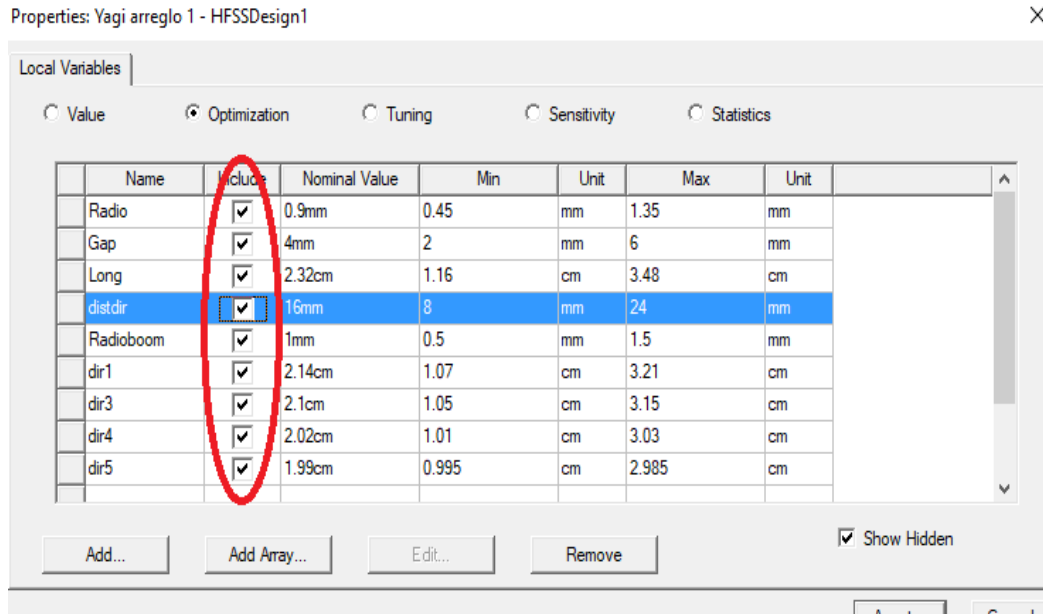
Fuente: Elaboración propia.

En el campo de resultados se verá reflejada toda la simulación paramétrica realizada, cada una con su respectiva medida. Por otro lado, existe la opción de que el sistema elija la mejor opción. Mediante la opción de optimización, que ofrece la variedad de escoger entre programación secuencial no lineal, programación no lineal integrada, método de Cuasi Newton, la búsqueda de patrones y el método de algoritmo genético.

Para este caso, la opción que más se asemeja a lo que se requiere, es la del algoritmo genético. Estos algoritmos producen una base de pruebas, en donde se realizó cambios en cada generación para cada variable, comparando resultados y dejando los mejores, para realizar el mismo proceso nuevamente. El conjunto de variables tomadas se le conoce como gen. En cuanto a optimización de antenas Yagi, el algoritmo genético es usado con regularidad, como una opción al momento de querer obtener un resultado mejor.

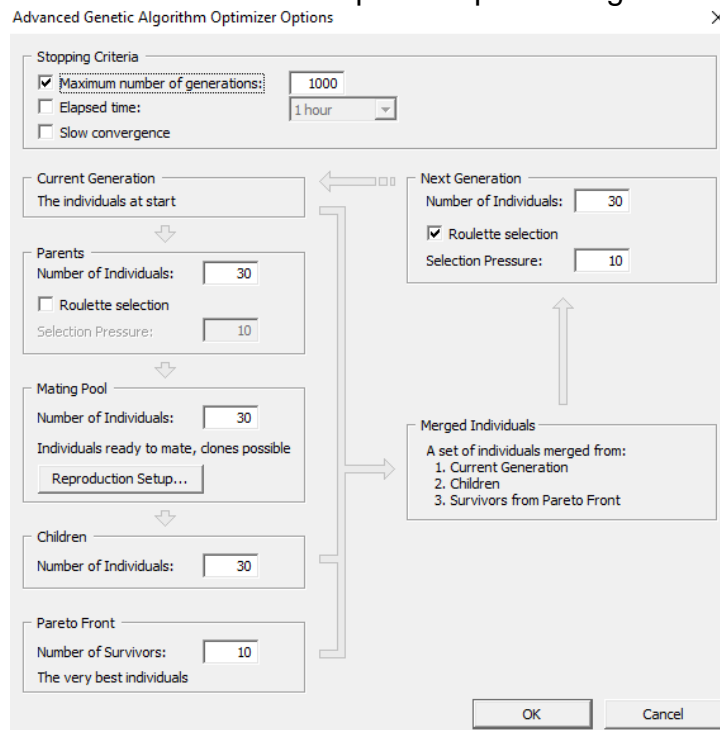
En la ventana de optimización por algoritmo genético se observa el proceso que realiza, dejando modificar las variables, para determinar la cantidad de genes en la presente generación, la cantidad de hijos y los sobrevivientes a proceso de clasificación (ver figura 58).

Figura 58. Variables a optimizar en ANSYS-HFSS, mediante algoritmo genético.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 59. Ventana de modificación de opciones para el algoritmo genético.



Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña siguiente, se marcan las variables a optimizar (ver figura 59). Esta toma la mitad del valor actual, lo suma y lo resta para determinar los valores iniciales y finales a incluir en el algoritmo. Para finalizar se genera una función objetivo, la meta a alcanzar, en algunos casos optimizan el parámetro S_{11} , en otros la directividad.

Teniendo claro cómo realizar una optimización en HFSS, se optó por elegir un mismo diámetro para el dipolo y los directores. Esto facilitará los cálculos y permitirá reducir las variables a optimizar en gran medida.

El diámetro elegido es 3.17mm (1/8 pulgada) una medida fácil de conseguir y su relación $\frac{d}{\lambda}$ no se presenta en las tablas de diseño de Viezbicke, por lo que presenta una oportunidad para generar una tabla más extensa para el diseño de antenas Yagi (Véase ecuación 10).

$$\begin{aligned}d &= 0.00317m \\ \lambda &= 0.0517m \\ \frac{d}{\lambda} &= 0.061\end{aligned}\tag{10}$$

Los valores de diseño encontrados en el documento de Viezbicke, señalan un valor máximo de relación hasta 0.04. Teniendo claro el diámetro de los elementos a utilizar, se procede con el diseño propuesto de la antena, los pasos a seguir serán los siguientes:

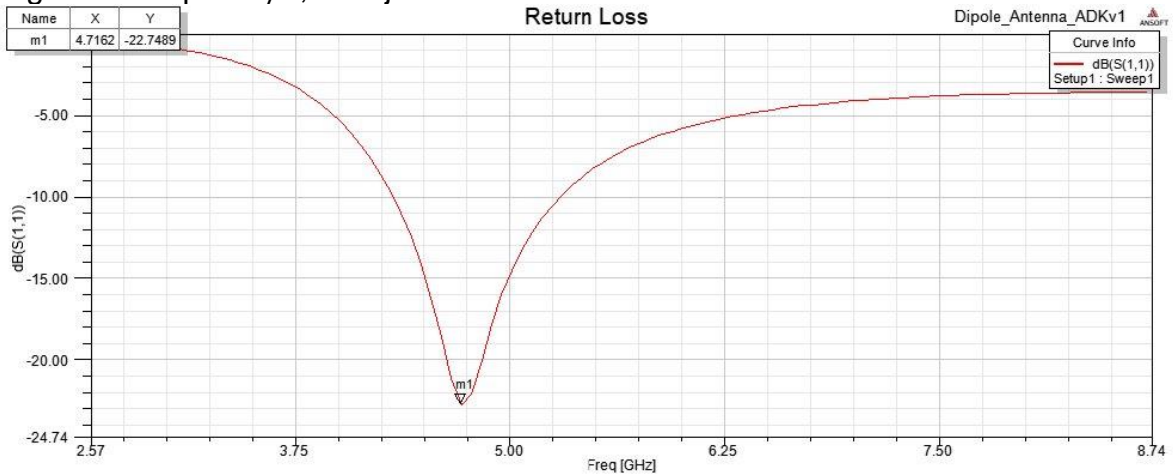
- Inicialmente se realizó el diseño del dipolo convencional, garantizando el ancho de banda y punto de resonancia a la frecuencia de diseño, por medio de la gráfica S_{11} .
- A partir de este dipolo, se construirá un dipolo doblado, garantizando su resonancia y una ganancia de al menos 5dB.
- A continuación, se realiza el diseño a partir de los apartados de Viezbicke, para los directores y un boom adecuado, luego se simularán.
- Con estos valores, se procede a realizar una optimización en ANSYS HFSS® con la opción de algoritmos genéticos, en donde se ejecuta para parámetros S_{11} y ganancia total.
- Finalmente, se reemplaza el reflector de barra rígida, por un plato parabólico, ubicando el elemento radiante (dipolo) en el foco de este.

Diseño de dipolo:

El dipolo convencional, o dipolo $\lambda/2$, es el elemento al cual su patrón de radiación se asemeja más a un radiador isotrópico. Con el radio ya establecido, se procedió a realizar la simulación de este, con medidas específicas de $\lambda/2$ y un gap de 4mm.

$$\frac{\lambda}{2} = 2.584\text{cm}$$

Figura 60. Dipolo $\lambda/2$, sin ajustes.



Fuente: Elaboración propia.

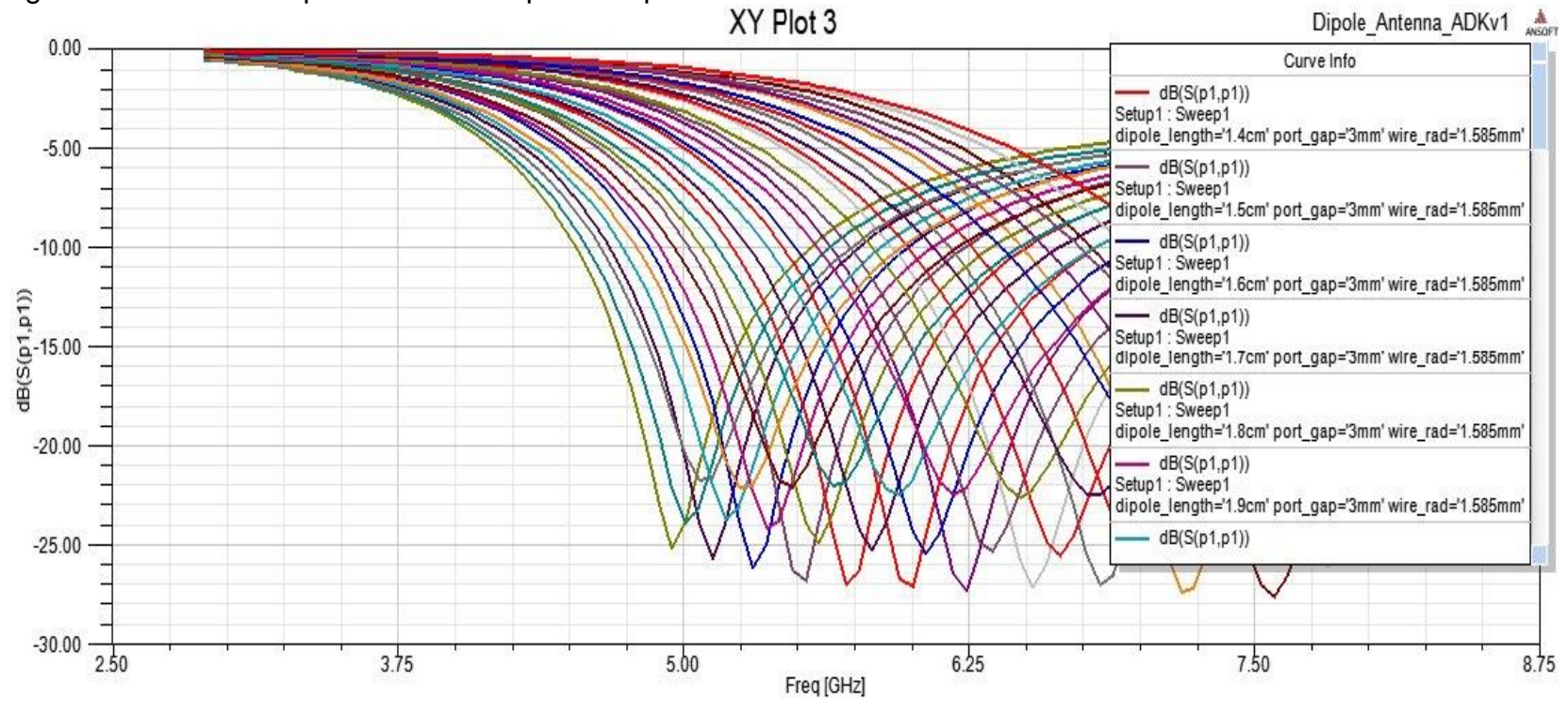
Como era de esperarse (ver figura 60), resuena en una frecuencia menor a la esperada, por lo que requiere que su longitud sea menor, se realizara una parametrización dado que son pocas variables. En donde se maneja desde 0.3λ hasta 0.45λ , variando el gap de 3 a 5mm (ver figura 61).

Figura 61. Variaciones paramétricas para el dipolo.

Sync #	Variable	Description
	dipole_length	Linear Step from 1.4cm to 2.4cm, step=0.1 cm
	port_gap	Linear Step from 3mm to 5mm, step=1mm

Fuente: Elaboración propia.

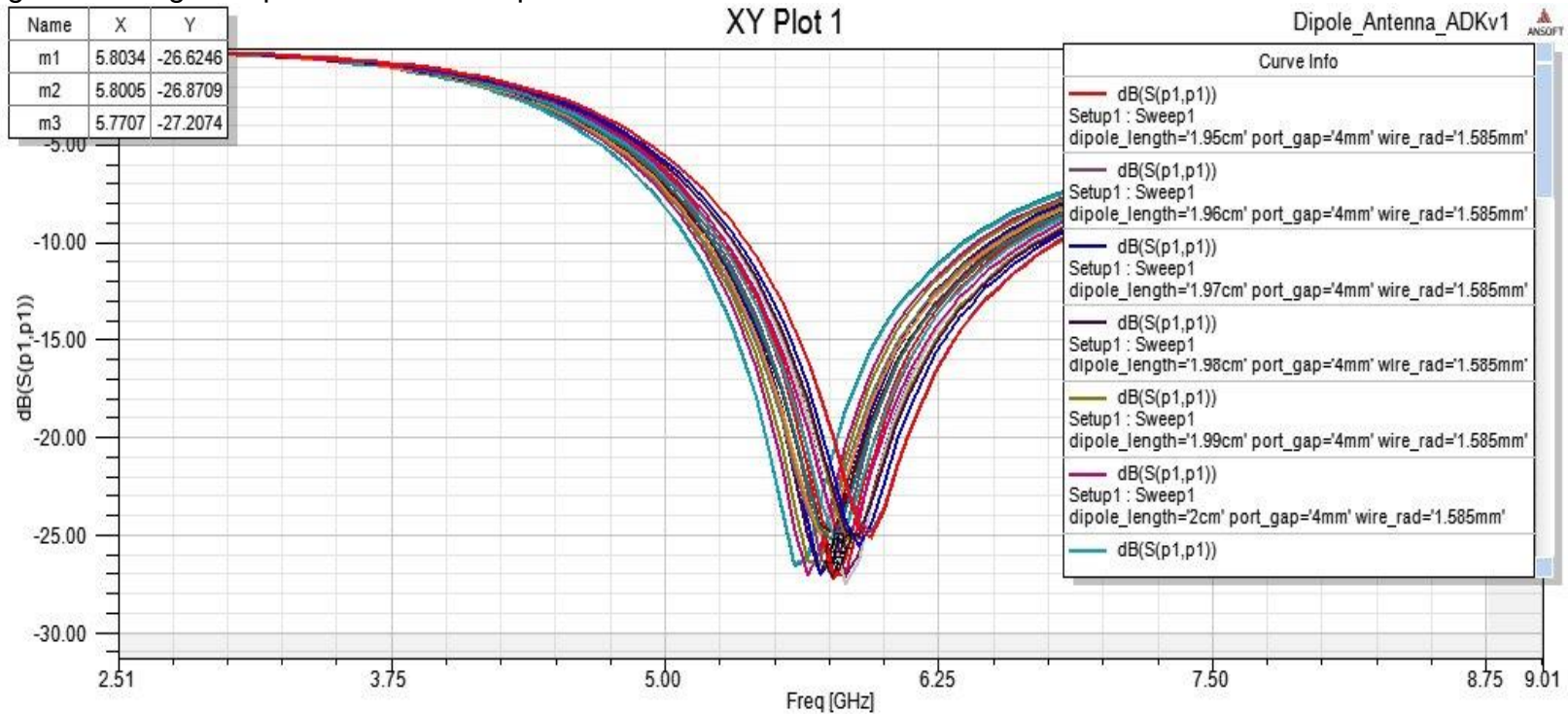
Figura 62. Resultados parametrización primer dipolo.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, el punto más destacado se encuentra cercano a los 5.82GHz, con una medida de 2cm y un gap de 5mm (ver figura 62). Se realizó un nuevo proceso, acercando los valores a la medida, tomando esta como máxima.

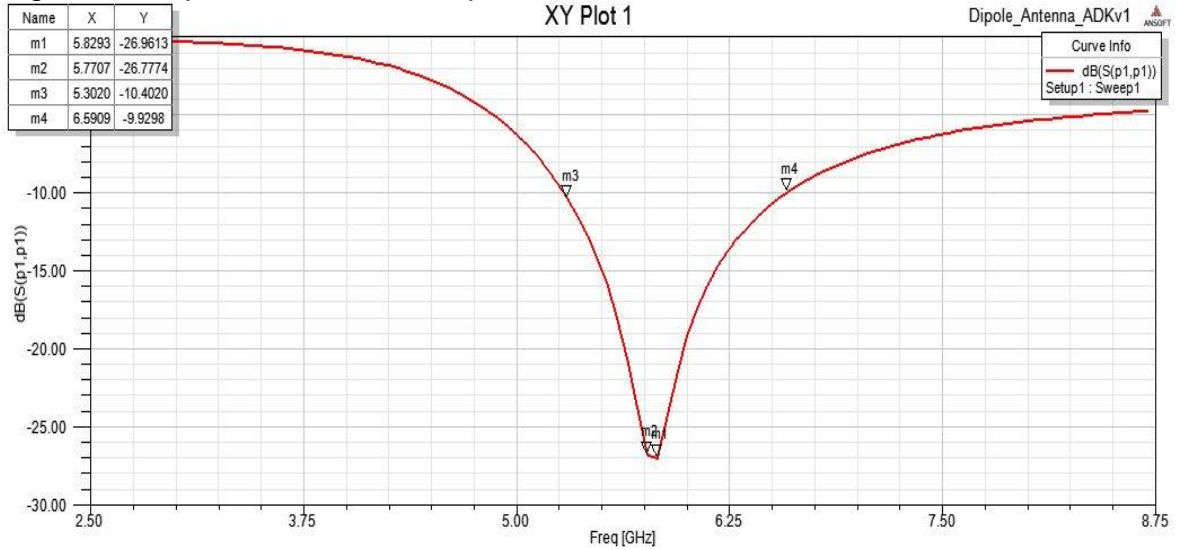
Figura 63. Segunda parametrización dipolo convencional.



Fuente: Elaboración propia.

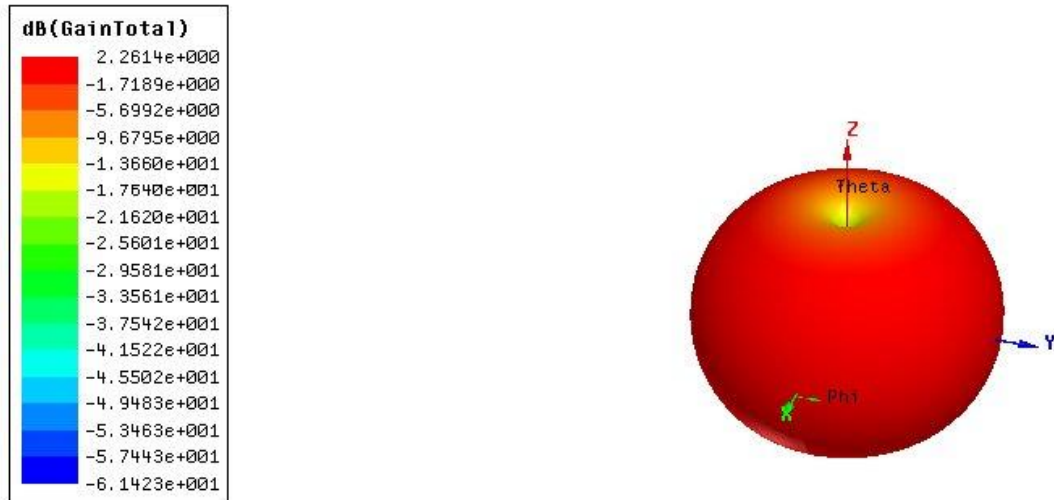
Como se observa en la figura 63, se obtiene un punto ideal de resonancia, para una longitud de dipolo de 1.97cm y un gap de 5mm.

Figura 64. Dipolo convencional optimizado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 65. Ganancia primer dipolo.



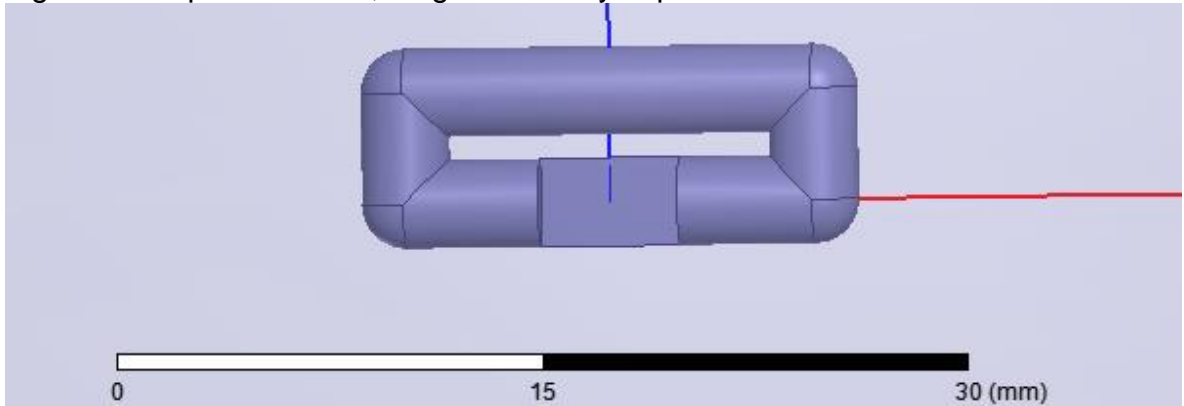
Fuente: Elaboración propia.

Para este primer dipolo, se obtiene una ganancia de 2.26dB (ver figura 65), con ancho de resonancia entre 5.3 y 6 GHz (ver figura 64). A partir de este dipolo, se simulo un dipolo doblado, mejorando las características del ancho de banda.

Diseño de dipolo doblado:

Basado en el diseño de dipolos doblados⁶¹, es el dipolo elemental con 4 veces su impedancia de entrada, en donde se le añadirá una separación de elementos de 0.023λ . Este dipolo, no es modelado con la opción de cilindros en HFSS, se realiza mediante una ecuación lineal o "polyline", a la cual después se le variara el grosor, dejando la siguiente forma con las medidas de longitud obtenidas anteriormente, y la diferencia según Balanis (ver figura 66).

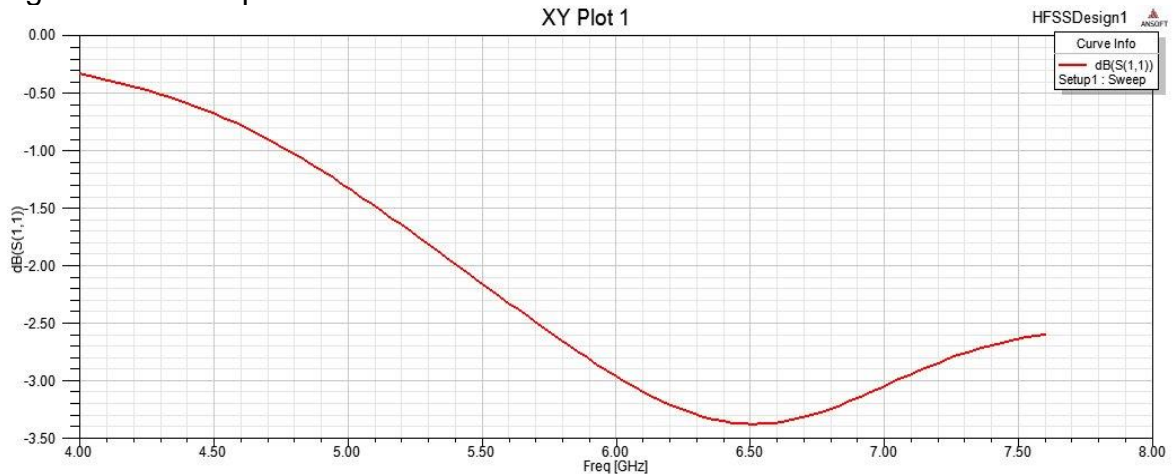
Figura 66. Dipolo doblado, longitud inicial y separación de 0.02λ



Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo un resultado impropio para lo requerido en el proyecto como se muestra en la figura 67.

Figura 67. S11 dipolo doblado inicial.



Fuente: Elaboración propia.

⁶¹ CONSTANTINE A. Balanis, Antenna Theory analysis and design . 3º edición Libro, p. 140.

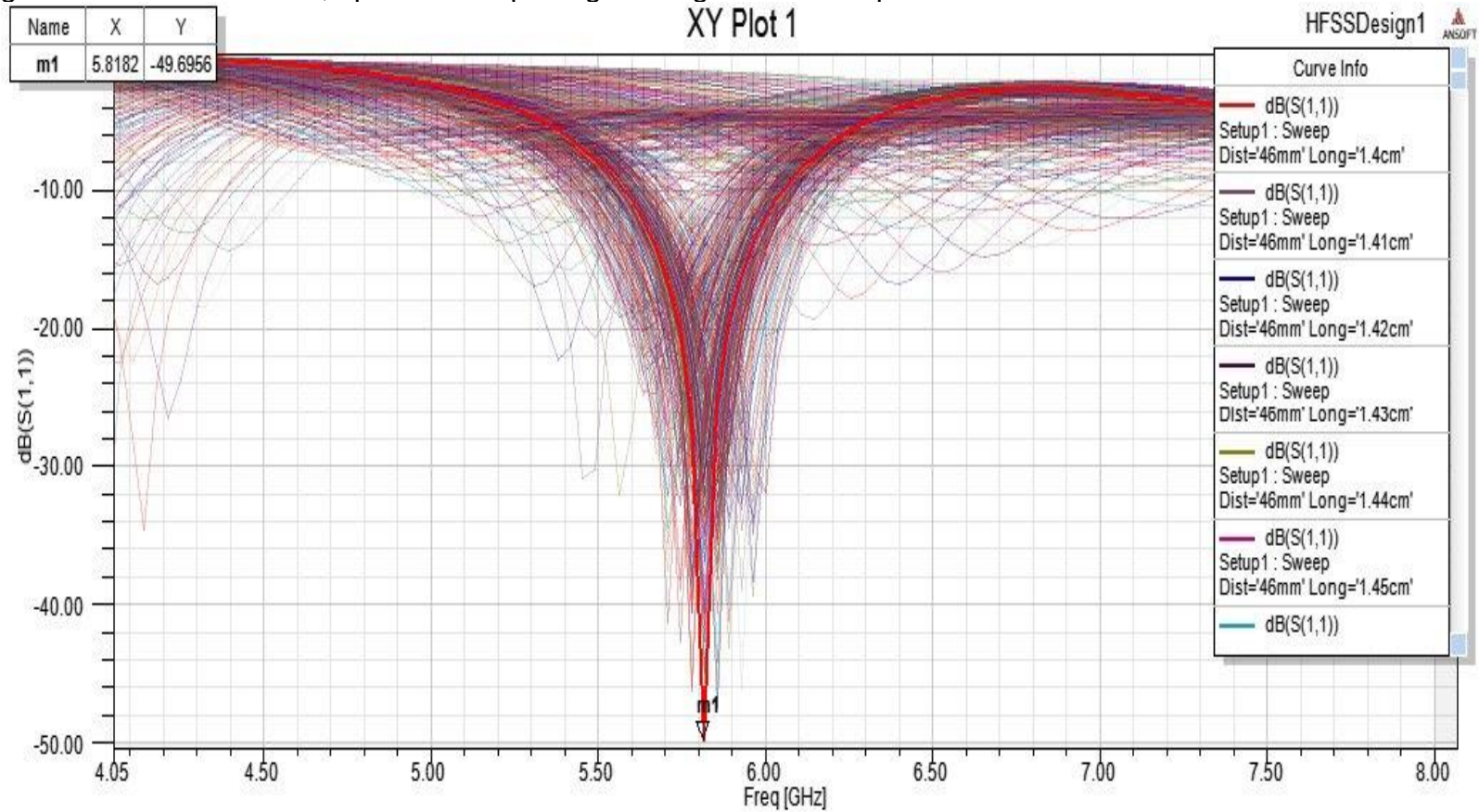
En el libro de Milligan⁶², se recomienda utilizar para dipolos cuadrados una altura de casi una longitud de onda, a costo de reducir la longitud del dipolo original. Se realizó entonces para este caso, un procedimiento de optimización genética, ya que los rangos de la longitud, altura y gap, serán muy grandes, y su parametrización no sería adecuada en términos de tiempo.

Se adecuaron los valores para encontrar el punto de resonancia mínimo para S_{11} , con rangos para la longitud entre 1.3 a 2.1 cm, del espaciamiento entre elementos de 1.3 a 5 cm y el gap de 3 a 5mm⁶³. En donde se obtuvieron:

⁶² MILLIGAN, Thomas, Modern Antenna Design, p. 312.

⁶³ CARR, Joseph, Antenna toolkit. 2da Edición. Oxford: Plant a tree, 2001, p. 198.

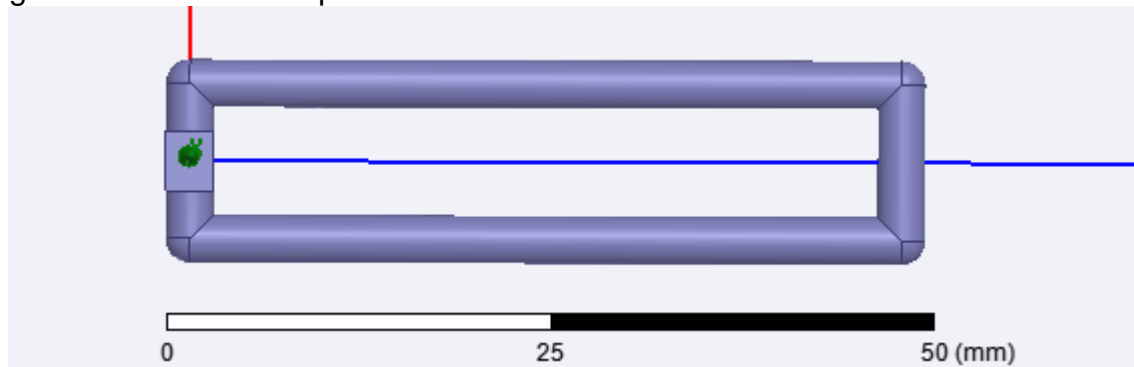
Figura 68. Parámetros S₁₁, optimización por algoritmo genético de dipolo doblado.



Fuente: Elaboración propia.

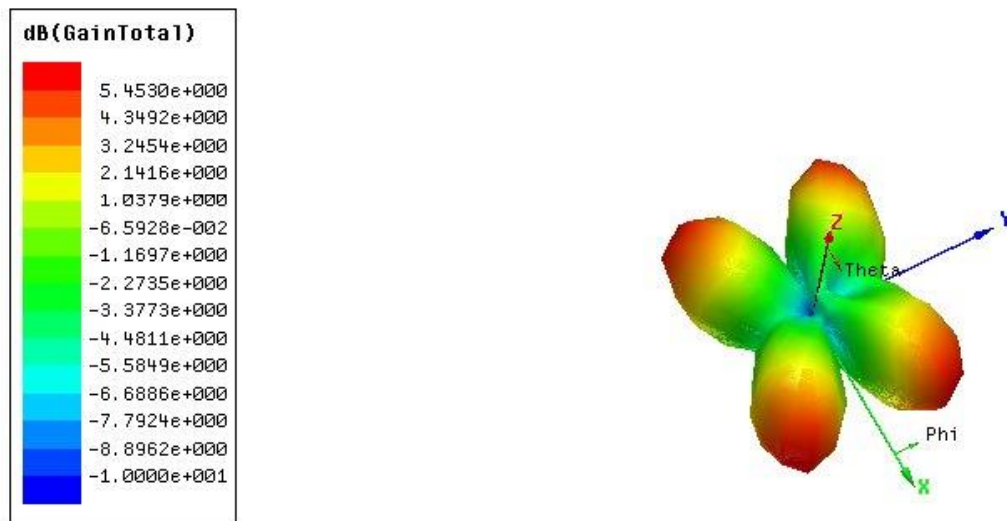
Este proceso de simulación duro alrededor de 3 días, en donde genero el siguiente resultado después de casi 800 iteraciones y simulaciones. En la figura 68, se observan todos diseños que simulo hasta llegar a optimo y resaltarlo, este será el dipolo final, que se usó en la estructura de la antena Yagi a modelar (ver figura 69). En la figura 70 se muestra la ganancia de este dipolo doblado (véase tabla 18).

Figura 69. Modelo de dipolo doblado Final.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 70. Ganancia dipolo doblado Final.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resumen de medidas dipolo doblado final.

Resumen	Medida en m	Medida en λ
Longitud	0.0143	0.276
Radio elemento	0.00158	0.03
Espaciamiento en dipolo	0.0472	0.913
Gap	0.004	0.077

Fuente: Elaboración propia.

Diseño de directores según Viezbicke:

Parámetros:

- Frecuencia de operación: 5.8GHz, $\lambda = 5.17\text{cm}$
- Diámetro del elemento $d = 3.17\text{mm}$
- $\frac{d}{\lambda} = 0.06$
- Diámetro del boom, $D = 8.5\text{mm}$
- $\frac{D}{\lambda} = 0.164$
- Espaciado de elementos, $0.2\lambda = 1\text{cm}$
- Longitud total, $2.2\lambda = 11.3\text{cm}$

Paso 1:

A partir de la tabla 14 se obtienen la longitud de los elementos directores para 2.2λ , el reflector medirá 0.482λ en donde se tendrán 10 directores, con las siguientes medidas (ver tabla 19):

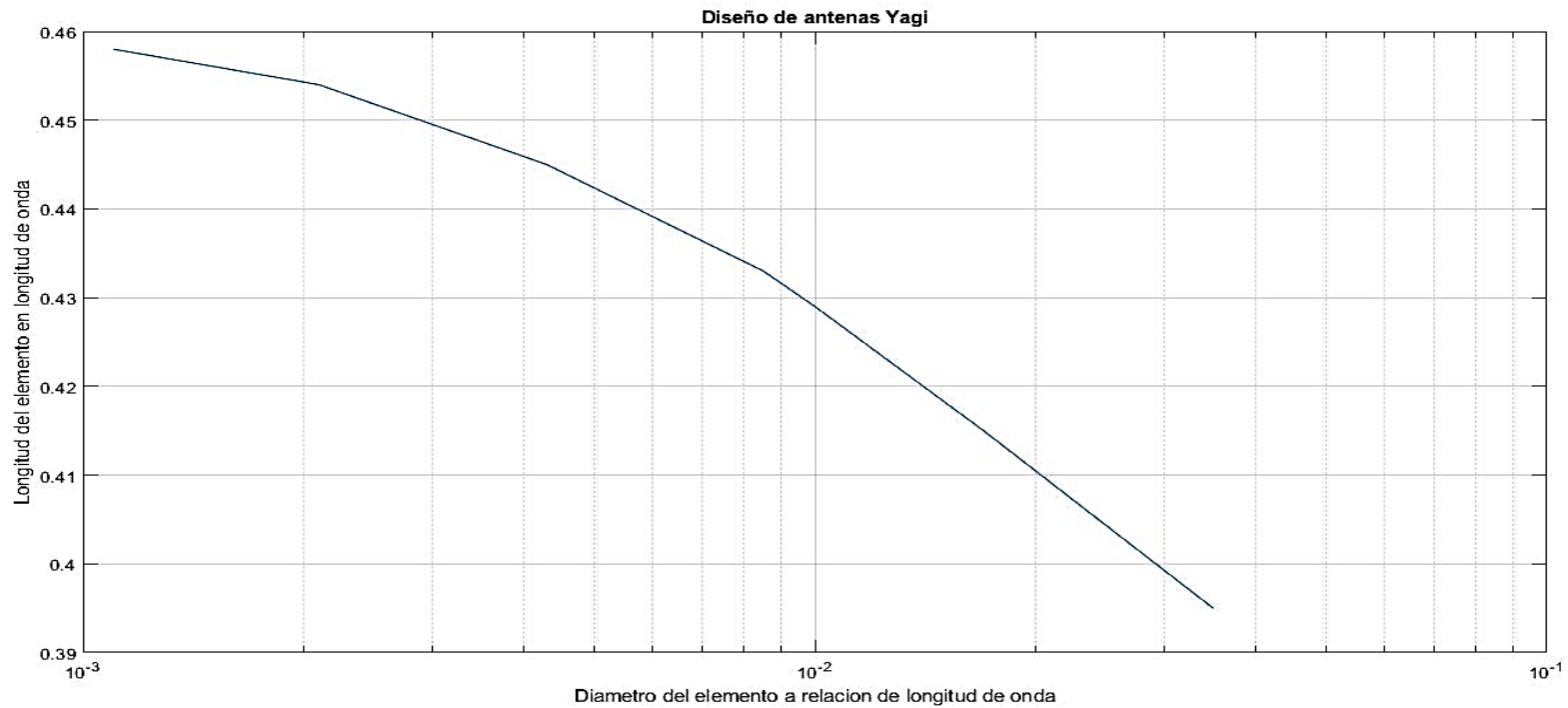
Tabla 19. Longitudes de directores no compensados, Yagi modelada a 5.8GHz, modelo propuesto

Elemento	Longitud del director (λ)
l_3	0.432
l_4	0.415
l_5	0.407
l_6	0.398
l_7	0.390
l_8	0.390
l_9	0.390
l_{10}	0.390
l_{11}	0.398
l_{12}	0.407

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: De la figura 41 (pag.86), se obtiene el punto de curva de director, esta pasara a ser la longitud del director no compensada. Se toma la curva de diseño (B). Los valores solo van hasta 0.04, por lo que para nuestro caso se realizara una regresión de solamente la línea B, para determinar un valor aproximado de nuestros directores. Esta regresión se hará en Matlab 2016 (ver figura 71).

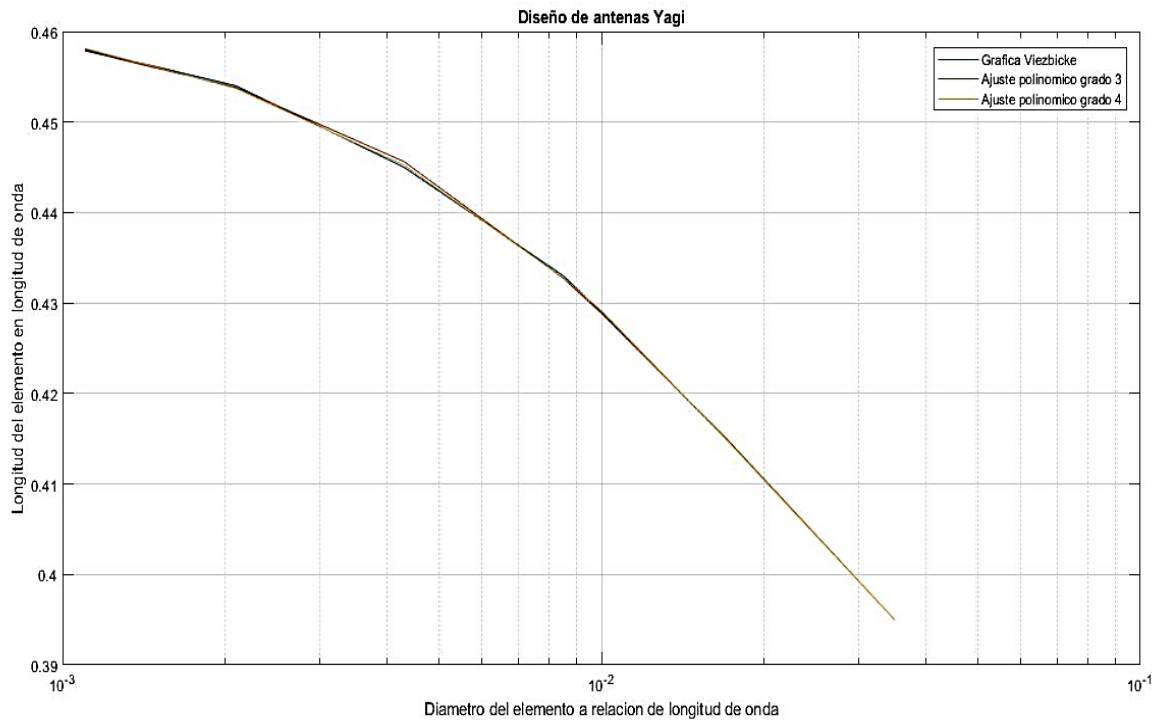
Figura 71. Valores de diseño en Matlab



Fuente: Elaboración propia.

Se le realiza un ajuste de curvas por medio del comando “polyfit”, describiendo en un polinomio de grado 3 y otro de grado 4 la expresión de la gráfica, el polinomio de grado 3 es suficiente con un error aproximado de 0.0001 (ver figura72).

Figura 72. Ajuste de curvas polinomial.



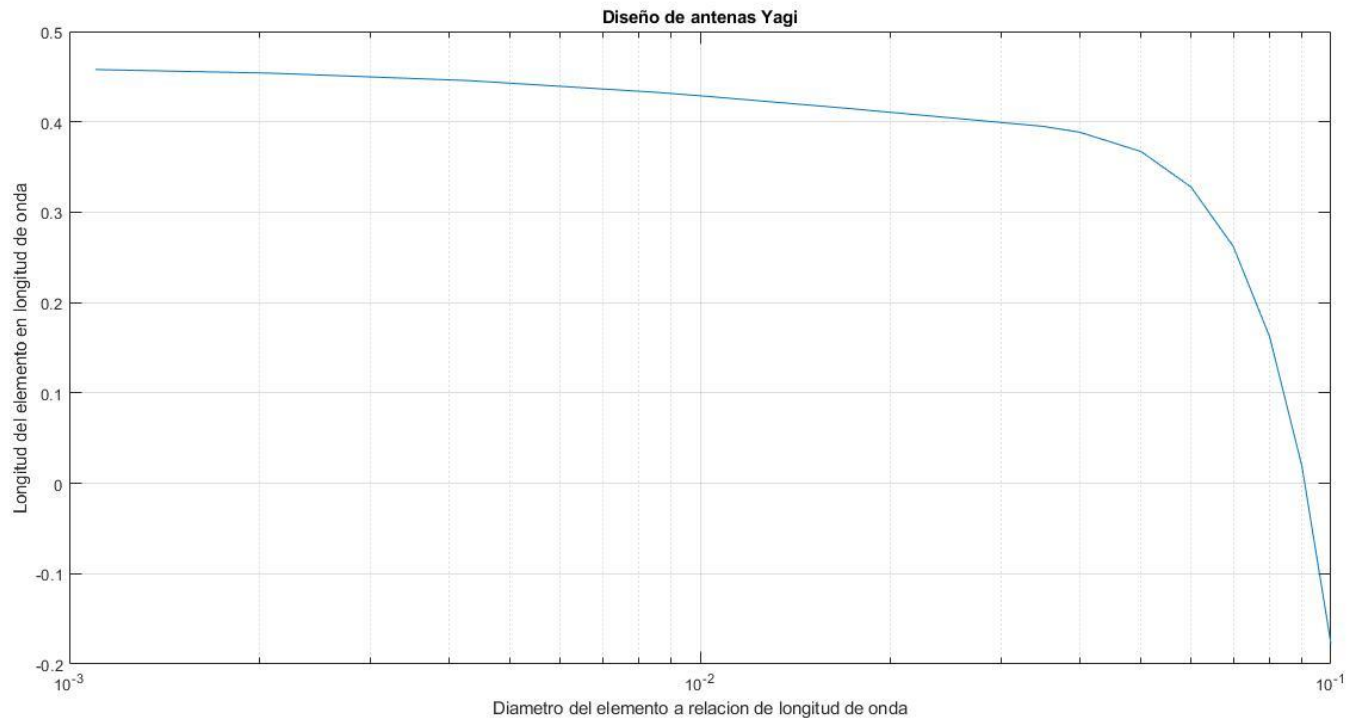
Fuente. Elaboración propia.

La ecuación 11, muestra el siguiente resultado:

$$y_3 = -1406.33928886897x^3 + 121.05921702006x^2 - 4.44669351943596x + 0.462627158742611 \quad (11)$$

A continuación, se alargan los valores de la gráfica de Viezbicke, hasta el valor de 0.1 (ver figura 73).

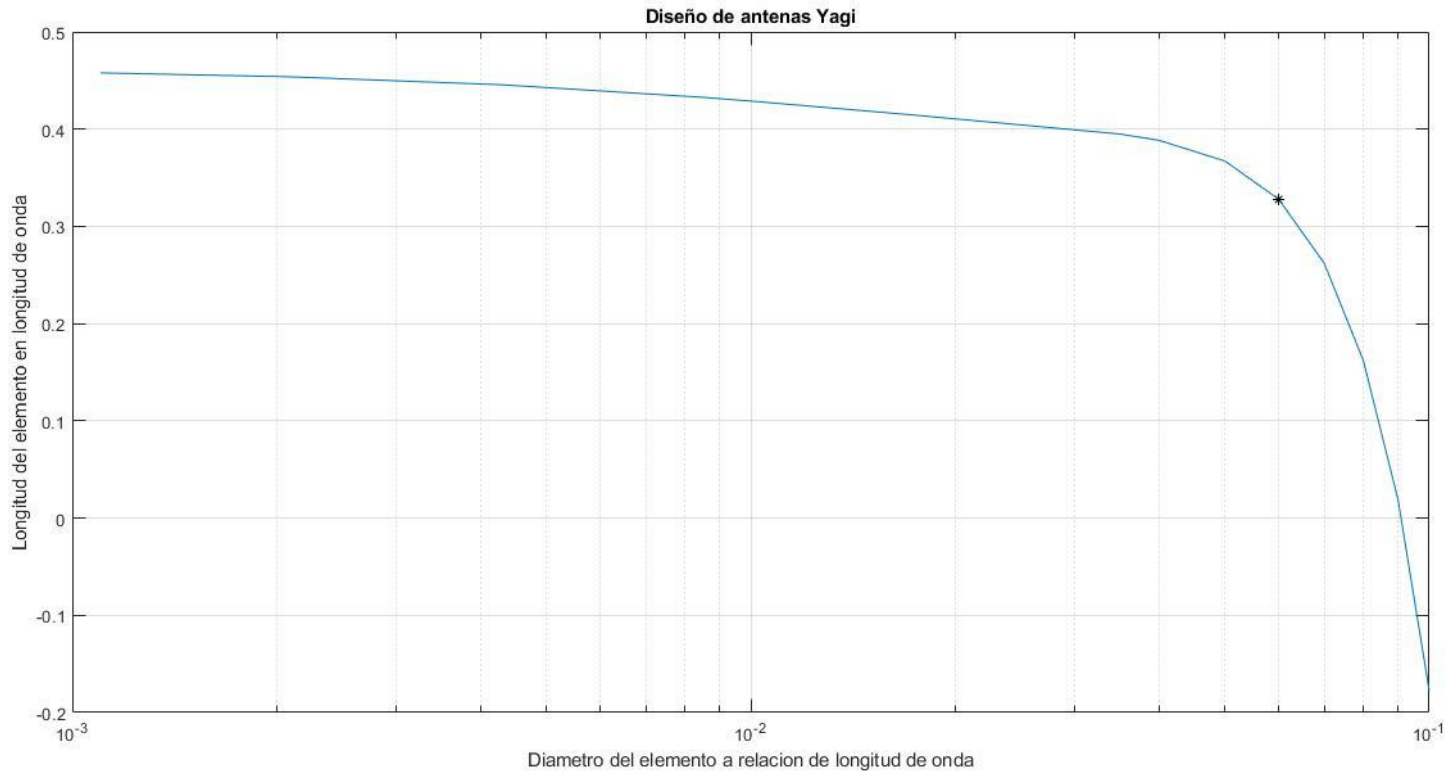
Figura 73. Grafica ajustada hasta 0.1λ



Fuente: Elaboración propia.

Se le asigna el punto en 0.06, a un valor aproximado de 0.327, valor para el director 1 (ver figura 74).

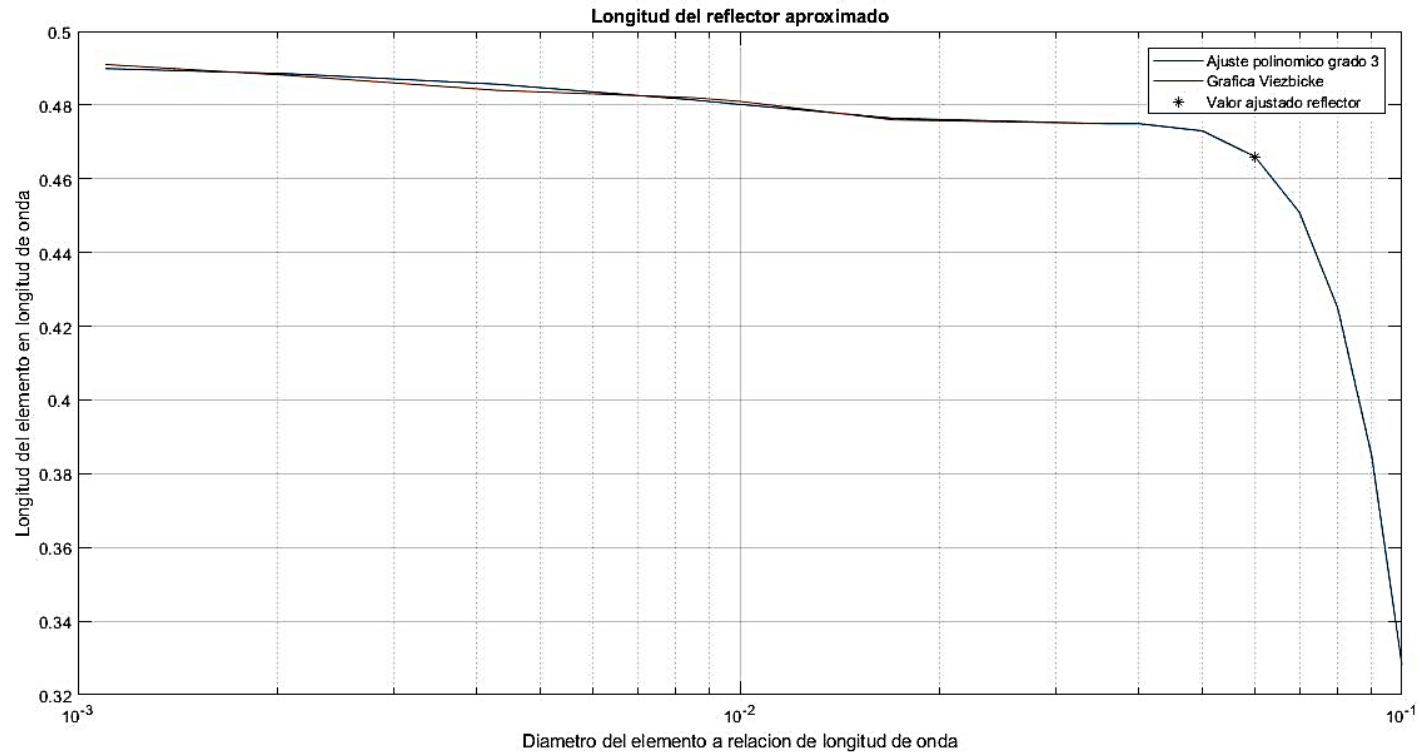
Figura 74. Grafica de diseño de directores, punto de diseño.



Fuente. Elaboración propia.

Paso 3: Para la misma relación de radio, se determina la longitud del reflector. Realizando el mismo proceso, se encuentra la línea de tendencia, para determinar la longitud aproximada en 0.06λ (véase ecuación 12)

Figura 75. Valor ajustado para el reflector y grafica linealizada.



Fuente: Elaboración propia.

Donde la ecuación 12 es:

$$y_3 = -493.9061x^3 + 48.8157x^2 - 1.5778x + 0.4916 \quad (12)$$

Dando como resultado (y_3) de 0.466λ .

Paso 4: Se realiza el cruce con un compás, hasta establecer los puntos nuevos de cada director (véase tabla 20):

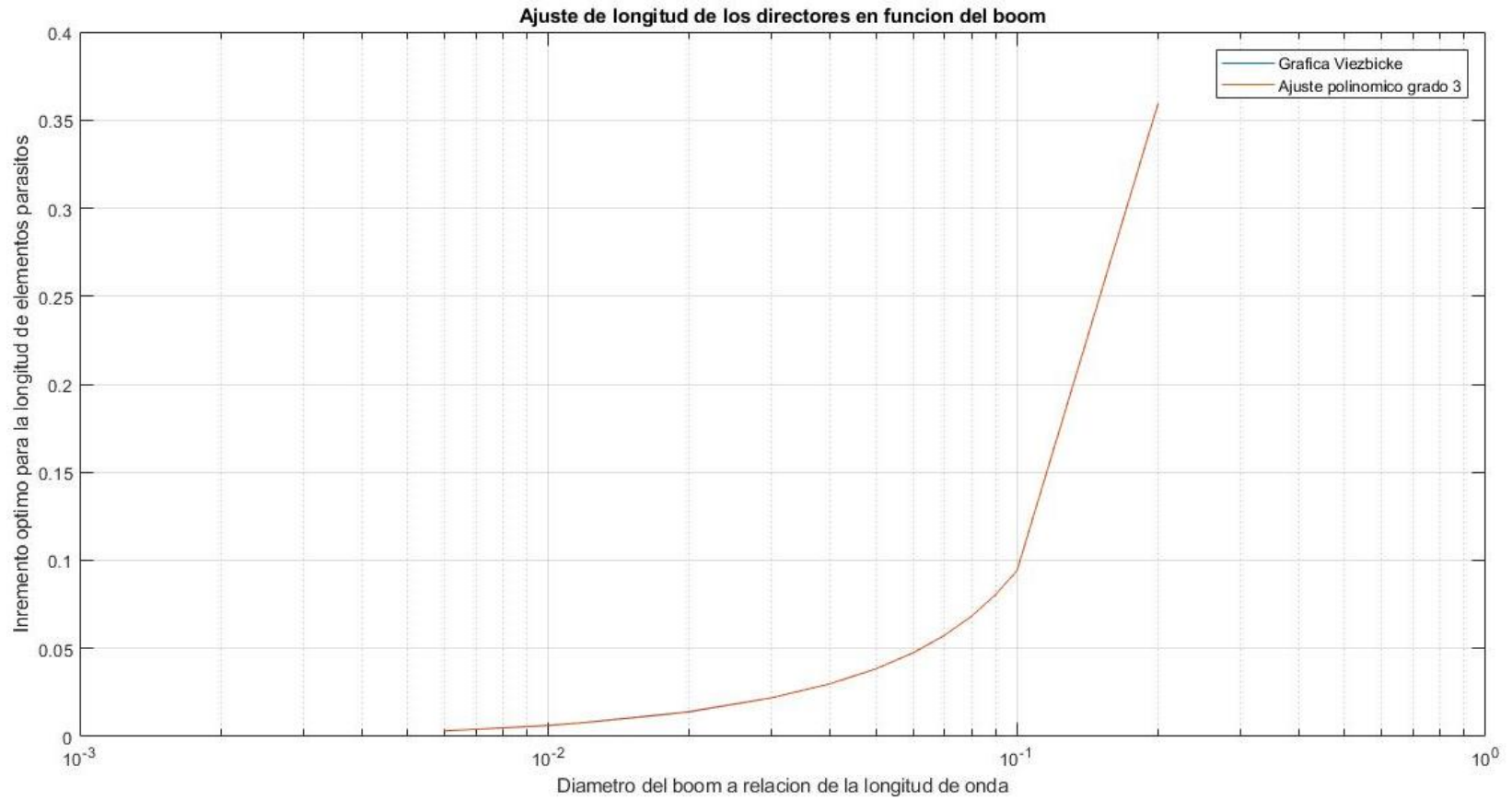
Tabla 20. Longitudes de directores medidos a partir del punto de corte, Yagi propuesta a 5.8GHz

Elemento	Longitud del director (λ)
l_3	0.327
l_4	0.310
l_5	0.302
l_6	0.293
l_7	0.285
l_8	0.285
l_9	0.285
l_{10}	0.285
l_{11}	0.293
l_{12}	0.302

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5: De acuerdo a la figura 41 (pag.86) , se realizó otra linealización para el valor de 0.164λ , obteniendo la curva para el incremento de elementos parásitos, en función del boom (véase figura 76 y tabla 21).

Figura 76. Ajuste de la longitud de directores en función del diámetro del boom.



Fuente: Elaboración propia.

Según esto, el valor a ajustar es de 0.2310

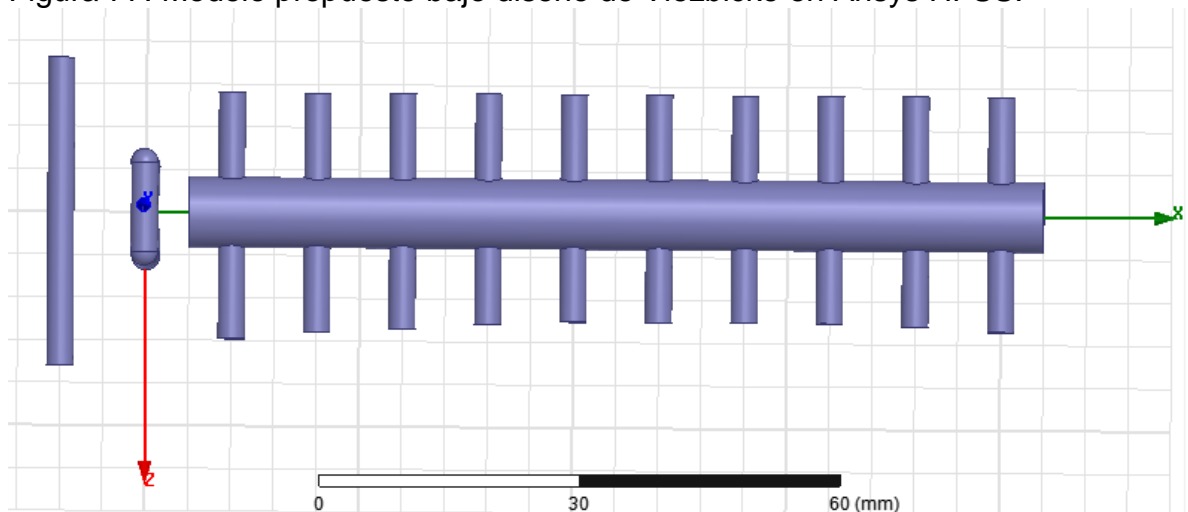
Tabla 21. Longitudes finales, Yagi modelada a 5.8GHz

Elemento	Longitud (λ)	Longitud (cm)
Reflector (l_2)	0.697	3.6
l_3	0.558	2.88
l_4	0.541	2.79
l_5	0.533	2.75
l_6	0.524	2.7
l_7	0.516	2.66
l_8	0.516	2.66
l_9	0.516	2.66
l_{10}	0.516	2.66
l_{11}	0.524	2.7
l_{12}	0.533	2.75

Fuente: Elaboración propia.

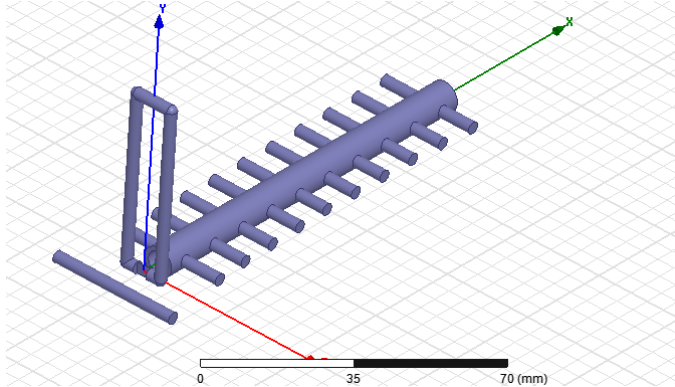
Con estas medidas de diseño, pasamos a crear la antena en el software ANSYS HFSS® (ver figura 77 y 78).

Figura 77. Modelo propuesto bajo diseño de Viezbicke en Ansys HFSS.



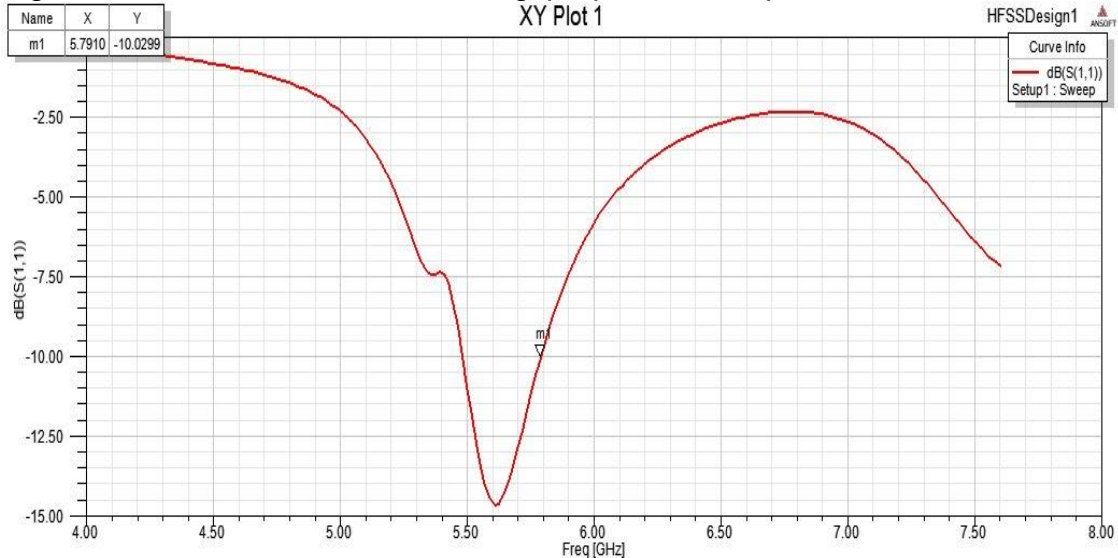
Fuente: Elaboración propia.

Figura 78. Perspectiva del diseño de antena Yagi con dipolo doblado, frecuencia de 5.8GHz.



Fuente: Elaboración propia.

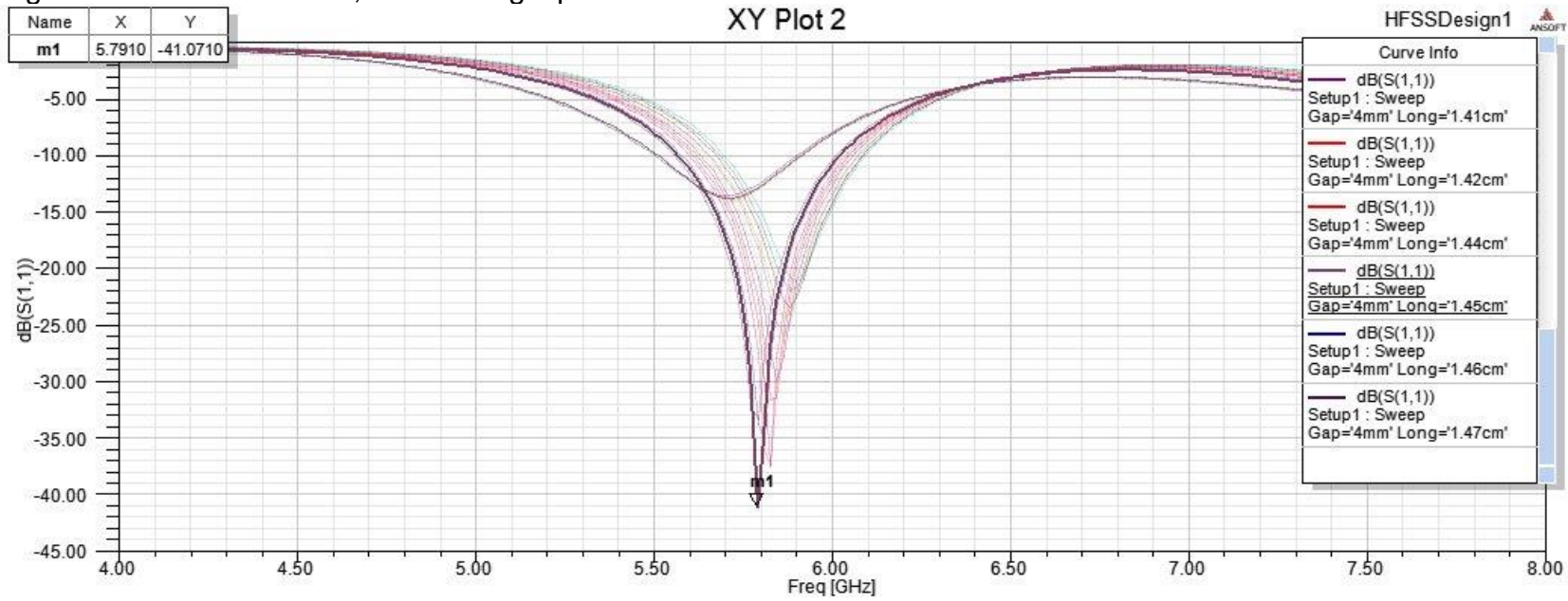
Figura 79. Parámetro S_{11} antena Yagi propuesta sin optimización.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, el punto de resonancia (ver figura 79) se vio bastante afectado por esta modificación en la antena. Las variables de la antena se aplicarán en el algoritmo de optimización de Ansys HFSS, para nuevamente encontrar un punto optimizado en el tamaño de los directores. Después de obtener los resultados, se modificará el espaciado entre ellos, para comparar los resultados con el trabajo de Viezbicke. La cantidad de variables ingresadas al sistema de optimización y el tamaño de la antena, que influye en el tamaño de la caja de aire haciéndola más grande, afectan notoriamente los tiempos de simulación. Para este caso, la optimización tardó alrededor de doce días, con algunos percances.

Figura 80. Parámetros S_{11} , antena Yagi optimizada.

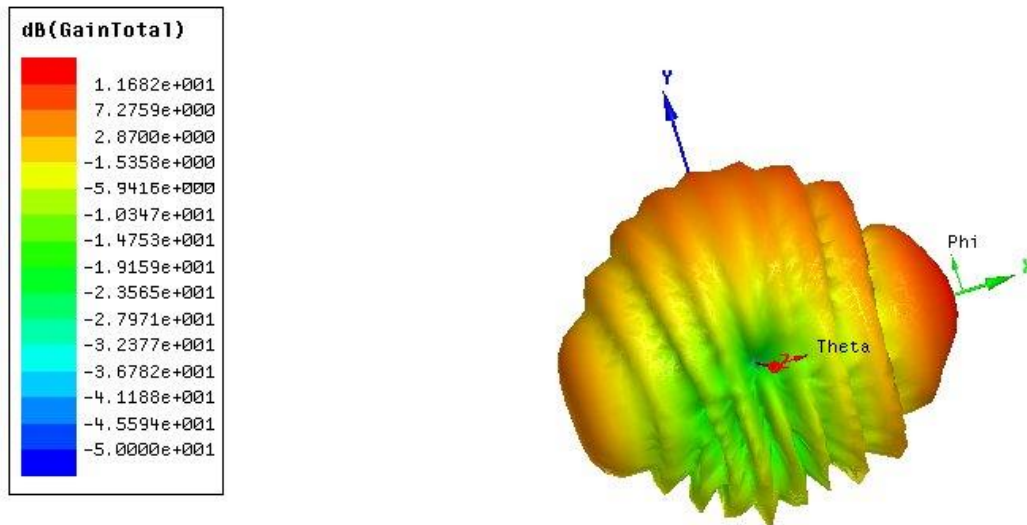


Fuente: Elaboración propia.

Se simularon más de 1400 casos, por cuestiones de procesamiento, solo se muestran los resultados más cercanos al objetivo (ver figura 80). Los directores tienen una longitud cercana a ser la misma, la diferencia son algunos micrómetros, por lo que su valor se aproxima y serán tomados como iguales, en el proceso de fabricación.

A continuación, en las figuras 81,82, 83 y 84 se observan la ganancia, la directividad el patrón de radiación y la impedancia de la antena Yagi optimizada respectivamente.

Figura 81. Ganancia antena Yagi optimizada.



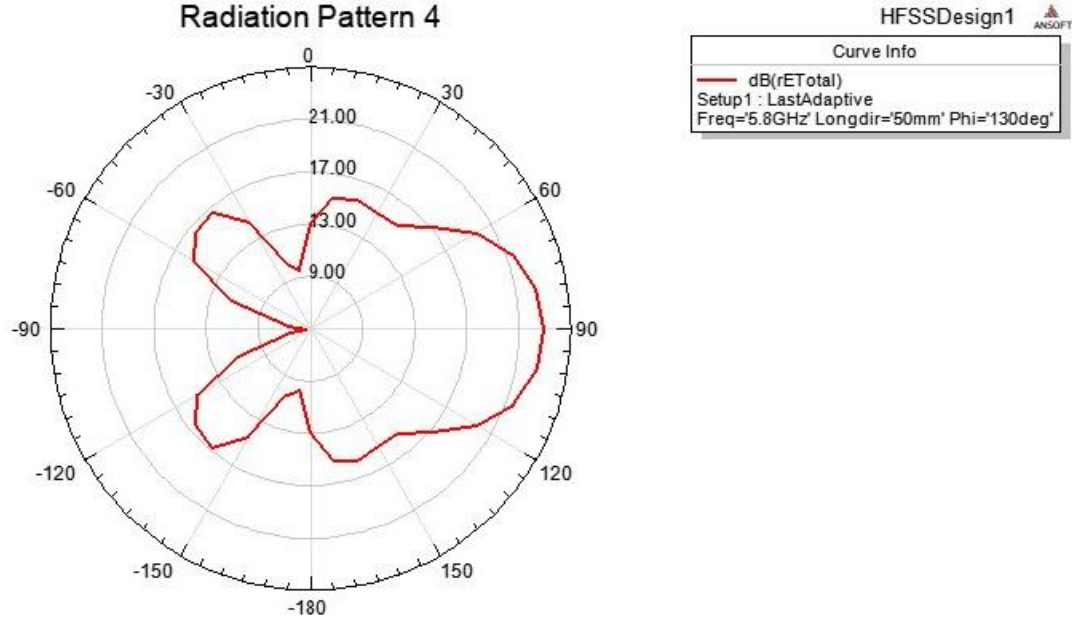
Fuente: Elaboración propia.

Figura 82. Directividad antena Yagi optimizada.



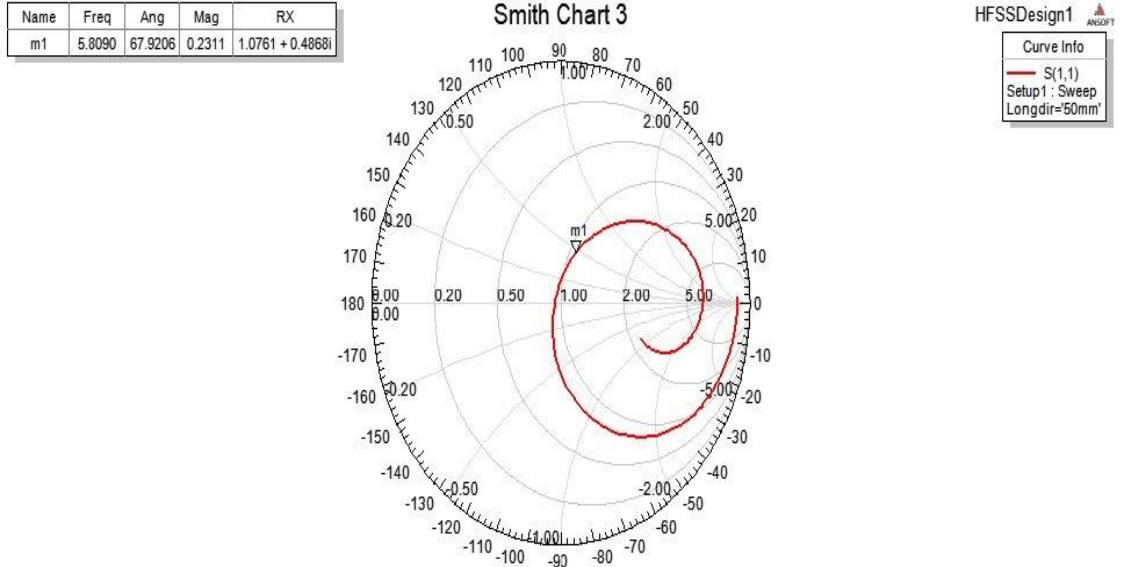
Fuente: Elaboración propia.

Figura 83. Patrón de radiación antena Yagi optimizada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 84. Carta de Smith, antena Yagi optimizada.



Fuente: Elaboración propia.

En relación con el modelo diseñado por Viezbicke, esta antena presenta una ganancia de alrededor de 5dB, por encima siendo optimizada, su punto de resonancia también está de acuerdo a la frecuencia de diseño; requiere de un acoplamiento para garantizar la máxima transferencia de potencia (véase tabla 22).

Tabla 22. Longitudes finales, antena Yagi propuesta y optimizada

Elemento	Longitud (λ)	Longitud (cm)
Reflector (l_2)	0.468	3.51
l_3	0.485	2.5
l_4	0.484	2.5
l_5	0.477	2.46
l_6	0.480	2.48
l_7	0.483	2.49
l_8	0.483	2.49
l_9	0.483	2.49
l_{10}	0.483	2.49
l_{11}	0.483	2.49
l_{12}	0.483	2.49

Fuente: Elaboración propia.

Basados en este diseño, añadimos un plato parabólico, que se encarga de aumentar mucho más la ganancia para esta antena, en total se fabricaran dos platos, uno de 20cm de diámetro y otro de 30cm de diámetro. Para este fin, se realizó un diseño estándar⁶⁴, basado en longitud de onda y una ganancia esperada para el plato en condiciones ideales. Entonces tenemos la ecuación 13:

$$D = \lambda \sqrt{\frac{G}{1.5\pi}} \quad (13)$$

En donde, G es la ganancia esperada normalizada (no en dB), y λ es la longitud de onda. Para esperar un plato de 30cm, la ganancia ideal sería de 22dB, normalizada a $10^{2.2}$ (véase ecuación 14)

$$D = 0.0517 \sqrt{\frac{10^{2.2}}{1.5\pi}} = 0.3m \quad (14)$$

De igual manera, para el plato de 20cm, se requiere una ganancia ideal de 18dB, normalizada a $10^{1.8}$. (véase ecuación 15)

⁶⁴ GARCIA, Armando. Calculo de antenas, p.213.

$$D = 0.0517 \sqrt{\frac{10^{1.8}}{1.5\pi}} = 0.2m \quad (15)$$

Estos serían los diámetros de las aberturas para los paraboloides a desarrollar. A fin de conseguir un campo eléctrico uniforme es recomendable fijar un ángulo de apertura a 62°. Este es el valor del ángulo formado por la línea focal y la que une el punto focal con el borde de la parábola.

El foco para ambos casos se define según la ecuación 16:

$$f = \frac{D}{4 \tan \frac{\beta}{2}} \quad (16)$$

En donde, β es el ángulo de apertura.

Finalmente, se determina la profundidad del espejo, expresada en A, por la ecuación 17:

$$A = f - \frac{D/2}{\tan \beta} \quad (17)$$

Para construir los valores de la parábola y los puntos del perfil en un sistema de coordenadas (x, y), se utilizó la ecuación 18:

$$y = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{x}{A}} \quad (18)$$

Los valores para ambos platos, se resumen en la tabla 23:

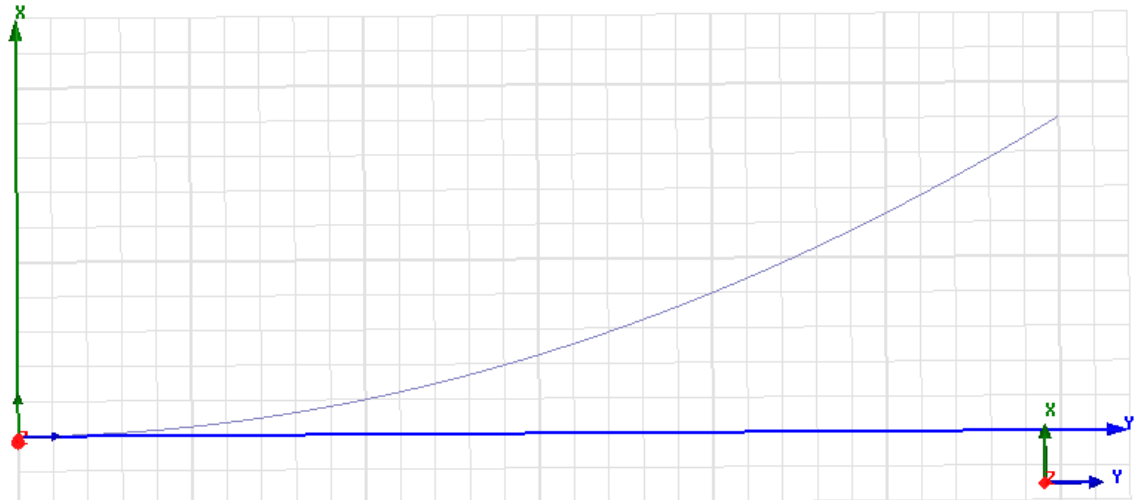
Tabla 23. Resumen de características del diseño de platos.

Característica	Plato de 30cm	Plato de 20cm
Foco	12.5cm	8cm
Profundidad	4.5cm	2.7cm
Ganancia ideal	21dB	19dB
Ecuación de parábola	$y = 2x^2$	$y = 2.7x^2$

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño en ANSYS HFSS® de los platos, se determina su ecuación característica de parábola, para después aplicarle una rotación alrededor de un eje, finalmente al paraboloides se le modifica el grosor, según el material a emplear para este fin, que tendrá un grosor de 2mm. Para el plato de 30cm, quedaría de la siguiente manera (ver figura 85):

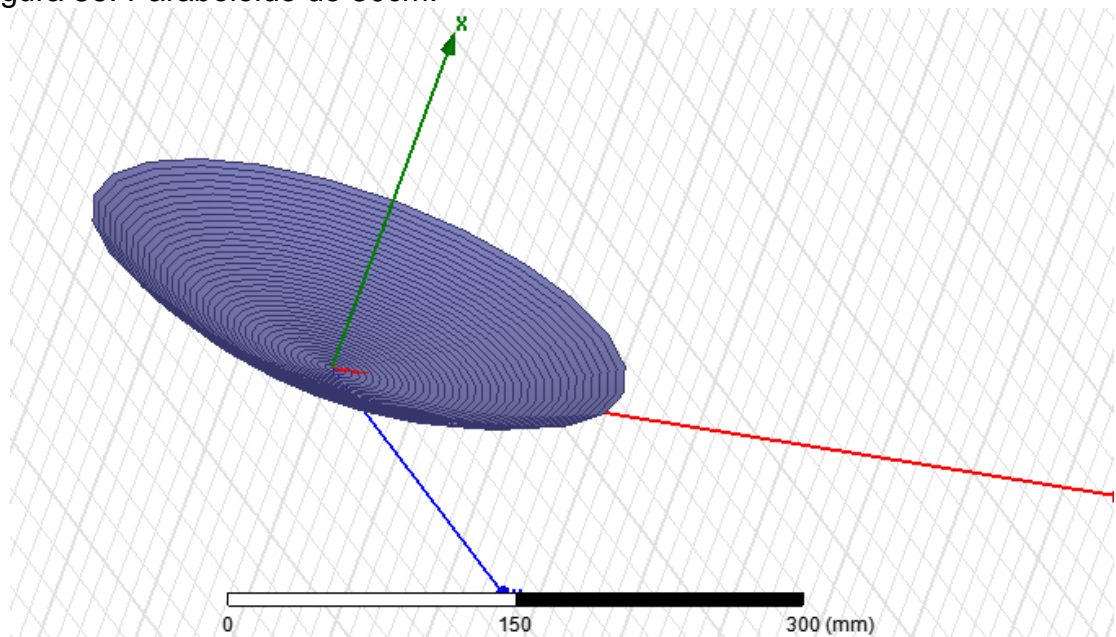
Figura 85. Parábola en HFSS para el plato de 30cm.



Fuente: Elaboración propia.

Se le aplica una rotación, con la opción "sweep" en el eje x, para obtener (ver figura 86):

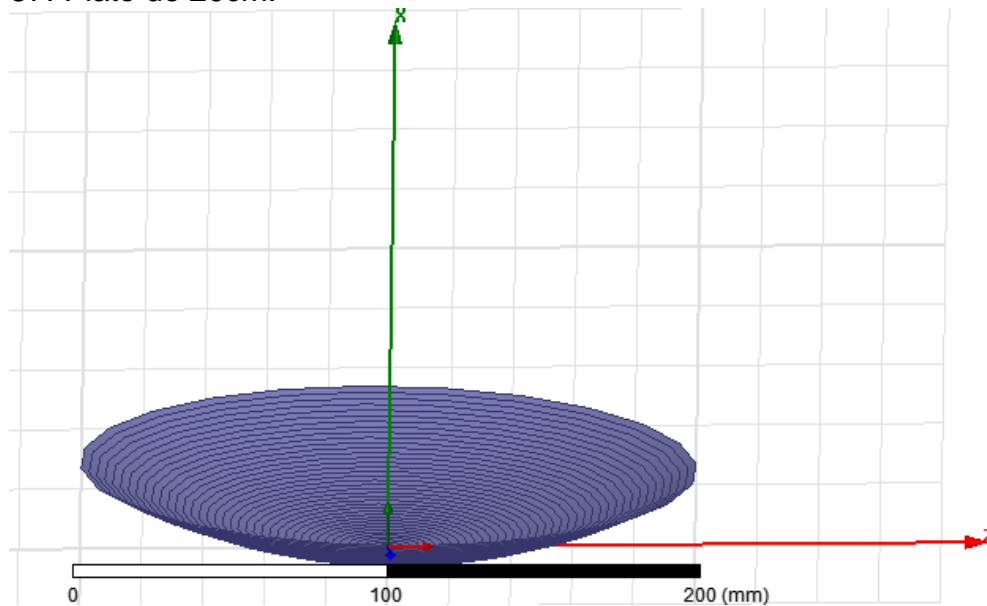
Figura 86. Paraboloide de 30cm.



Fuente: Elaboración propia.

El plato de 20cm, es una figura similar, aplicando el mismo procedimiento (ver figura 87):

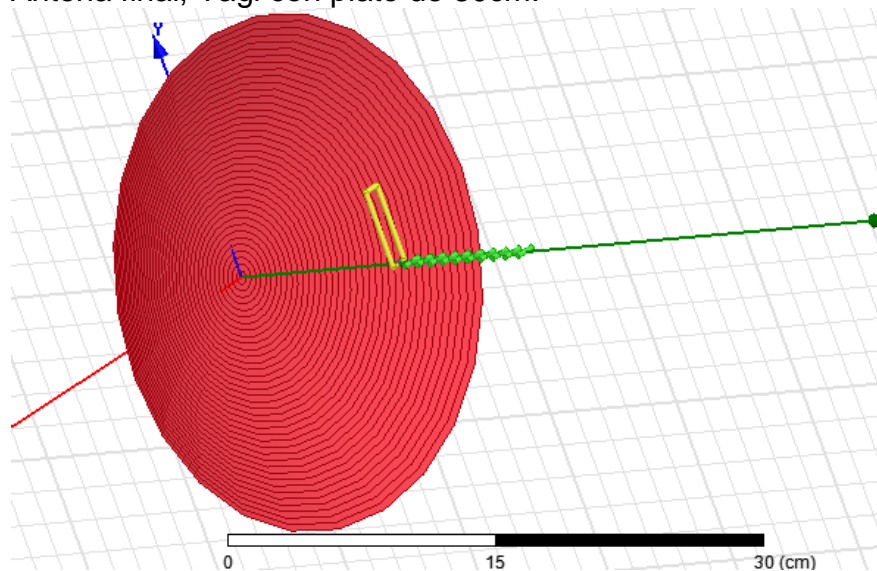
Figura 87. Plato de 20cm.



Fuente. Elaboración propia.

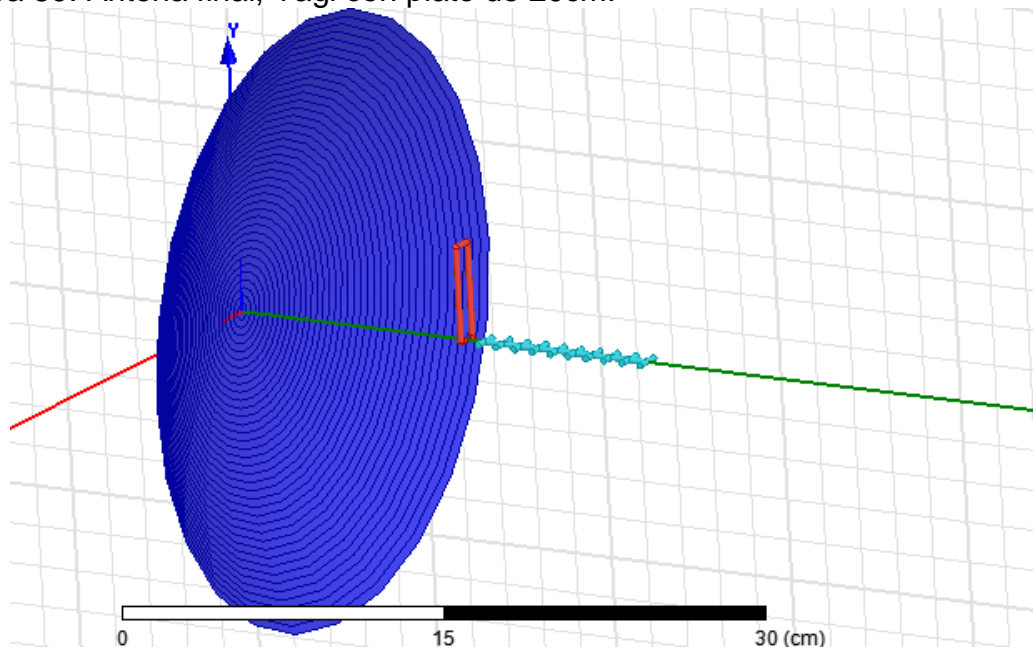
La simulación final, se llevó a cabo con cada uno de estos platos, siendo los platos a ser fabricados, su proceso se expondrá en el siguiente punto (ver figura 88 y 89).

Figura 88. Antena final, Yagi con plato de 30cm.



Fuente: Elaboración propia.

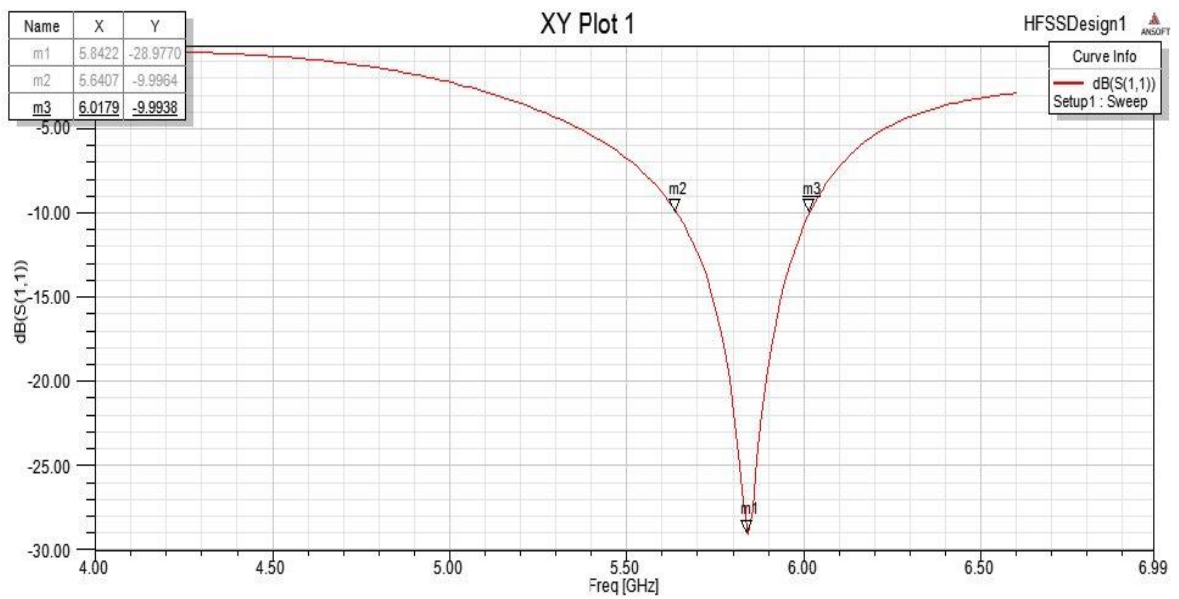
Figura 89. Antena final, Yagi con plato de 20cm.



Fuente: Elaboración propia.

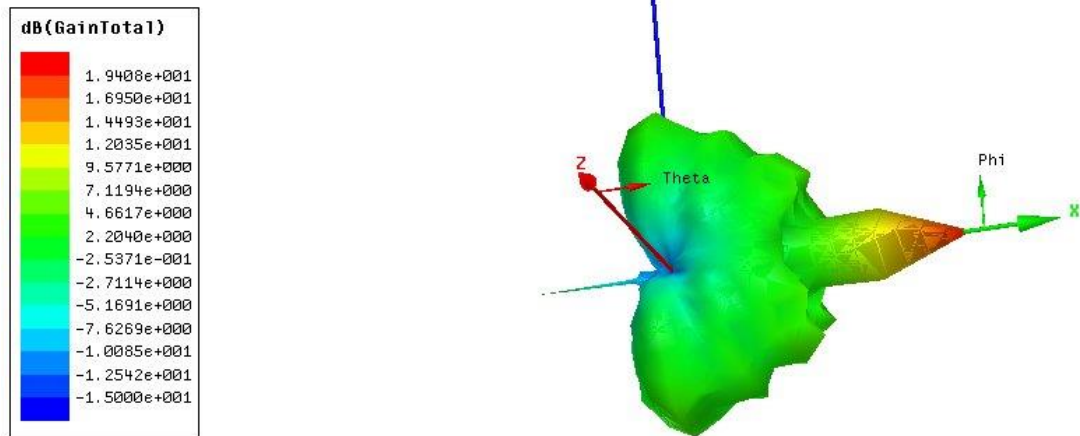
Para el plato de 30cm, se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 90,91 y 92):

Figura 90. Parámetro S_{11} , antena Yagi final con plato de 30cm.



Fuente: Elaboración propia.

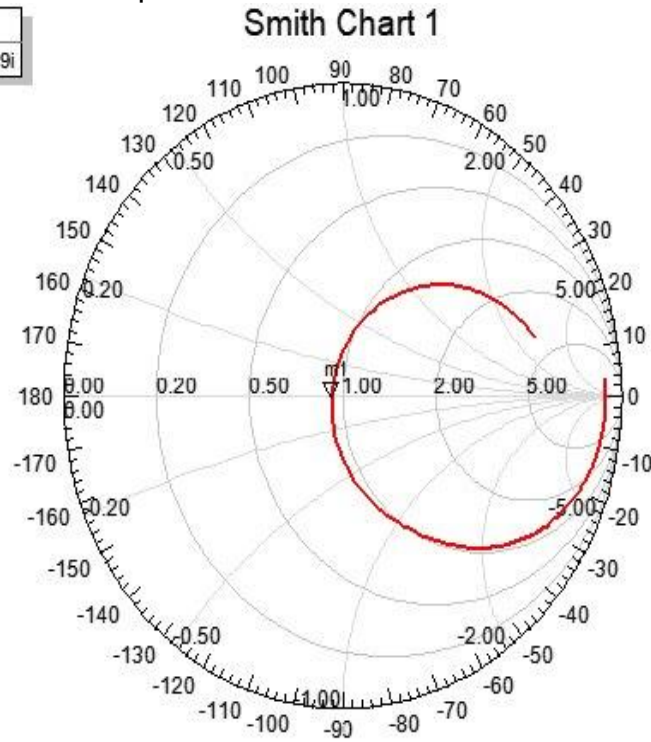
Figura 91. Ganancia antena Yagi final, con plato de 30cm.




Fuente: Elaboración propia.

Figura 92. Carta de Smith, Antena final con plato de 30cm.

Name	Freq	Ang	Mag	RX
m1	5.8422	178.3532	0.0356	0.9313 + 0.0019i



HFSSDesign1 

Curve Info

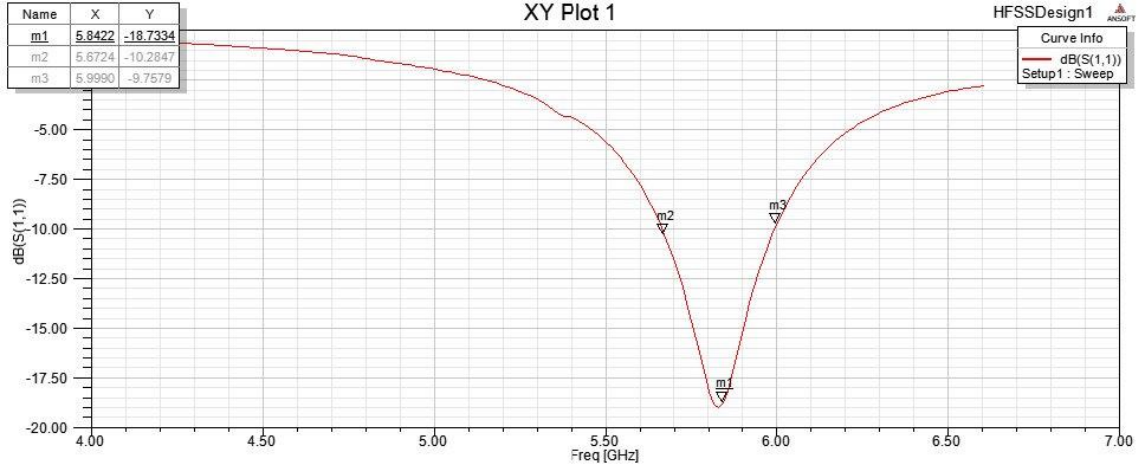
— S(1,1)

Setup1: Sweep

Fuente: Elaboración propia.

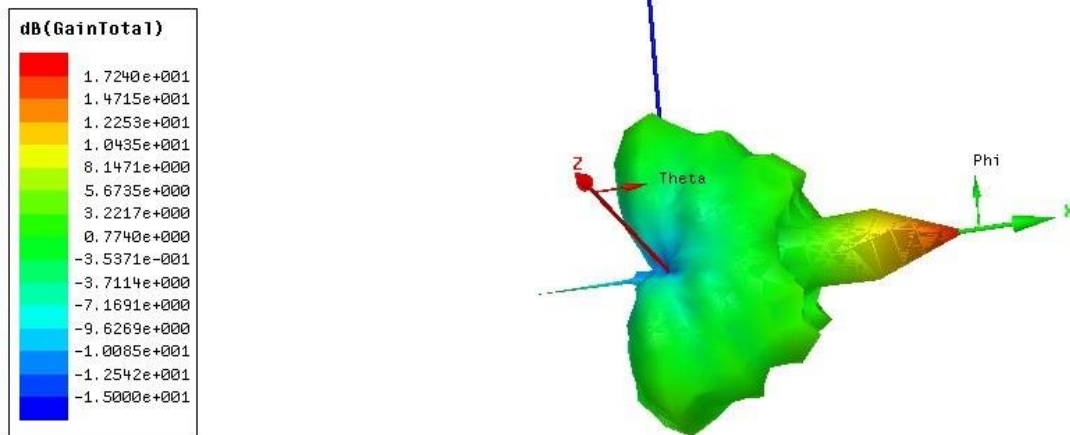
Y para el plato de 20cm, se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 93, 94 y 95):

Figura 93. Parámetro S_{11} , antena Yagi final con plato de 20cm.



Fuente: Elaboración propia.

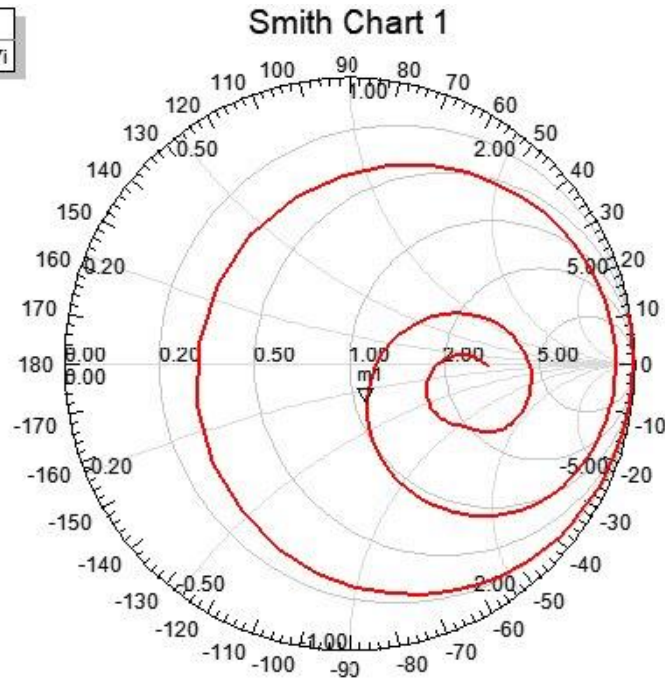
Figura 94. Ganancia antena Yagi final, con plato de 20cm.




Fuente: Elaboración propia.

Figura 95. Carta de Smith, Antena final con plato de 20cm.

Name	Freq	Ang	Mag	RX
m1	5.7940	-63.5891	0.1457	1.0978 - 0.2927i



HFSSDesign1 

Curve Info
— S(1,1)
Setup1 : Sweep
Long='1.52cm'

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario resaltar, que la máxima longitud de la caja de radiación fue de 40cm y la ganancia no llego a un punto de convergencia. A partir de esta medida las simulaciones comenzaron a presentar problemas por el equipo en donde se simulo, consumiendo todos los recursos y reiniciándolo. Se requiere de un clúster o una maquina más potente para lograr una convergencia. Aun así, los autores consideran que una ganancia simulada de 19dB y 17dB respectivamente, cumplen a cabalidad los propósitos de este trabajo de grado, por lo que encontrar la convergencia de ganancia, será dejado como un trabajo futuro.

Las dos ganancias de la antena, la directiva y de potencia se suelen confundir; la ganancia directiva es la proporción de la densidad de potencia irradiada en una dirección entre la densidad de potencia irradiada al mismo sitio por una antena referenciada, suponiendo que ambas antenas estén irradiando la misma cantidad de potencia. La ganancia de potencia es lo mismo que la ganancia directiva, excepto que se usa la potencia total alimentada a la antena; es decir, se toma en cuenta la eficiencia de la antena.⁶⁵

Usualmente se suele dar la ganancia de la antena en función de dBi y no en dB. La referencia es un radiador isotrópico, se mencionan los decibelios como dBi, o dB/radiador isotrópico, y es 2.15 dB mayor que si se usara un dipolo de media onda como referencia. Se deduce entonces: $G(dBi) = G(dB) + 2.15$.

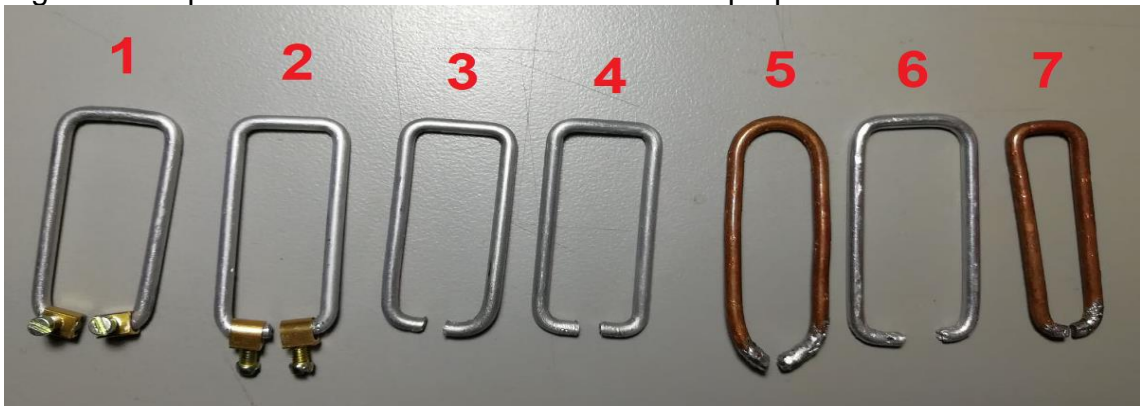
Entonces, la ganancia sugerida en dBi, para cada antena será de 21.5 y 19.5 dBi, respectivamente.

Se implementó entonces, un espaciado de 1cm para el plato de 20cm, y de 1.5 para el plato de 30cm. El simulador indica que las ganancias varían por muy poco, por lo que sería redundante añadir sus resultados, los autores esperan encontrar diferencias al momento de realizar la implementación.

2.2.6. Fabricación y caracterización:

Para la fabricación de la antena, se siguió el paso a paso de la realización de la simulación, fabricando primero los dipolos doblados, en la figura 96 se ven los prototipos para este fin basados en las medidas de la tabla 18.

Figura 96. Dipolos fabricados de acuerdo a diseño propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

⁶⁵ TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ta Edición. Phoenix: Pearson Educación, 2003, p. 378.

Como era de esperar, debido a los ajustes mecánicos que se requieren para el dipolo, se generan unos picos ajenos al diseño en los parámetros S_{11} . Se efectuaron pruebas realizando perforaciones en los dipolos siendo estos ajustados con tornillería milimétrica; al final se decidió utilizar ajustes por presión como los observados en los dipolos 1 y 2, de la figura 96. Estas pruebas se realizaron con el Analizador de Redes de la Universidad Católica de Colombia (ver figura 97). El equipo antes de ser utilizado requiere de una previa calibración en el rango respectivo de medidas (ver figura 98 y 99).

Figura 97. Analizador de redes (ROHDE&SCHARZ FSH8), propiedad Universidad Católica de Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 98. Kit de calibración incluido.



Fuente: Elaboración propia.

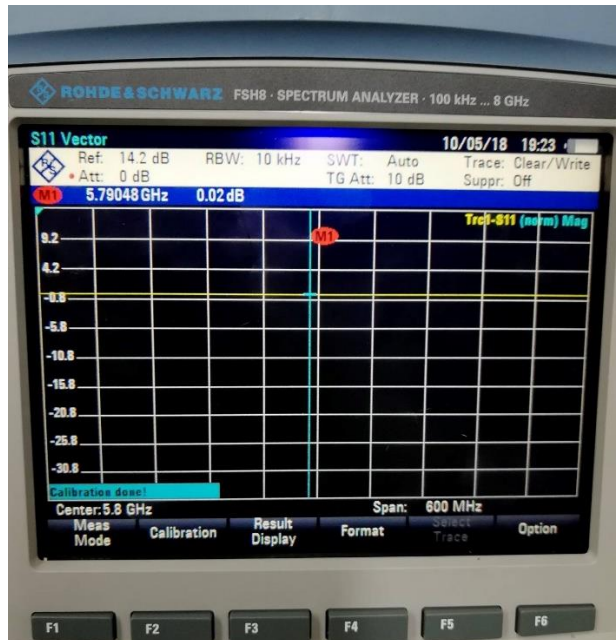
Figura 99. Analizador de redes no calibrado.



Fuente: Elaboración propia.

Se realiza una calibración fácil con el circuito abierto (ver figura 100), proceso similar al utilizado en el documento de Vargas y Zamora⁶⁶.

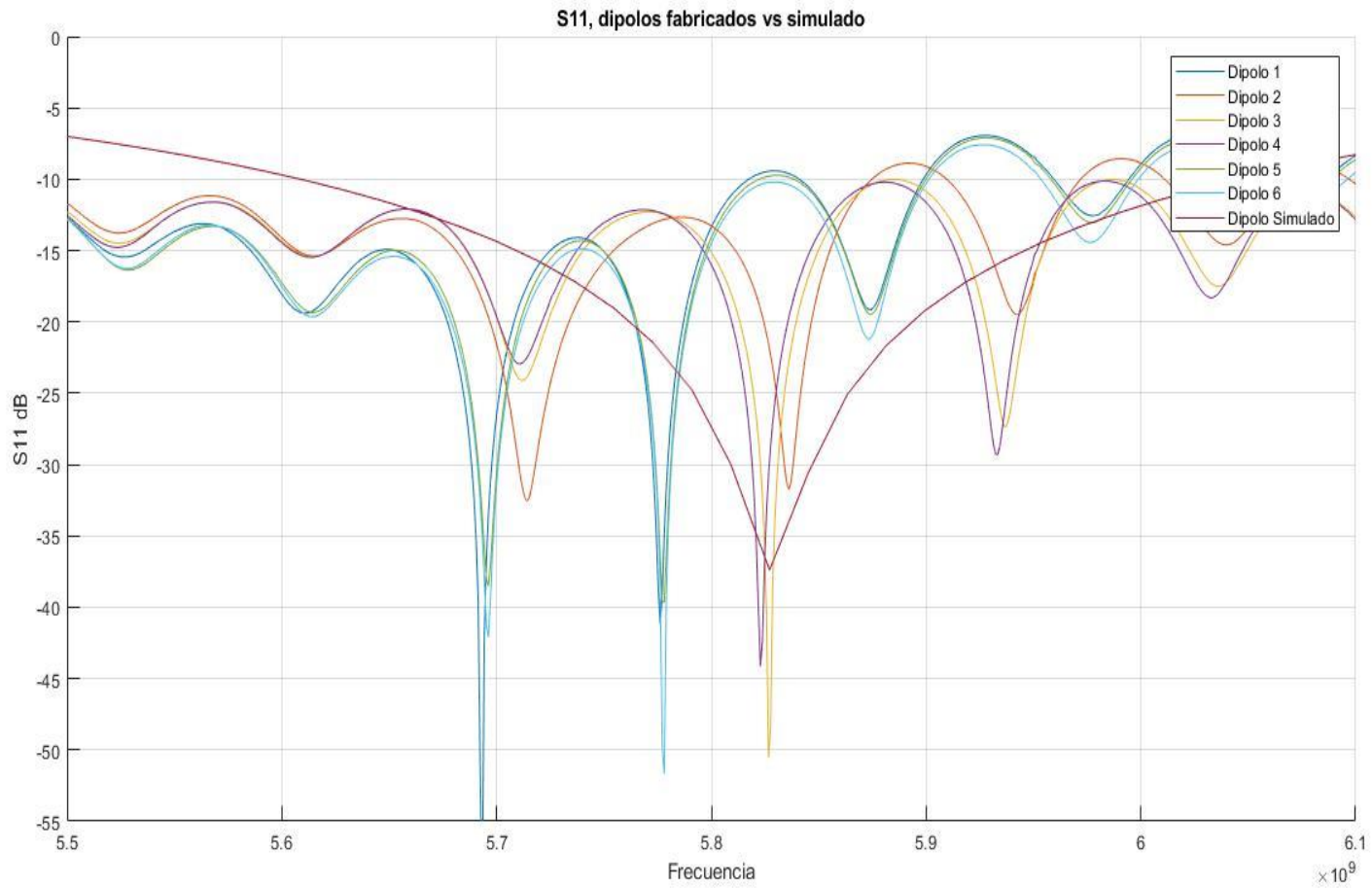
Figura 100. Analizador de redes calibrado.



Fuente: Elaboración propia.

⁶⁶ VARGAS, Duver y ZAMORA, José. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2017, p. 63.

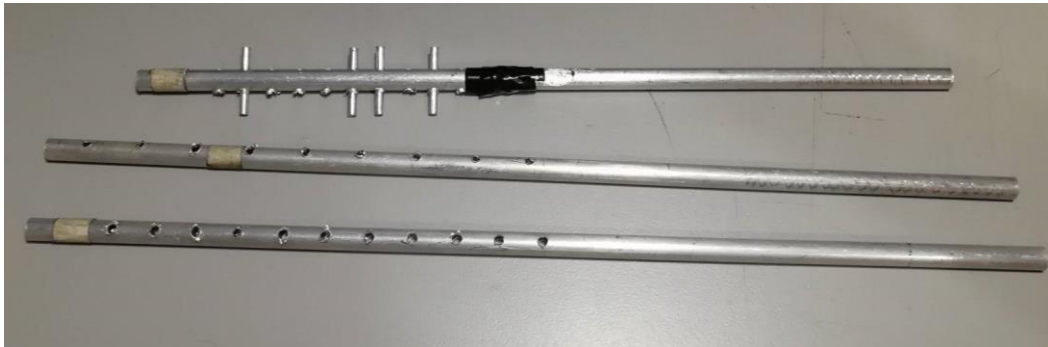
Figura 101. Parámetros S_{11} , Dipolos fabricados vs dipolo simulado.



Fuente: Elaboración propia.

Para los anteriores dipolos, todos ellos se encuentran resonando dentro del rango de frecuencia de diseño, los dipolos más cercanos al punto de simulación son el dipolo 3 y dipolo 4 de la figura 96. De igual manera se realizó pruebas con los directores para cada uno de ellos. Los booms diseñados fueron perforados en una fresadora (ver figura 102 y 103). Esto se observa en el procedimiento en el anexo A.

Figura 102. Booms fabricados para la implementación del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 103. Directores recortados frente al material original.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de una lámina de aluminio de 2mm de grosor, se fabricaron los platos parabólicos. Este proceso se realizó en una fábrica de tapas, ubicada en el sector industrial de Bogotá (ver figura 104).

Figura 104. Platos parabólicos fabricados.



Fuente: Elaboración propia.

Las estructuras de las antenas, fueron fabricadas en acero, constan de un amarre trasero para el plato y un trípode para su muestra (ver figura 105).

Figura 105. Estructuras y bases para las antenas.



Fuente: Elaboración propia.

Los ajustes finales, se realizaron con tornillería adecuada para las medidas de la estructura

2.2.7. Radioenlace, parte 2: Perfil del radioenlace:

Para la agenda del radioenlace, ya se cuentan con los elementos básicos determinados en la parte 1. La ubicación de las antenas, su cartografía, el perfil del terreno y la frecuencia de funcionamiento. El análisis de los modelos de propagación, interferencias, Link Budget, pérdidas de propagación, el problema que presenta la línea de vista y los criterios de interferencia, se realizarán en detalle para desarrollarlo y compararlo al momento de simular el radioenlace.

Se realizó, una sugerencia de equipos de radio, que sea adecuado a la distancia y la frecuencia de manejo, esto para identificar las características de hojas de datos, la potencia de los equipos y sensibilidad a momento de generar la transmisión y recepción de información, esenciales al momento de realizar el cálculo del enlace inalámbrico. Se revisó y se hizo un resumen de los datos como potencia de transmisión, la sensibilidad de recepción y el margen de tolerancia del dispositivo; para este proyecto se asume que los equipos utilizados en ambas terminales son iguales.

Se revisaron los siguientes equipos:

- NanoBridge M5.
- NanoStation M5.
- NanoStation Loco M5.
- Rocket M5.
- PowerBridge M5
- Bullet M5HP

Los equipos aquí expuestos son del fabricante Ubiquiti, altamente reconocidos para enlaces punto a punto de corta y larga distancia, la serie M5 se caracteriza por utilizar la banda de frecuencia de 5475 a 5825 MHz y son recomendados por la mayoría de los diseñadores de enlaces y los trabajos de grado expuestos, recomiendan su uso. (véase tabla 24).

Tabla 24. Resumen de características, equipos de radio sugeridos.

Equipo	Potencia de transmisión(dBm)	Sensibilidad de recepción(dBm)	Tolerancia(dB)
NanoBridge M5-22	23 a 18	-96 a -75	+/- 2
NanoBridge M5-25	23 a 18	-95 a -75	+/- 2
NanoStation M5	23 a 17	-83 a -75	+/- 2
NanoStation Loco M5	27 a 21	-94 a -75	+/- 2
Rocket M5	28 a 22	-97 a -75	+/- 2
PowerBridge M5	27 a 21	-83 a -75	+/- 2
Bullet M5HP	25 a 19	-83 a 74	+/- 2

Fuente: Elaboración propia.

Estos equipos funcionan con un estándar de modulación 802.11n/airMAX. Al ser productos americanos, su frecuencia de uso va de 5170 a 5850 MHz. El rango de potencia de transmisión y de sensibilidad de recepción, indica las variables existentes para los equipos mencionados, en donde se encuentran combinaciones para estas características. Los equipos Nanobridge y Nanostation tienen un costo de aproximadamente 400.000 pesos colombianos. Los otros equipos rondan los 750.000 pesos.

Se seleccionó para la proyección de este radioenlace, el equipo NanoStation loco M5 MCS5, con 20dBm de potencia de transmisión y una sensibilidad de recepción de -83dBm. Debido a su bajo costo de 350.000 pesos y su rango de funcionamiento de aproximadamente 7km (según el fabricante), hace que este equipo sea el ideal para la proyección del radioenlace propuesto.

A continuación, se realizaron los cálculos requeridos para el radioenlace, así como una solución al problema de línea de vista existente.

Cálculos para el perfil del radioenlace:

Para saber con exactitud en qué punto y posición deben ir las antenas, se deben realizar los cálculos de ángulo de Azimuth, ángulo de elevación, distancia del enlace. Como primer paso mediante una aplicación geográfica se obtienen la latitud y longitud en radianes de cada punto potencial para las antenas. Con estos datos empieza el proceso de perfil del radioenlace, que será hallar la distancia entre ambos puntos, (véase ecuación 19)

$$\Delta longitud = 74.06584 - 74.065801 = 0.000039$$

$$\Delta latitud = 4.634209 - 4,604331 = 0.029878$$

$$\Delta h = 2578.8 - 2632.9 = 54.1m \Rightarrow 0.0541Km$$

$$D = \sqrt{(\Delta longitud \times 111.32)^2 + (\Delta latitud \times 111.32)^2 + (\Delta h(Km))^2} \quad (19)$$

$$D = \sqrt{(0.000039 \times 111.32)^2 + (0.029878 \times 111.32)^2 + (0.0541)^2} = 3.3264Km$$

El cálculo del ángulo de Azimut se mide tomando como referencia el norte en sentido de las manecillas del reloj, este ángulo es muy importante ya que es el que determina cuanto debe girar la antena sobre su propio eje para realizar el enlace, (véase ecuación 20, 21 y 22)

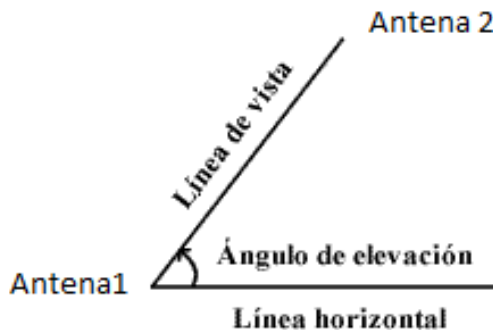
$$\theta_{Azimut} = \arctan\left(\frac{Longitud_1 - Longitud_2}{Latitud_1 - Latitud_2}\right) + \theta_{Correspondiente} \quad (20)$$

$$\theta_{Azimutucc} = \arctan\left(\frac{-74.06584 - (-74.065801)}{4.634209 - 4.604331}\right) + 180^\circ = 179.9252^\circ \quad (21)$$

$$\theta_{Azimutua} = \arctan\left(\frac{-74.06584 - (-74.065801)}{4.634209 - 4.604331}\right) + 360^\circ = 359.9252^\circ \quad (22)$$

Y por último el ángulo de elevación de la antena es el ángulo visto desde el plano horizontal y determina en qué posición se debe poner la antena Como se muestra en la figura 106.

Figura 106. Vista horizontal para ángulo de elevación de antena.



Fuente: RESTREPO, Jairo. Compendio de telecomunicaciones, conceptos básicos para el aprendizaje de los sistemas de telecomunicación. Op. Cit., p. 42.

$$\theta_{Elevacion} = \arctan\left(\frac{Altura_1(Km) - Altura_2(Km)}{D(Km)}\right) \quad (23)$$

$$\theta_{Elevacion} = \arctan\left(\frac{((2.6329) - (2.5788))}{3.3264}\right) = 0.93188^\circ \quad (24)$$

Estos cálculos en las ecuaciones 23 y 24, fueron confirmados en la parte 1 del cálculo del radioenlace, en donde el sistema arrojó valores similares a los calculados. Para determinar la viabilidad de un radioenlace punto a punto se tiene que tener en cuenta la distancia del enlace, la frecuencia de trabajo y las especificaciones de los equipos. Cuando se diseña un enlace punto a punto, se tiene que abarcar una relación entre la potencia que se desea en el enlace y la distancia de los dos puntos de conexión.

Cuando una señal sale de un equipo transmisor y pasa por cables y conectores que están conectados a una antena, la señal va a tener una atenuación pequeña en un principio, pero esta es lineal conforme aumenta la distancia del cable. También la señal sufre atenuación de tipo logarítmica, esta atenuación la sufre al momento de propagarse a través de la antena en el espacio libre y esta aumenta o disminuye de acuerdo a la distancia que haya entre ambos puntos.

Ecuación sensibilidad:

Un aspecto muy importante a tener en cuenta son las pérdidas de propagación en el espacio libre, ya que acá es donde se conoce que se pierde la mayor cantidad de potencia de la señal. Como se había ya mencionado anteriormente este parámetro indica como disminuye logarítmicamente la señal en el espacio libre teniendo en cuenta la distancia de propagación y la frecuencia de trabajo, (véase ecuación 25)

$$L_o = \left(\frac{4\pi \times d}{\lambda}\right)^2 \quad (25)$$

Donde **d** es la distancia del radio enlace, $\lambda = \frac{c}{f}$ para lo cual **f** la frecuencia de trabajo (5.8GHz) y $C = 3 \times 10^8$ m/s es aproximadamente la constante de la velocidad de la luz. Al reacomodar las ecuaciones y sacando logaritmo a cada lado se obtiene la ecuación 26⁶⁷.

$$L_o = 20 \log\left(\frac{4\pi \times 10}{3}\right) + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (26)$$

$$L_o(dBm) = 32.44 + 20 \log(fMHz) + 20 \log(dKm) \quad (27)$$

⁶⁷ UIT-R P.525-3 – Cálculo de la atenuación en el espacio libre, 2016, p. 2. Disponible en < https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-1!!PDF-S.pdf>

$Lo(dBm) = 118.0965 \text{ dB} \rightarrow$ Para la distancia del enlace propuesto.

La ecuación 27 muestra más claramente la relación de pérdidas de espacio libre dependiendo de la distancia a una frecuencia específica (véase tabla 25).

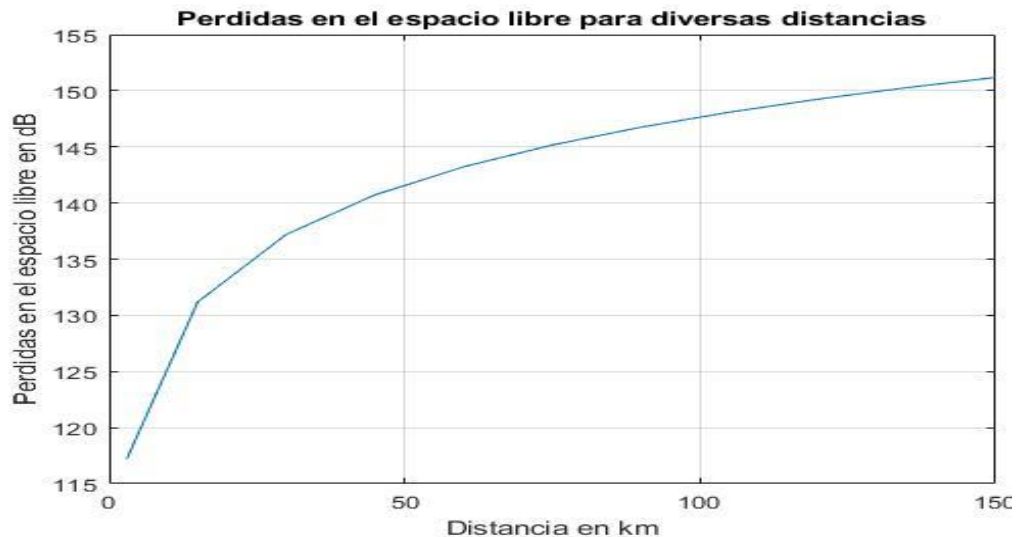
Tabla 25. Pérdidas de trayectoria en el espacio libre para diversas distancias a una frecuencia de 5.8GHz.

Distancia Km	Atenuación dB
3	117,210985
15	131,190385
30	137,210985
45	140,732810
60	143,231584
75	145,169785
90	146,753410
105	148,092345
120	149,252184
135	150,275235
150	151,190385

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 107 se muestra las pérdidas en espacio libre para distancias entre 3Km y 150Km

Figura 107. Pérdidas por dispersión a diferentes distancias.



Fuente: Propia.

Zona de Fresnel:

Otro factor importante a tener en cuenta para el diseño de un radioenlace es el cálculo de la zona de Fresnel. La zona de Fresnel se puede ver como un gran elipsoide mostrado en la figura 72, este aspecto se calcula para analizar el nivel de interferencia que afecta el radioenlace. “Lo ideal es que la primera zona de Fresnel no esté obstruida, pero normalmente es suficiente despejar el 60% del radio de la primera zona de Fresnel para tener un enlace satisfactorio”⁶⁸.

Adicional a esto se tiene que tener en cuenta que para grandes distancias se tiene que tomar también el factor de curvatura de la tierra.

Para calcular este parámetro tenemos en cuenta la ecuación 28 y 29:

$$r = 17.32 \times \sqrt{\frac{d1 \times d2}{d \times f}} \quad (28)$$

Donde:

r : Radio de la zona de Fresnel [m]
 d : Distancia transmisor a receptor [Km]
 $d1$: Distancia transmisor a un obstáculo [Km]
 $d2$: Distancia obstáculo a receptor [Km]
 f : Frecuencia [GHz]

$$r = 17.32 \times \sqrt{\frac{2.377 \times 0.945}{3.322 \times 5.8}} = 5.9137 \text{ m} \quad (29)$$

Luego se halla el 60% del resultado total como se muestra en la ecuación 30 para saber cuál es el mínimo radio permisible de la zona de Fresnel para que el enlace se logre satisfactoriamente.

$$r_{min} = 0.6 \times r \quad (30)$$

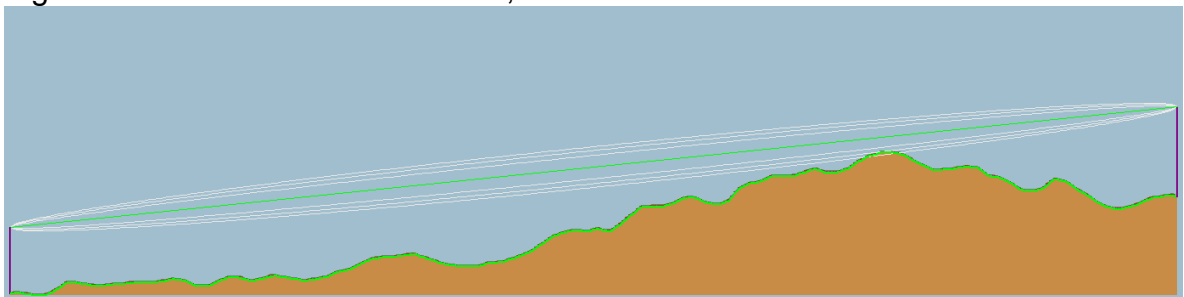
r : Radio de la zona de Fresnel [m]
 r_{min} : Radio mínimo [Km]
 $r_{min} = 0.6 \times 5.9137 = 3.54826 \text{ m}$

⁶⁸ BUETTRICH, Sebastián. Calculi de radioenlace [en línea]. Tshwane: Alberto Pascual [citado 1 mayo de 2018]. Disponible en internet <http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v02.pdf >

El radio mínimo permitido para la zona de Fresnel será de 3.54826 m para que el enlace sea óptimo. En la figura 35 (página 66), se puede observar la zona de Fresnel sobre el perfil del terreno, por lo que, al no tener línea de vista, para asegurar este radio, se requiere de algunas de las dos siguientes opciones:

- Aumentar la infraestructura para las antenas: Para esto se requerirá de permisos para modificar la infraestructura de ambos edificios (ambas instituciones tendrán que estar de acuerdo con las modificaciones en sus edificios); en donde se analizaran las cargas de las nuevas torres, alturas y viabilidad según las normas de construcción colombiana. La oficina de planeación otorgara los planos de la infraestructura y el permiso para la construcción. Según el software Radio Mobile, para asegurar una zona de Fresnel viable para el proyecto, la altura de las antenas sobre el suelo deberá ser de aproximadamente de 36 metros de altura. Considerando que ambos edificios son lo suficientemente altos, requerirán de una infraestructura adiciones de aproximadamente 10 metros para el Edificio de la sede nueva de la Universidad Católica de Colombia, y de unos 7 metros para el edificio Julio Mario Santo Domingo de la Universidad de los Andes (ver figura 108).

Figura 108. Nueva zona de Fresnel, aumentando la altura de las antenas.



Fuente: Elaboración propia.

- Ubicar una repetidora en el cerro: En los cerros de Bogotá, se encuentra ya una infraestructura para la ubicación de antenas, que se podrían alquilar para el uso de una repetidora. El uso de estas facilitaría la implementación del enlace punto a punto entre ambas instituciones, sin exigir una mayor obra en las infraestructuras de las Universidades, pero si requiriendo un gasto adicional para el alquiler de la ubicación de la antena repetidora.

Para la elaboración de este trabajo de grado, no se entró en detalle sobre la solución de una repetidora, ya que su fin único es el de diseñar antenas, por lo que se manejara la opción de ubicar antenas a mayor altura.

Los sistemas inalámbricos también presentan pérdidas por atenuación debido a las lluvias, pero este factor afecta más los sistemas que se ubican en donde las lluvias son torrenciales. “Este efecto es más sensible para radioenlaces superiores a 5GHz”.

Según recomendaciones de la UIT-R, la atenuación debido a la lluvia se calcula de la siguiente manera, (véase ecuación 31, 32 y 33)

$$\gamma r = k \times R^\alpha \quad (31)$$

Donde:

γr : Atenuación específica (dB/km)

k : Coeficiente que se determina en función de la frecuencia

R : Intensidad de lluvia (mm/h)

α : Coeficiente que se determina en función de la frecuencia

$$k = \frac{kh + kv + (kh - kv)\cos^2\theta \times \cos 2\tau}{2} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{kh \times \alpha h + kv \times \alpha v + (kh \times \alpha h - kv \times \alpha v)\cos^2\theta \times \cos 2\tau}{2k} \quad (33)$$

Donde:

kh : Coeficiente polarización horizontal

kv : Coeficiente polarización vertical

αh : Coeficiente polarización horizontal

αv : Coeficiente polarización vertical

θ : Angulo de elevación del trayecto

τ : Angulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal

Los coeficientes $kh kv \alpha h \alpha v$ se pueden hallar en la tabla 26:

Tabla 26. Coeficientes de polarización a diversas frecuencias.

Frecuencia (GHz)	kh	αh	kv	αv
1	0.0000259	0.9691	0.0000308	0.8692
1,5	0.0000443	1.0185	0.0000574	0.8957
2	0.0000847	1.0664	0.0000998	0.9490
2,5	0.0001321	1.1209	0.0001464	1.0085
3	0.0001390	1.2322	0.0001942	1.0688
3,5	0.0001155	1.4189	0.0002346	1.1387
4	0.0001071	1.6009	0.0002461	1.2476
4.5	0.0001340	1.6948	0.0002347	1.3987
5	0.0002162	1.6969	0.0002428	1.5317
5.5	0.0003909	1.6499	0.0003115	1.5882
6	0.0007056	1.5900	0.0004878	1.5728
7	0.001915	1.4810	0.001425	1.4745
8	0.004115	1.3905	0.003450	1.3797
9	0.007535	1.3155	0.006691	1.2895

Fuente: UIT-R P.838-3 – Modelo de La Atenuación Específica Debida a La Lluvia Para Los Métodos de Predicción, 1992, p. 5 Disponible en <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!!PDF-S.pdf>

En la tabla 26, de recomendación UIT-R P.838-3 no se encuentran los valores específicos para la frecuencia de 5.8 GHz, se tomarán los valores para la frecuencia de 6GHz ya que es el valor más aproximado. El ángulo de inclinación con respecto a la horizontal τ es 0° ya que la polarización es lineal horizontal las anteriores ecuaciones de α y k se simplifican quedando de la siguiente manera en las ecuaciones 34 y 35.

$$k = \frac{kh + kv}{2} \quad (34)$$

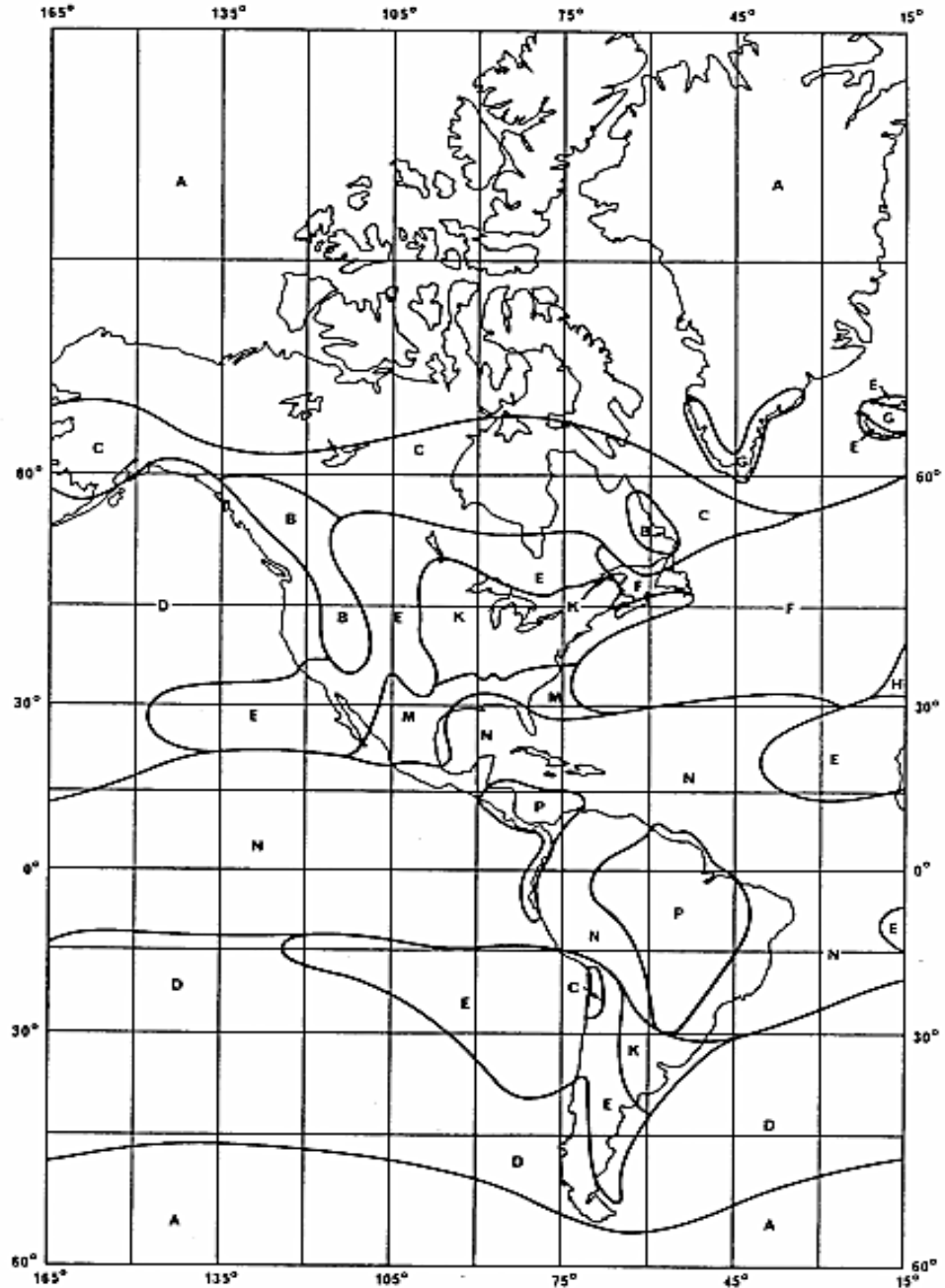
$$\alpha = \frac{kh \times \alpha h + kv \times \alpha v}{2k} \quad (35)$$

$$k = \frac{0.0007056 + 0.0004878}{2} = 0.0005967$$

$$\alpha = \frac{(0.0007056 \times 1.5900) + (0.0004878 \times 1.5728)}{2(0.0005967)} = 1.58296$$

Teniendo en cuenta la figura 109 y de acuerdo a la tabla 26 se toma el valor de R para un porcentaje de lluvia al 0.1%.

Figura 109. Intensidad de lluvia [mm/h] de acuerdo con la recomendación P.837-1.



Fuente: UIT-R P.837-1 – Características De La Precipitación Para Establecer Modelos De Propagación, 1992, p. 2 Disponible en <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!!PDF-S.pdf>

Tabla 27. Intensidad de la lluvia excedida (mm/h)

Porcentaje de tiempo (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
1.0	0.1	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12
0.3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.03	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0.01	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

Fuente: Ibíd., p. 1.

Como se observa en la figura 109 la zona de Colombia corresponde a la letra N y su valor correspondiente según la tabla 27 es de $R=35\text{mm/h}$. Ya con todos los valores se resuelve la ecuación 36 para hallar el valor de la atenuación.

$$\gamma r = k \times R^\alpha \quad (36)$$

$$\gamma r = 0.0005967 \times 35^{1.58296} = 0.1719 \text{ dB/Km}$$

Para enlaces de largas distancias hay que tener en cuenta algo muy importante, la curvatura que presenta la tierra ya que esto puede afectar en la línea de vista entre ambos puntos. Como el enlace que acá se presenta no supera los 5 Km no es necesario hacer estos cálculos.

Link Budget:

Método de cálculo del nivel de señal radioeléctrica (deseada o interferente) en el receptor para una determinada potencia de entrada en un transmisor. Involucra características de los sistemas de transmisión y recepción, de la señal radioeléctrica y del entorno de transmisión. Es un conteo de todas las ganancias y atenuaciones de una señal radioeléctrica de un sistema de comunicaciones.

Se tienen en cuenta los siguientes parámetros, potencia de recepción (dBm), potencia de transmisión (dBm), pérdidas del cable de transmisión (dB), ganancia de la antena de transmisión (dBi), pérdidas de propagación (dB), ganancia de la antena de recepción (dBi) y las pérdidas del cable de recepción (dB).

En donde las pérdidas de propagación (L), será la suma de las demás pérdidas asociadas al viaje de la señal de una antena a otra. Debido a que la frecuencia es menor a 10GHz, no se ve afectado por la mayoría de las pérdidas asociadas a la propagación, pero si por el factor incidente de la lluvia, por lo que asumiremos las pérdidas de propagación en 140dB.

Confiabilidad:

Se considera la probabilidad de que los elementos del radioenlace, efectúen satisfactoriamente su función a la que fueron destinados durante un periodo determinado y en condiciones específicas. Una alta confiabilidad se puede obtener por:

- Un tiempo alto entre fallas.
- Una configuración con protección a tiempos de espera por recalentamiento.
- Eficiente monitoreo en servicio.
- Circuitos de intercomunicación entre estaciones terminales y repetidoras mediante canales de servicio.
- Circuitos eficientes de control remoto a lo largo de la red.
- Procesos eficientes de pruebas integradas.
- Diseño y construcción modular, para facilitar su mantenimiento.
- Bajo tiempo medio de reparación.

Teniendo en cuenta los parámetros acá calculados y las especificaciones técnicas del equipo, se realizó la simulación del radioenlace. Lastimosamente no se pudo realizar en el Sistema de Simulación en Línea de la ANE, ya que la frecuencia de resonancia no se encuentra indicada para simulaciones, por lo que se llevó a cabo en el software Radio Mobile, (véase tabla 28)

Tabla 28. Resumen de características para el radioenlace, puntos para la simulación.

Característica	Valor
Ganancia antena 1	21.5 dBi
Ganancia antena 2	19.5 dBi
Distancia radioenlace	3.322 km
Potencia Tx	20 dBm
Sensibilidad Rx	-83 dBm
Perdidas de propagación	140 dB
Perdidas por línea de transmisión	0.3 dB

Fuente: Elaboración propia.

En caso de requerir implementar este radioenlace, es necesario seguir el proceso para la instalación de estaciones de telecomunicaciones, (esto bajo el supuesto que ambas universidades aprobaron el proyecto y existen los recursos necesarios para su implementación). Sera necesario entregar el formulario F14 a la Secretaria Distrital de Planeación, en donde se requerirá de información de los solicitantes y de los predios, una descripción del proyecto y unos registros fotográficos. Por último,

se requirió de una descripción puntual de las estaciones a instalar. Este formulario es el primer paso en una larga lista de entrega para el componente urbanístico, técnico y jurídico. Los autores consideran innecesario entrar en detalle acerca del proceso de permisos de construcción.

2.2.8. Simulación del radioenlace:

Para la simulación como se explicó en el anterior apartado, se realizó en el software de Radio Mobile, para su uso solo requiere de crear una cuenta de manera gratuita y su interfaz es fácil de utilizar. Una vez determinadas las posiciones, se realiza el cálculo de enlace, con los parámetros ya calculados (ver figuras 110, 111, 112 y 113).

Figura 110. Interfaz de Radio Mobile, con valores ingresados.

Nuevo enlace

De: Ucatolica Sede4

Altura de la antena (m sobre el suelo): 37 (131.23 ft)

A: UniAndes Ed. JulioMario

Altura de la antena (m sobre el suelo): 37 (131.23 ft)

Descripción: Tesis FINAL

Frecuencia (MHz): 5825

Potencia Tx(Watts): 0.1 (20.00 dBm)

Pérdida de la línea Tx (dB): 0.3

Ganancia de la antena Tx (dBi): 21.5

Ganancia de la antena Rx (dBi): 21.5

Pérdida de la línea Rx (dB): 0.3

Sensibilidad Rx (µV): 16 (-82.92 dBm)

Fiabilidad requerida (%): 97

Utilizar cobertura del terreno:

Utilizar dos rayos:

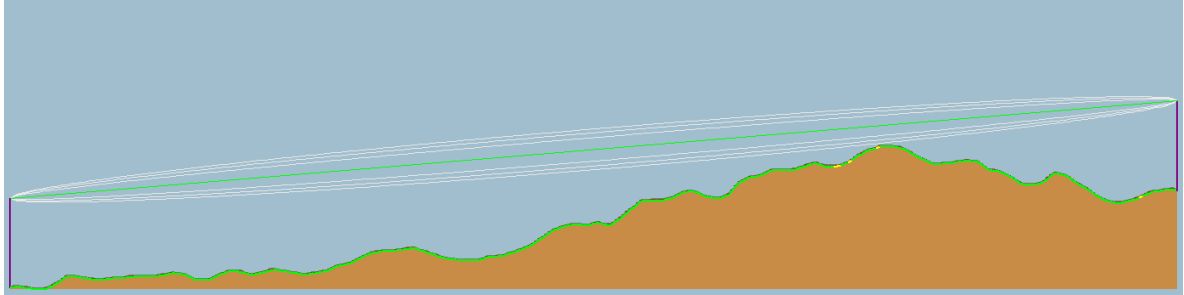
Definir como valores predeterminados Restaurar valores originales

Enviar

Cancelar

Fuente: Elaboración propia.

Figura 111. Zona de Fresnel y viabilidad del radioenlace.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 112. Pérdidas para propagación calculadas por Radio Mobile.

	Propagation
Pérdida en espacio libre	118.14 dB
Pérdida por obstrucción	0.42 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	24.75 dB
Pérdida total	143.31 dB

Fuente: Elaboración propia.

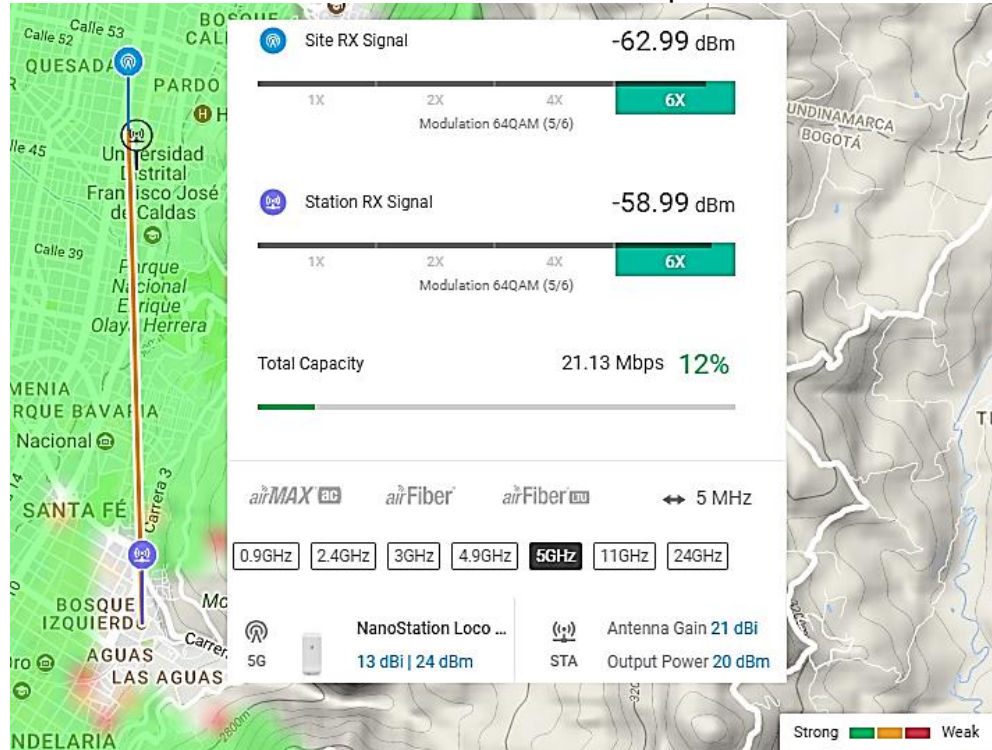
Figura 113. Actuación del radioenlace, valores calculados según radio Mobile.

Performance	
Distance	3.322 km
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	13.183 W
Ganancia del sistema	146.48 dB
Fiabilidad requerida	97.000 %
Señ recibida	-80.91 dBm
Señ recibida	20.16 μ V
Márgen de escucha	3.17 dB

Fuente: Elaboración propia.

Como confirmación final, se realiza una simulación en línea, haciendo uso de la plataforma de Ubiquiti (ver figura 114), fabricante del equipo de radio seleccionado, que, con una antena de ganancia inferior a la diseñada, muestra que el radioenlace sigue siendo viable, y con la capacidad total de funcionamiento del equipo.

Figura 114. Simulación en línea con software de Ubiquiti.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.9. Análisis de resultados:

En esta sección, los resultados obtenidos en cada punto desarrollado de la metodología son los siguientes:

- **Radioenlace, parte 1: Definición de segmento de cobertura:**

En esta etapa se determinó las ubicaciones para el radioenlace, seleccionando dos edificios altos de ambas universidades, como lo son La Sede 4 de la Universidad Católica de Colombia y el Edificio Julio Mario Santo Domingo de la Universidad de los Andes. Se calcularon las principales características de estas ubicaciones y se determinó la distancia en 3.322km. También se detectó un obstáculo en la línea de vista del enlace.

- **Análisis y elección de frecuencia:**

En esta etapa, se hizo un estudio bibliográfico de posibles frecuencias para enlaces punto a punto, según recomendaciones de la UIT y la FCC. Se determinó utilizar una frecuencia de banda libre, destacando la banda de 24GHz como la mejor opción

teórica para el radioenlace. Como el propósito del trabajo de grado es diseñar y fabricar antenas, se descartó por falta de equipos para la caracterización de una futura antena construida para funcionar a esta frecuencia. Se decidió utilizar una frecuencia en la banda de 5725 a 5850 MHz, que es muy popular para enlaces punto a punto y está delimitada para este fin por la resolución 711 de 2016 (condición especial 3.5).

- **Análisis y elección de antena:**

En esta etapa, basados en la frecuencia de resonancia para la antena y fijando una ganancia mínima de 13 dBi; la antena debe ser altamente directiva, por lo que se estudiaron dos casos antenas Yagi y antenas con reflector parabólico. Se determinó la fabricación de una antena Yagi-Uda, debido al trabajo de diseño y optimización que esta requiere, presentando un reto a nivel de Ingeniería. Se le decidió añadir un reflector parabólico, con el fin de aumentar sus características de directividad y ganancia.

- **Investigación, documentación y diseño de la antena:**

En esta etapa se realizó un estudio bibliográfico extenso, sobre diseño de antenas Yagi, debido a su cantidad de variables, como lo son radio de los elementos, material, distancia de gap, longitud y espaciado de los elementos, existen muchas técnicas de diseño. Se revisaron tres autores en general, destacando el diseño propuesto por Balanis, el cual es fundamentado en una norma técnica del departamento de comercio de los Estados Unidos de Peter Viezbicke, siendo el estudio más completo sobre fabricación y optimización de antenas Yagi.

- **Modelado de diseño propuestos en literatura:**

En esta etapa, se realizó el paso a paso expuesto en el documento de Viezbicke, generando en el software Ansys HFSS® un modelo bajo estas condiciones de diseño. Se tomaron valores conocidos dentro de las gráficas del documento, el diseño se observa en la figura 47, usando como elemento radiante un dipolo convencional de $\lambda/2$. El parámetro S_{11} en la figura 49 (página 95), no resonó en la frecuencia de diseño.

- **Propuesta de diseño y optimización paramétrica:**

En esta etapa, inicialmente se indicó el proceso para realizar una optimización paramétrica y por medio de algoritmos genéticos en Ansys HFSS®. Se determinó el radio de los elementos de la antena en 3.17mm (1.8”), ya que estas dimensiones de varilla son comerciales y fáciles de obtener, reduciendo el costo del proyecto.

Posteriormente, se realizó el diseño de un dipolo convencional, aplicando la técnica de optimización paramétrica para las variables de longitud y gap, obteniendo una ganancia de 2.2dB y una gráfica de S_{11} resonante para la frecuencia diseñada. Por recomendación bibliográfica, se pasó a diseñar un dipolo doblado, que, a tener más variables a tener en cuenta, se le aplicó el método de optimización por algoritmos genéticos, obteniendo unas medidas adecuadas y dentro del rango de resonancia, como se observa en la figura 68. Esta antena tuvo una ganancia de 5.45dB, y sus medidas están detallados en la tabla 18.

Luego se realizó el paso a paso del documento de Viezbicke, se decidió utilizar un total de 10 directores. Al no estar la relación d/λ en la gráfica, se hizo un ajuste de curvas para determinar valores aproximados a esta relación, el mismo proceso se hizo con el boom. El modelo del paso a paso bajo estos parámetros se observa en la figura 79 con resultados cercanos como se observa en la figura 80.

En este punto el tamaño de la caja de radiación pasó a ser un factor relevante para los tiempos de simulación, siendo muy pequeña afectaba los resultados y encontrar un punto de convergencia para los resultados, implicó ser un proceso demasiado largo, por lo que se optó por utilizar una medida de 6λ , en todas sus caras.

La optimización por el método de algoritmos genéticos, se efectuó en función de la longitud de los elementos y no en su espaciado, que se fijó en 0.2λ . La figura 82 muestra un resumen de los valores arrojados por el simulador, destacando el mejor y exponiendo sus medidas en la tabla 22, casi todos los directores resultaron con una longitud de 2,5cm, la ganancia para la antena Yagi-Uda resultó ser de 11.5dB.

Finalmente, se realizó el diseño de dos platos parabólicos (de 20 y 30cm), fijando el ángulo de cobertura recomendado a 62° . Mostrando el paso realizado en Ansys HFSS® para la inclusión de los platos parabólicos, basados en un sólido por revolución a partir de su ecuación de parábola, se obtuvieron las medidas expuestas en la tabla 23.

Estas simulaciones se lograron efectuar hasta un máximo de 8λ en el tamaño de la caja de radiación, en donde el equipo se reiniciaba en cierto punto de la simulación. La ganancia máxima obtenida bajo esta medida, fue de 17dB para la antena con el plato de 20cm y de 19dB con el plato de 30cm. Se hizo su conversión a dBi, unidad de medida de los simuladores de radioenlace, obteniendo 19.5dBi y 21,5dBi de ganancia respectivamente.

- **Fabricación y caracterización:**

En esta etapa, se realizó inicialmente el diseño del dipolo doblado, tomando una muestra de 7 dipolos fabricados, cada uno de ellos con pequeños cambios en medidas (véase figura 96). Se explicó el proceso de calibración del analizador de

redes de la Universidad Católica de Colombia, y los resultados para el parámetro S_{11} se muestran en la figura 101. Se especifican los detalles de fabricación de los directores, boom, Balun y los platos, el montaje final realizado y las medidas de caracterización desarrolladas en la cámara anecoica de la Universidad de los Andes.

- **Radioenlace, parte 2: Perfil del radioenlace:**

En esta etapa se terminan de realizar los cálculos requeridos para el radioenlace. Inicialmente se determina el equipo de radio sugerido para la proyección, seleccionando el equipo NanoStation loco M5 MCS5, con 20dBm de potencia de transmisión y una sensibilidad de recepción de -83dBm, su distancia de funcionamiento es de hasta 7km y su bajo costo (en comparación a los otros equipos), fueron el factor fundamental al momento de su elección. Se realizaron los cálculos para el perfil del radioenlace, con las medidas de la tabla 2 y la frecuencia de resonancia. Se calculó la pérdida en el espacio libre y se mostró su atenuación a diferentes distancias (véase tabla 25), la pérdida es aproximadamente 118 dB.

Para la zona de Fresnel, se realizaron los cálculos expuestos en el marco teórico, en este punto se presentaron dos soluciones al problema de la línea de vista que presenta el proyecto, elevar las antenas a una altura adecuada para una línea de vista o usar una repetidora y ubicarla en los cerros orientales de Bogotá. Como el fin del trabajo de grado es el diseño de antenas y el enlace es netamente simulado, se optó por la decisión de elevar las antenas a una altura adecuada. Esta altura es de 37m sobre el suelo, considerando la altura de los edificios, las estructuras para las antenas se reducen.

Se continúan con los cálculos de atenuación específica y estadística debido a la lluvia, determinando las medidas para Colombia según las recomendaciones de la UIT. Se finaliza con el cálculo del Link Budget (las pérdidas se aproximaron a 140dB) y dando unos puntos para la confiabilidad del sistema.

- **Simulación del radioenlace:**

En este punto con los parámetros obtenidos, resumidos en la tabla 28 se realizó la simulación del radioenlace en el software Radio Mobile (no se pudo efectuar la simulación en el sistema de simulación en línea de la ANE, al cual, a pesar de tener acceso, no cuenta con la frecuencia de resonancia para este trabajo de grado, sin poder visualizar las posibles frecuencias interferidas e interferentes.

Según Radio Mobile, el enlace es viable; este se terminó de confirmar con una herramienta encontrada en la página del fabricante de los equipos de radio (Ubiquiti), que hasta arroja que el sistema servirá en su capacidad total.

3. Descripción económica del proyecto:

Este trabajo de grado, presenta el diseño simulación y construcción de una antena Yagi-Uda para el estudio de un radioenlace en la banda libre de 5.8 GHz entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes. Para este estudio se implementaron varios softwares: Ansys HFSS 18®, Matlab 16, Radio Mobile®1.9.2.0 y el sistema de simulación en línea de la ANE.

La dimensión de los elementos de la antena Yagi-Uda, fue seleccionada por su fácil adquisición ya que es una medida comercial (1/8”), lo que hace que su costo sea muy bajo. El material de fabricación de la antena es de aluminio (boom, directores, elemento radiante y plato parabólico), con una base de acero; la conexión se realiza con un cable coaxial RG-58C/U a un adaptador hembra SMA.

3.1. Materiales

La antena en su mayoría se encuentra fabricada en aluminio, en donde el boom central es un tubo de 8.5mm de diámetro, con un centro hueco de 6.1mm; los elementos directores y el dipolo doblado son varillas de 3.2mm de grosor. La estructura base está fabricada en acero (ver figura 115).

Figura 115. Materiales de fabricación de la antena.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Costos

Tabla 29. Lista de precios del proyecto en COP.

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Software HFSS	1	\$ 0 (Otorgado por Universidad de los Andes)	\$ 0
SMA hembra	4	\$ 2500	\$ 10000
Varillas de aluminio (40 centímetros)	10	\$ 600	\$ 6000
Tubo de aluminio (1 metro)	6	\$ 1000	\$ 6000
Platos de aluminio	2	\$ 57000	\$ 114000
Estructura base	2	\$ 50000	\$100000
Cable coaxial (2 metros)	2	\$ 2500	\$ 5000
Cable Pigtail (1 metro)	2	\$24000	\$48000
Mano de obra	1	\$60000	\$60000
Costo total			\$349000

Fuente: Elaboración propia.

Lo que deja el costo neto por antena en \$174.500 pesos. En la mano de obra se incluye el corte de materiales, perforaciones y doblado de los platos parabólicos.

4. Recomendaciones y trabajos futuros

La antena Yagi-Uda cuenta con una gran cantidad de variables para su diseño, como se pudo observar a lo largo del desarrollo de este trabajo. Realizar nuevas simulaciones y caracterizaciones modificando otras variables, como lo es el espaciado entre elementos, podría generar cambios importantes en las principales características de desempeño de la antena. Como se observa en la figura 44 el espaciado es importante al momento de determinar el ancho de banda y afecta directamente la ganancia de la antena, por lo que sería recomendable realizar optimizaciones modificando este parámetro.

Al momento de realizar simulaciones de antenas en el software Ansys HFSS®, es recomendable manejar las medidas en variables y no modificarlas directamente en los elementos creados, estas se dejan manipular con más facilidad y son necesarias para llevar a cabo mediciones paramétricas u optimizaciones. Se recomienda revisar pinturas para antenas, que esto afectaría su buen funcionamiento, o podría llegar incluso a mejorarlo.

La guía de uso de Ansys HFSS® recomienda manejar las cajas de radiación a una separación límite de los elementos a $\lambda/4$ de distancia, con respecto a esta. Esta caja al momento de realizar simulaciones determina la exactitud para las medidas y su tamaño es de gran importancia, es recomendable que su tamaño sea de al menos 5λ y aumentar su tamaño, en caso de no tener convergencia en los resultados, se debe incrementar hasta lograr resultados similares, teniendo especial cuidado con los parámetros como ganancia y directividad.

El aumento del tamaño de la caja de radiación, incrementa considerablemente los tiempos de simulación, por lo que es recomendable contar con un buen equipo de cómputo y una buena disponibilidad de tiempo para estas simulaciones. Para reducir los tiempos de simulación, se recomienda aumentar el número de pasos a mínimo 50, al momento de configurar el “Setup” de la solución.

Al momento de fabricar las antenas, se recomiendan usar cables y conectores de buena calidad, el puerto SMA resulta ser un gran factor al momento de realizar las medidas y este puede llegar a malograr el funcionamiento en general del sistema.

En el caso de diseño para radioenlaces punto a punto, es importante tener bien definida la distancia entre los puntos de acceso, y realizar la elección de la frecuencia basada en esta. Entre más extensa sea la distancia, más grande debe ser la longitud de onda, o sea disminuir la frecuencia seleccionada.

La recomendación es que para enlaces de 100km o superiores se use una frecuencia menor a 3GHz; para enlaces de hasta 50km una frecuencia de entre 3 y 11 GHz es recomendable; una distancia de no más de 30km es apta para frecuencias de 13 a 18GHz; para frecuencias superiores a 23GHz no existe una escala lineal de pérdidas, por lo que su uso es recomendable para distancias de unos pocos kilómetros o interiores. Es importante tener en cuenta la zona de trabajo, si es zona urbana tendrá más posibles interferencias e interferente lo que afectará el desempeño del enlace.

Las recomendaciones sobre el uso de frecuencia, son basadas en las lecturas realizadas para el desarrollo de este trabajo, el espectro como un recurso escaso requiere de un buen uso. Actualmente existe una gran variedad de equipos de radio que se ajustan a las anteriores sugerencias, por lo que debe revisarse las hojas técnicas de estos equipos, y las distancias de funcionamiento que estas manejan.

También se recomienda realizar una revisión exhaustiva de los factores externos que afectan a una antena en la intemperie, los factores climáticos en donde se implemente la antena. Existen estudios que muestran las afectaciones incidentes del viento y la carga de hielo sobre las antenas, una mayor exposición al sol puede afectar el funcionamiento de algún módulo del radioenlace.

Es importante asesorarse con alguien que tenga conocimiento sobre estructuras y cargas en estas, al momento de ubicar la antena. Tener en cuenta los permisos que estas requieren para su puesta en marcha y de ser necesario un detallado estudio de obras civiles. Se resalta que es posible y viable realizar antenas Yagi-Uda físicas en frecuencias de SHF, aún existen muchos parámetros para optimizar, realizando cambios en las variables de diseño expuestas en este trabajo, es posible obtener mejores resultados.

Para finalizar se recomienda el uso del software ANSYS HFSS 18 ® para el desarrollo y simulación de antenas, debido a todas las ventajas que este ofrece.

Conclusiones

En este trabajo de grado se muestra el proceso realizado para el diseño, simulación y construcción de antenas físicas Yagi-Uda a una frecuencia de 5.8GHz, esto con el fin de realizar la proyección de un enlace punto a punto entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes. Se utilizaron materiales con medidas de fácil adquisición y bajo costo (1/8 pulgada de diámetro).

La proyección del radioenlace, bajo los resultados del diseño de la antena desarrollada en este documento, es viable. La frecuencia seleccionada de 5.8 GHz es adecuada para la distancia de los puntos de acceso, considerando que se encuentra en una zona urbana; el equipo de radio NanoStation loco M5 MCS5 es adecuado para las características de este enlace, debido a su funcionamiento en cortas distancias, a pesar de lo indicado por los estándares de esta frecuencia.

La mayor dificultad a momento de llegar a implementar este radioenlace, radica en el problema de la línea de vista, que requiere una altura para las antenas de aproximadamente 37 metros sobre el suelo (según Radio Mobile). Considerando la altura de los edificios en los cuales se ubicarían las antenas, estos requerirían una estructura adicional para su puesta en marcha, lo que conllevaría realizar estudios estructurales y todo el proceso legal que conlleva modificar un edificio, sin olvidar los costos que esto implica.

En cuanto al diseño de la antena se presentó un conjunto de resultados, a partir de una formulación basada en el proceso de diseño óptimo de antenas Yagi-Uda de Viezbicke, en donde se realizó un ajuste polinómico a sus curvas de diseño, para obtener medidas aproximadas para los directores y el reflector. A pesar de que los estudios realizados son de hace 42 años, son considerablemente acertados, de acuerdo a la simulación planteada. Las nuevas curvas plasmadas en este documento, son una ampliación inexacta para la optimización de antenas Yagi-Uda, pero dan un acercamiento a las medidas ideales para obtener una buena ganancia en este tipo de antenas.

Las optimizaciones realizadas en el desarrollo de este trabajo de grado, además de asegurar un excelente funcionamiento de las antenas, generan un ambiente de desarrollo para la producción de antenas, para un entorno de pruebas que no son implementadas.

Existieron diversos problemas con la fabricación del Balun de acoplamiento y su ubicación en la antena final, debido a su tamaño. Esto afectó en gran medida la estética de la antena, aun así, su funcionamiento es cercano a los resultados obtenidos en la simulación.

Se cumplieron a cabalidad los objetivos del trabajo de grado, logrando diseñar una antena altamente directiva y con buena ganancia para la proyección del radioenlace entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes, se analizaron los requerimientos y dificultades presentes en los radioenlaces en frecuencia de microondas y se llevó a cabo el desarrollo de la plataforma de experimentación simulada, que permite comprobar las teorías científicas y desarrollar nuevas técnicas.

Bibliografía

ANE. Sistema de simulación en línea [en línea]. Bogotá: Agencia Nacional del Espectro [citado 2 de Febrero, 2018]. Disponible en internet: <<https://simulacion.ane.gov.co/se/portal/ane/login.php>>

ANSOFT Corporation, High Frequency Structure Simulator User's Guide, 2005, p. 801.

AVILA, Alba. Centro de Microelectrónica Centro de Microelectrónica Universidad de los Andes Universidad de los Andes CMUA. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. 2009, p. 50.

BALANIS, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edición. New Jersey: Wiley – Interscience, 2005, p. 1073.

BUETTRICH, Sebastian. Calculi de radioenlace [en línea]. Tshwane: Alberto Pascual [citado 1 mayo de 2018]. Disponible en internet <http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v02.pdf >

CARDAMA, Ángel y JOFRE, Luis. Antenas. 2da Edición. Barcelona: Ediciones UPC, 2002, p. 460.

CARR, Joseph, Antenna toolkit. 2da Edición. Oxford: Plant a tree, 2001, p. 253.

CASTILLO, Juan. Diseño de una red inalámbrica de banda ancha para un entorno rural. Málaga: Universidad de Málaga. Departamento de electrónica. Tesis, 2008, p. 151.

CHENG, David y CHEN, C. A. Optimum element lengths for Yagi-Uda arrays. En: IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Enero, 1975. Vol. AP-23, no. 1, p. 8-15.

_____. Optimum element spacings for Yagi-Uda arrays. En: IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Septiembre, 1973. Vol. AP-21, no. 5, p. 615-623.

COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Resolución 711. (11, Octubre, 2016). Por la cual se establecen las bandas de frecuencia de libre utilización dentro del territorio nacional y se derogan algunas disposiciones. Bogotá: La Agencia, 2016, p. 41.

_____. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1341. (30, Julio, 2009). Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones –TIC–, se crea la Agencia Nacional del Espectro y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El Congreso, 2009, p. 34.

_____. MINISTERIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencia (27, Julio, 2017). Por la cual se actualiza el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias – CNABF. Bogotá: Agencia Nacional del Espectro, 2017, p. 389.
CONIITI. Workshop, herramientas WEB para ingeniería de espectro [en línea]. Bogotá: Coniiti, 2017 [citado 2 de Febrero, 2018]. Disponible en internet: <<http://coniiti.com/iiiconiiti2017/>>

CRIOLLO, Edgar. Antena Horn para operación en banda ancha. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 88.
DECONCEPTOS, Refracción [en línea]. Concepto de refracción [citado 15 de Marzo de 2018]. Disponible en internet: <<https://deconceptos.com/ciencias-naturales/refraccion>>

ERC RECOMMENDATION. Recommendation adopted by the frequency management, regulatory affairs and spectrum engineering working groups. European Radiocommunications Committee. 22 de Agosto de 2011. Disponible en: <https://www.cept.org/Documents/srd/mg/933/Info_6_ERC_REC_70-03_August_2011>

GARCIA, Armando. Calculo de antenas. 4ta Edición. México D.F: Marcombo, 2012, p. 236.

GONZALEZ, Francisco. Estudio de cobertura en redes inalámbricas y caracterización de materiales que atenúan las microondas. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 85.

HUANG, Yi y BOYLE, Kevin. Antennas from Theory to Practice. 1ra Edición. Wuhan: Wiley IEEE Press, 2008, p. 378.

KIZER, George. Digital microwave communication, engineering point-to-point microwave systems. 1ra Edición. New Jersey: IEEE Press Wiley, 2013, p. 753.

LOZANO, Antonio. Sistemas de propagación y diseño de antenas enfocado al análisis de enlaces de comunicación. San Nicolas de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecanica y Eléctrica. Tesis, 2001, p. 245.

MANNING, Trevor. Microwave Radio Transmission Design Guide. 2da Edición. Boston: Artech House, 2009, p. 297.

MARIN, Robert y PEÑUELA, Edixon. Diseño de una infraestructura tecnológica para proveer internet por vía microondas a la fundación de vivienda La Aldea en Villavicencio (Meta). Bogotá: Universidad Santo Tomas. Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica. Tesis, 2016, p. 39.

MILLIGAN, Thomas. Modern antenna design. 2da Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, p. 633.

MUÑOZ, Luis. Analisis de implementación de un enlace punto a punto acotado por el protocolo 802.11b. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ingeniería, Tesis, 2005, p. 157.

ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS. Comisión interamericana de telecomunicaciones [en línea]. Barranquilla: Comité Consultivo de Radiocomunicaciones [citado 15 de febrero de 2018]. Disponible en internet: <<https://tesamerica.com/mediciones-patron-radiacion/>>

PELAEZ, Antonio y SERRANO, Omar. Diseñar e implementar un sistema de comunicación de una red LAN a otra LAN mediante microondas. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Electrónica. Tesis, 2013, p. 91.

POZAR, David. Microwave engineering. 3ra Edición. New York: John Wiley & Sons, 2009, p. 736.

RAMIREZ, German. Diseño de una antena multibanda basada en fractales para redes móviles inalámbricas de banda ancha en las frecuencias de 0.9, 2.4 y 3.5 GHz. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2009, p. 115.

RAMIREZ, Jaime. Antenas. Conceptos básicos simplificados de funcionamiento y diseño. 1ra Edición. Bogotá: Editorial Bonaventuriana, 2010, p. 421.

RESTREPO, Jairo. Compendio de telecomunicaciones, conceptos básicos para el aprendizaje de los sistemas de telecomunicación. Op. Cit., p. 200.

_____. Ingeniería de telecomunicaciones, conceptos básicos. 1ra Edición. Medellín: Universidad de Medellín, 2014, p. 320.

RIVERA, Rocío y GOMEZ, Yenni. Diseño, simulación y construcción de una antena para la propagación de señales a una banda de 2.4GHz. Soacha: Corporación

Universitaria Minuto de Dios. Programa de tecnología en informática. Tesis, 2009, p.208.

RODRÍGUEZ, Juan. Antena helicoidal cuadrifilar de banda ancha para instrumentación. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2013, p. 52.

ROHDE & SCHWARZ, [en línea], R&S ZVH Cable and Antenna Analyzer [citado 15 de mayo de 2018]. Disponible en internet: <https://www.rohde-schwarz.com/lat/inicio_48230.html?rusprivacypolicy=1>

SADIKU, Matthew. Elementos de electromagnetismo. 3ra Edición. México D.F: Oxford University Press, 2003, p. 767.

TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ta Edición. Phoenix: Pearson Educación, 2003, p. 976.

UDA, Shintaro. Wireless Beam of Short Electric Waves. En: UDA, Institute of Electrical Engineers of Japan. Octubre, 1926. 1128, p. 1209-1219.

UIT-R P.525-3 – Cálculo de la atenuación en el espacio libre, 2016, p. 6. Disponible en < https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-I!!PDF-S.pdf>

UIT-R P.837-1 – Características De La Precipitación Para Establecer Modelos De Propagación, 1992, p. 2 Disponible en <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-S.pdf>

UIT-R P.838-3 – Modelo de La Atenuación Específica Debida a La Lluvia Para Los Métodos de Predicción, 1992, p. 5 Disponible en <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-S.pdf>

UNION INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). Reglamento de radiocomunicaciones. Edición de 2016. Ginebra: International Telecommunication Union, 2016, p. 442.

UNITED STATES. ELECTRONIC: CODE OF FEDERAL REGULATIONS. CFR 47 (10, May, 2018). National telecommunications and information administration, department of commerce. Part. 101. Disponible en: < <https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/technologies-systems-and-innovation-division/rules-regulations-title-47>>

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Proyecto Uniandino Aeroespacial [en línea]. Bogotá: Fabio Rojas [citado 2 de Febrero, 2018]. Disponible en internet: <<https://pua.uniandes.edu.co/doku.php?id=principal>>

UPARELA, Clara. Retos en la infraestructura de telecomunicaciones en Colombia para la implementación de las redes electricas inteligentes. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2014, p. 23.

VALENCIA, Diana. Implementación de tecnologías de la información y las comunicaciones (tic) en Colombia. En: Revista de derecho, comunicaciones y nueva tecnología. 22 de octubre de 2015. Vol. 14, no. 13, p. 78 - 99.

VARGAS, Duver y ZAMORA, José. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2017, p. 97.

VÁSQUEZ, Carlos. Análisis, diseño, simulación y presupuesto de un radioenlace entre Dosquebradas y las escuelas El Rincón, la colonia y las delicias. Pereira: Universidad Católica de Pereira. Facultad de Ingeniería. Tesis, 2014, p. 170.

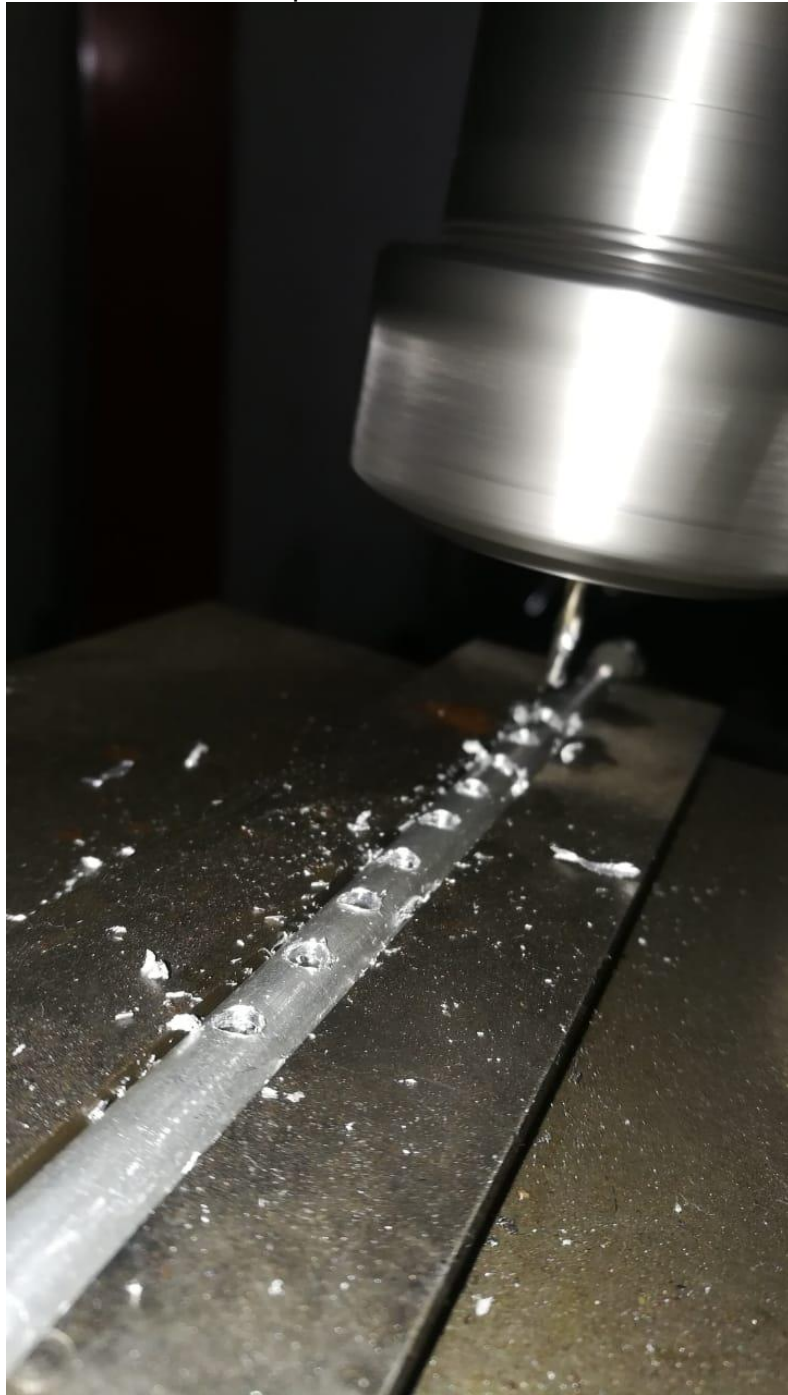
VIEZBICKE, Peter. Yagi Antenna Design. NBS technical note 688. Boulder, Colorado: Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1976, p. 30.

WUHU, Henry. Diseño e implementación de una aplicación de automatización de registros para el diseño de enlaces de microondas en sistemas de radio. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingeniería Electrónica. Tesis, 2007, p. 121.

YU, XueQing. Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip MAX2838. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Telecomunicaciones. Tesis, 2014, p. 75.

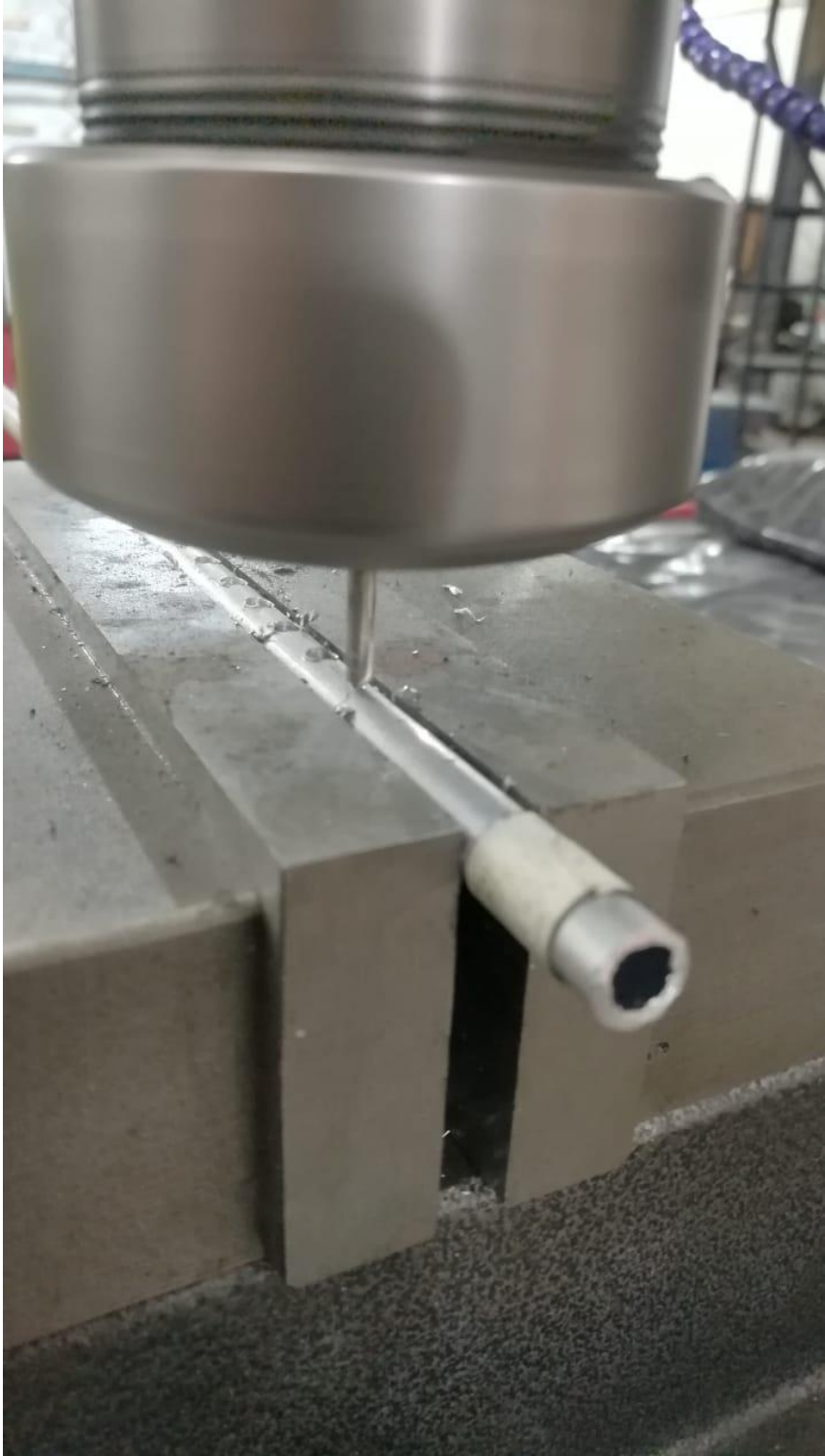
ANEXOS

Anexo A. Proceso de fabricación, perforación de booms.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Boom en fresadora.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo C. Directores cortados para pruebas.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo D. Medidas de corte para directores.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo E. Prueba realizada para dipolo con perforación.



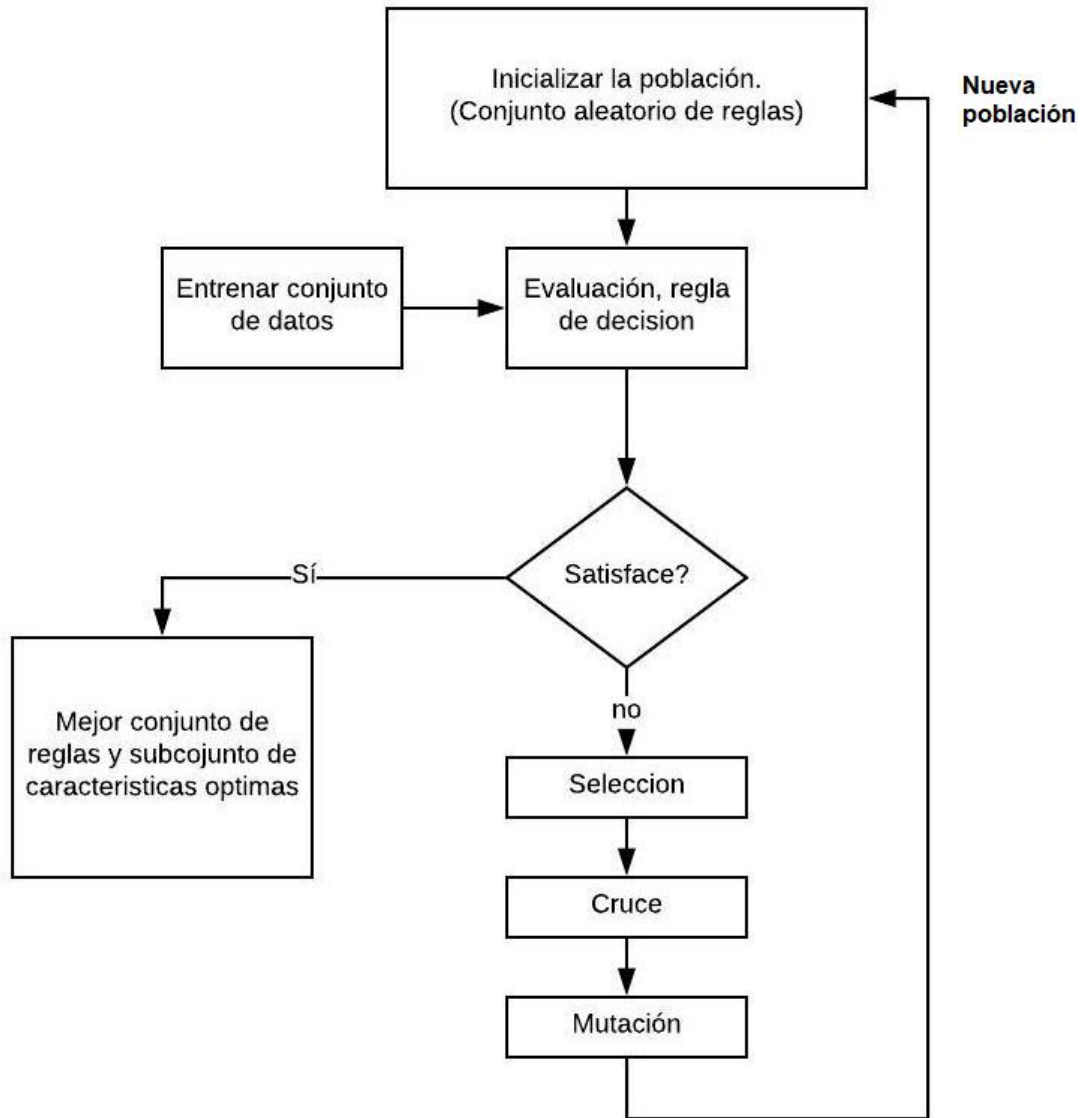
Fuente: Elaboración propia.

Anexo F. Ajustes mecánicos para el dipolo en antena Final.



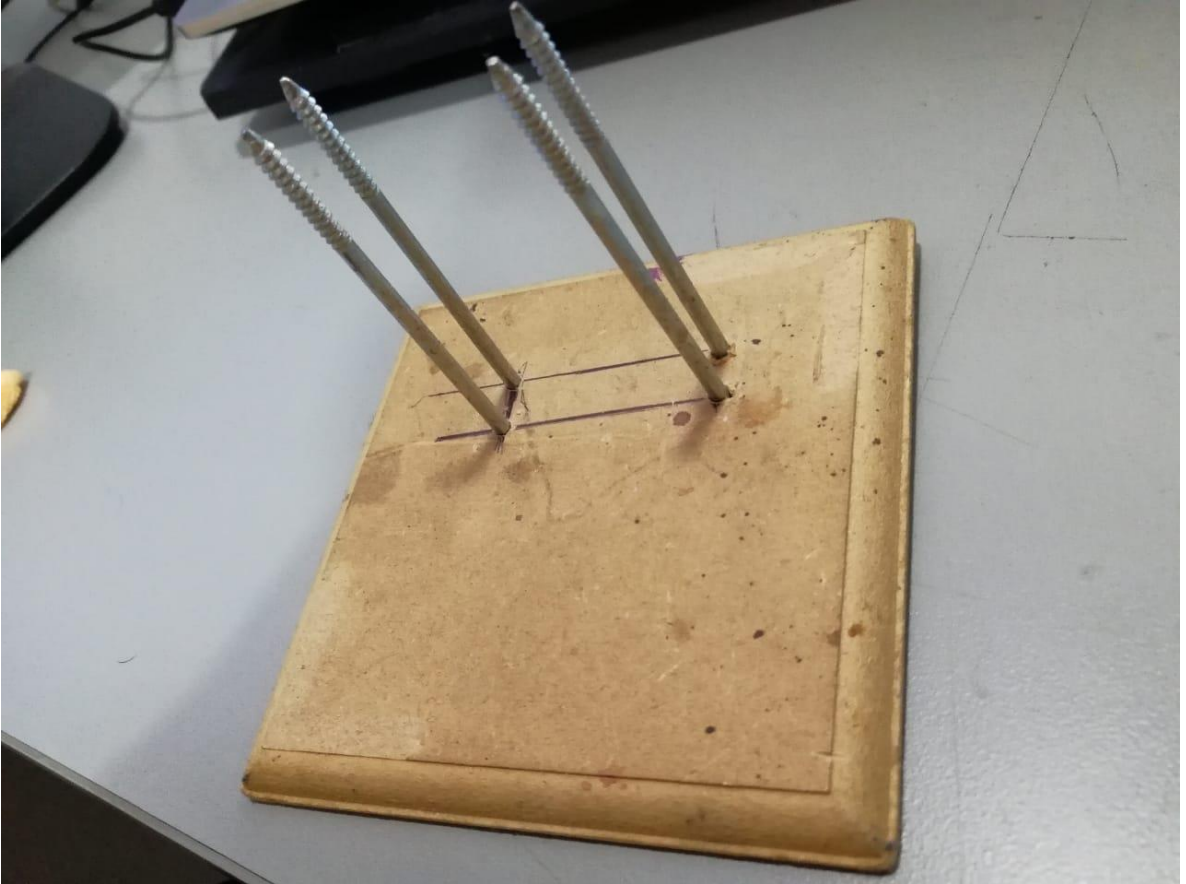
Fuente: Elaboración propia.

Anexo G. Diagrama de algoritmo genético.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo H. Método utilizado para fabricar dipolos.



Fuente: Elaboración propia.