

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP DE RANGO DE OPERACIÓN DE SUPER ALTAS FRECUENCIA (3.5 GHz a 6 GHz) PARA LA EVALUACIÓN DE LA TASA DE ABSORCIÓN ESPECIFICA EN TEJIDOS HUMANOS.

BRAYAN ESTEVENS RODRIGUEZ BARRERA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2019

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP DE RANGO DE OPERACIÓN DE SUPER ALTAS FRECUENCIA (3.5 GHz a 6 GHz) PARA LA EVALUACION DE LA TASA DE ABSORCION ESPECIFICA EN TEJIDOS HUMANOS.

BRAYAN ESTEVENS RODRIGUEZ BARRERA

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones

Director
M.s.C Camilo Eduardo Téllez Villamizar

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2019



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 D.C., 20 de noviembre 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más gratos agradecimientos a todo mi núcleo familiar padres, hermanos y pareja quienes estuvieron presentes en mi camino hacia el título de Ingeniero, quienes me apoyaron y fueron fundamentales en la realización del proyecto de grado.

En segunda instancia, pero no menos importante al ingeniero Camilo Eduardo Téllez Villamizar quien actuó en el papel de director de trabajo de grado, por su paciencia, esmero y dedicación.

A la Universidad Sergio Arboleda que me permitió realizar en sus instalaciones las prácticas de laboratorio con el objetivo de generar el diseño y simulaciones respectivas de las antenas propuestas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1.GENERALIDADES	14
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.3 OBJETIVOS.....	26
Objetivo general.....	26
Objetivos específicos.....	26
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	27
1.5 ALCANCES	28
1.6 LIMITACIÓN	28
2. MARCO REFERENCIAL	29
2.1 Marco Teórico - (INTERNET DE LAS COSAS (IoT))	29
2.2 REDES DE AREA CORPORAL (BAN)	30
2.3 TEORÍA DE ANTENAS.....	31
2.3.1 Características de las antenas.....	34
2.3.1.1 Patrón de radiación.....	34
2.3.1.2 Diagrama de radiación.....	34
2.3.1.3 Impedancia de entrada.....	34
2.3.1.4 Directividad.....	34
2.3.1.5 Eficiencia de radiación.....	35
2.3.1.6 Ganancia.....	35
2.3.1.7 Intensidad de radiación.....	36
2.3.1.8 Polarización.....	36
2.3.1.9 Ancho de banda.....	36
2.3.2.1 Área efectiva.....	36
2.4 TIPOS DE ANTENAS	37
2.5.1 Métodos de alimentación.....	41
2.5.2 Conductores y sustratos de fabricación antenas Microstrip.....	43
2.6 CIRCUITOS RLC.....	44
2.6.1 Componentes pasivos.....	45
2.7 MÉTODOS DE SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO.....	46
2.7.1 Método de momentos.....	47
2.7.2 ANSYS HFSS.....	47
2.7.4 ADS.....	48

3. METODOLOGÍA	55
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	56
4.1 DISEÑO ANTENA MICROSTRIP	56
4.2 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOMÉTRICA	57
4.3 SELECCIÓN Y CALCULO PARÁMETROS DE DISEÑO	62
4.3.1 Cálculos diseño antena Microstrip Rectangular..	64
4.4. SELECCIÓN Y SIMULACIÓN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE LA ANTENA MICROSTRIP	67
4.4.1 Diseño antena Microstrip circular	79
4.4.2 Resultados simulación de las dos geometrías de antenas Microstrip.....	84
4.4.2.1 Resultados Antena rectangular..	84
4.4.2.2 Resultados Antena rectangular 3.5 GHz sustrato FR4.....	84
4.4.3.3 Resultados Antena circular 6 GHz sustrato FR4	91
4.5. ANÁLISIS TASA DE ABSORCIÓN ESPECIFICA EN TEJIDOS HUMANOS TALES COMO EPIDERMIS Y DERMIS.....	98
4.5.1 Medidas S.A.R. antenas Microstrip rectangular	100
4.5.2 Medidas S.A.R. antena Microstrip circular	104
CONCLUSIONES	108
RECOMENDACIONES FUTURAS	110
BIBLIOGRAFÍA.....	111

LISTA DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1. VOSviewer. Science Direct palabras clave VS periodo de tiempo. ...	15
Ilustración 2. VOSviewer. PROquest palabras clave VS periodo de tiempo.	16
Ilustración 3. VOSviewer. PROquest Autores VS periodo de tiempo.....	17
Ilustración 4. Geometrías generadas para Bobina en ANSYS HFSS.	19
Ilustración 5. Antena Microstrip Triangular.....	20
Ilustración 6. Comparación visual antenas construidas.	21
Ilustración 7. Kit de sensores CSRR.....	22
Ilustración 8. Distribución de S.A.R diseño 1.	23
Ilustración 9. Distribución de S.A.R diseño 2.	24
Ilustración 10. Distribución de S.A.R diseño 2.	24
Ilustración 11. Aplicaciones red B.A.N.	31
Ilustración 12. Antenas lineales	37
Ilustración 13. Antenas de apertura	38
Ilustración 14. Ilustración de antena Microstrip	38
Ilustración 15. Antena Microstrip.....	39
Ilustración 16. Antena Microstrip geometría circular.	40
Ilustración 17. (a) Alimentación de un arreglo de antena Microstrip en serie, (b). Alimentación de un arreglo de antena Microstrip en arreglo.	41
Ilustración 18. (a) Circuito RLC en serie. (b) Circuito RLC en paralelo.	44
Ilustración 19. Tejido epitelial dermis y epidermis.....	52
Ilustración 20. Atribución banda 600MHz en Colombia	54
Ilustración 21. Atribución banda 600MHz en Colombia	54
Ilustración 22. Diseño metodológico	55
Ilustración 23. Nube de palabras clave	57
Ilustración 24. Matriz de palabras claves versus autores.....	59
Ilustración 25. Ilustración. Diagrama de barras Keywords	60
Ilustración 26. Matriz por palabras claves por países de publicación.	61
Ilustración 27. Métodos de análisis software de simulación electromagnética	68
Ilustración 28. Simulación antena Microstrip rectangular.....	68
Ilustración 29. Creaciones variables del diseño.....	69
Ilustración 30. Variables asignadas a los parámetros de diseño.	69
Ilustración 31. Diseño antena Microstrip Rectangular.....	70
Ilustración 32. Creación del sustrato.....	70
Ilustración 33. Ubicación sustrato.	71
Ilustración 34. Selección sustrato FR4.....	71
Ilustración 35. Creación plano de tierra.	72
Ilustración 36. Parametrización material conductor	73
Ilustración 37. Selección material Oro.	73
Ilustración 38. Creación de plano infinito	74
Ilustración 39. Creación parche Rectangular	74
Ilustración 40. Creación adaptador Lambda cuartos.....	75
Ilustración 41. Creación línea de transmisión.	75
Ilustración 42. Creación puerto alimentación.	76

Ilustración 43. Características puerto alimentación.....	76
Ilustración 44. Características puerto alimentación.....	77
Ilustración 45. Características puerto alimentación.....	77
Ilustración 46. Suma Booleana antena Microstrip rectangular.....	78
Ilustración 47. Aspecto final antena Rectangular.....	78
Ilustración 48. Diseño antena Microstrip circular.....	79
Ilustración 49. Creación sustrato FR4.....	80
Ilustración 50. Ubicación sustrato.....	80
Ilustración 51. Selección sustrato FR4.....	81
Ilustración 52. Creación plano de tierra.....	81
Ilustración 53. Creación parche Circular.....	82
Ilustración 54. Variables antena Microstrip Circular.....	83
Ilustración 55. antena Microstrip Circular.....	83
Ilustración 56. antena Microstrip rectangular acople impedancia.....	85
Ilustración 57. Parámetro S_{11}	86
Ilustración 58. Patrón de radiación antena Microstrip rectangular.....	87
Ilustración 59. Directividad antena Microstrip Rectangular.....	88
Ilustración 60. Simulación campo E antena Microstrip.....	89
Ilustración 61. Simulación campo H antena Microstrip.....	90
Ilustración 62. Parámetro S_{11} antena Microstrip circular sustrato FR4.....	91
Ilustración 63. Patrón de radiación antena Circular.....	92
Ilustración 64. Directividad antena Rectangular.....	93
Ilustración 65. impedancia característica antena circular.....	94
Ilustración 66. Simulación campo E antena Microstrip Circular.....	95
Ilustración 67. Simulación campo H antena Microstrip circular.....	96
Ilustración 68. Propiedades dieléctricas piel.....	98
Ilustración 69. Dermis y epidermis vista 1.....	99
Ilustración 70. Dermis y epidermis vista 2.....	99
Ilustración 71. Patrón de radiación antena Microstrip Rectangular.....	100
Ilustración 72. Antena Microstrip S.A.R. generado en capas de la piel.....	102
Ilustración 73. Antena rectangular medición S.A.R. sobre capas de la piel.....	103
Ilustración 74. Patrón de radiación Antena circular.....	104
Ilustración 75. Antena Microstrip Circular S.A.R. generado en capas de la piel ..	106
Ilustración 76. Antena rectangular medición S.A.R. sobre capas de la piel	107

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Valores y parámetros de la bobina externa e interna.....	18
Cuadro 2. Resultados simulación geometría antena Microstrip Triangular.....	20
Cuadro 3. Resultados sensor cuadrado.....	22
Cuadro 4. Clasificación de redes.....	30
Cuadro 5. Nombre y rango de frecuencias.....	33
Cuadro 6. Materiales Conductores.....	43
Cuadro 7. Características sustratos de Fabricacion.....	43
Cuadro 8. Ecuaciones relevantes de los circuitos RLC sin fuente.....	45
Cuadro 9. Requisitos mínimos de ANSYS y FEKO.....	49
Cuadro 10. Límites básicos de la ICNIRP.....	50
Cuadro 11. Lista de factores de rendimiento de antenas para diseñadores.....	63
Cuadro 12. Características antena Microstrip.....	63
Cuadro 13. Variables calculadas antenas Microstrip.....	67
Cuadro 14. Valores finales.....	97
Cuadro 15. Características diseño piel.....	99
Cuadro 16. Antena Rectangular S.A.R Epidermis y dermis.....	101
Cuadro 17. Antena Circular S.A.R Epidermis y dermis.....	105

GLOSARIO

Agencia Nacional del Espectro ANE: Es el organismo colombiano dedicado a la verificación y asignación del espectro a los diferentes operadores que lo utilizan para las diferentes actividades económicas.

ANSYS HFSS: Software especializado en simulación electromagnético.

Antena Microstrip: parches metálicos impresos sobre un sustrato dieléctrico situado sobre de un plano metálico, pueden ser fabricados bajo procesos como la fotolitografía

Directividad: Relación entre la densidad de potencia radiada por una antena a cierta distancia y una determinada dirección.

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer I.R.A.C: Centro internacional localizado en realizar investigaciones y recomendaciones con problemáticas gliomas o tipos de cáncer en seres humanos.

Union Internacional de Telecomunicaciones UIT: Es el organismo especializado en telecomunicaciones de la Organización de las Naciones Unidas.

Internet de las cosas IOT: Se refiere a la conexión de cosas y gran variedad de dispositivos cotidianos con internet.

La Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante ICNIRP: comisión internacional especializada en protección de radiación no ionizante.

Patrón de radiación: Es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena.

Red de area personal BAN: red de área corporal se refiere a la interconexión de dispositivos sobre o alrededor del cuerpo humano.

Tasa Absorción específica S.A.R: Medida que indica cuanto absorbe un cuerpo humano a determinadas frecuencias de operación de la antena radiador.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de conexión que se creó en el ser humano desde que se desarrolló el internet logro evolucionar la forma en que él mismo se comunicaba a grandes distancias. La llegada del celular al ser humano permitió la explotación y el uso del espectro electromagnético. En la actualidad se han incrementado las conexiones de comunicaciones de personas con internet en donde por lo general utilizan frecuencias altas (como lo dice su acrónimo en inglés “High Frequency”) y muy altas (como lo dice su acrónimo en inglés “Very High Frequency”) pero ahora con el desarrollo de la 5ta generación móvil, no solo se conectan las personas, también se conectan las cosas como electrodomésticos, dispositivos electrónicos y demás con internet, esta conexión se conoce como Internet de las cosas (IoT).

En la actualidad existen diversos tipos de redes como: Red W.A.N, red M.A.N, red L.A.N, red W.P.A.N, red B.A.N, en donde tomando presente esta última (como es su acrónimo en inglés “ Body Area Network“), Leonardo Betancur¹, menciona que estas redes establecen comunicación entre un emisor y receptor dentro, cerca y/o alrededor de un individuo. Las transmisiones y recepciones se realizan sobre o alrededor del cuerpo humano y presenta características tales como: la cobertura de recepción o transmisión (en donde debe estar en rangos de 2 a 3 metros), uso de potencia reducida (los cuales no sean dañinos para el cuerpo humano).

Sin embargo, “en el año 2008 la salida al mercado del primer teléfono celular iPhone incremento la conexión de cosas a internet”², superando las conexiones de personas hacia internet. Según la IRAC (Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cancer), “en un estudio realizado en el año 2011 existía un estimado de 5 billones de teléfonos celulares a nivel mundial, en donde este gran número de teléfonos conectados al espectro electromagnético generaron una gran alerta y preocupación en el riesgo al cual el cuerpo humano podría verse afectado por la exposición de las ondas electromagnéticas emitidas y recibidas por estos dispositivos”³.

Según Balseca Paredes⁴ la nueva generación móvil (5ta) propone trabajar super altas frecuencias, la utilización de frecuencias cada vez más altas obliga a los desarrolladores de tecnología inmersos en las telecomunicaciones, a innovar en

¹ Betancur, Leonardo. Redes de área corporal. Una perspectiva al futuro desde la investigación. En: Revista sistemas y telemática. Vol.; 9. No 16 (Dec-Ene. 2011); p.12.

² Evans, Dave. "Internet de las cosas." Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. {En línea}. {26 de febrero de 2019} disponible en: (https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf)

³ Lin, James C. The Curious Case of the IARC Working Group on Radio Frequency Electromagnetic Fields and Cell Phones [Health Effects]. En: IEEE Microwave Magazine. Vol.; 12. No 6 (2011).; p. 1.

⁴ Balseca Paredes, Lorena Elizabeth. Análisis y evaluación de receptor de alta frecuencia para su utilización en redes integradas de quinta generación (5G). MS thesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019. 4 p.

nuevos diseños y tamaños de antenas, estas deben permitir la transmisión y recepción de información sobre múltiples frecuencias en una única antena. Una antena muy común que se utiliza bajo estas características son las antenas Microstrip, las cuales pueden diseñarse en espacios reducidos, diferentes materiales de fabricación, diferentes formas geométricas que aprovechen más eficiente las características de las antenas tales como: impedancia, polarización, directividad, ancho de banda, ganancia, entre otras. Por otro lado, “el uso de antenas Microstrip cada vez es más frecuente dado que estas son ideales ya que su diseño, simulación (ej. Programas de simulación CAD, programas de simulación de campos electromagnéticos, entre otros), fabricación son muy económicos y estas se pueden adaptar a la superficie en la cual van a realizar su función principal (transmitir y recibir datos)”⁵.

La radiación emitida por las antenas Microstrip sobre los tejidos humanos incluidas en los teléfonos celulares y el uso frecuente de estos dispositivos los cuales usan super altas frecuencias alrededor de las partes del cuerpo humano a futuro influirán en la calidad de la vida de las personas, es por ello que se pretende evidenciar el patrón de radiación generado por esta antena en tejidos humanos como dermis y epidermis. Mediante el siguiente proyecto de grado se propuso el diseño y simulación de una antena Microstrip utilizando softwares especializados de simulación electromagnética tales como (ej. ANSYS HFSS,), en donde por medio de estos se evidencie el patrón de radiación generado tejidos humanos.

⁵ Martín, José Luis Jiménez, José María Rodríguez Martín, and Vicente González Posada. Procedimiento de diseño y realización de antenas de parche en tecnología Microstrip. {En línea}. {15 marzo 2019} disponible en (<http://polired.upm.es/index.php/iac/article/download/1762/1774>).

1.GENERALIDADES

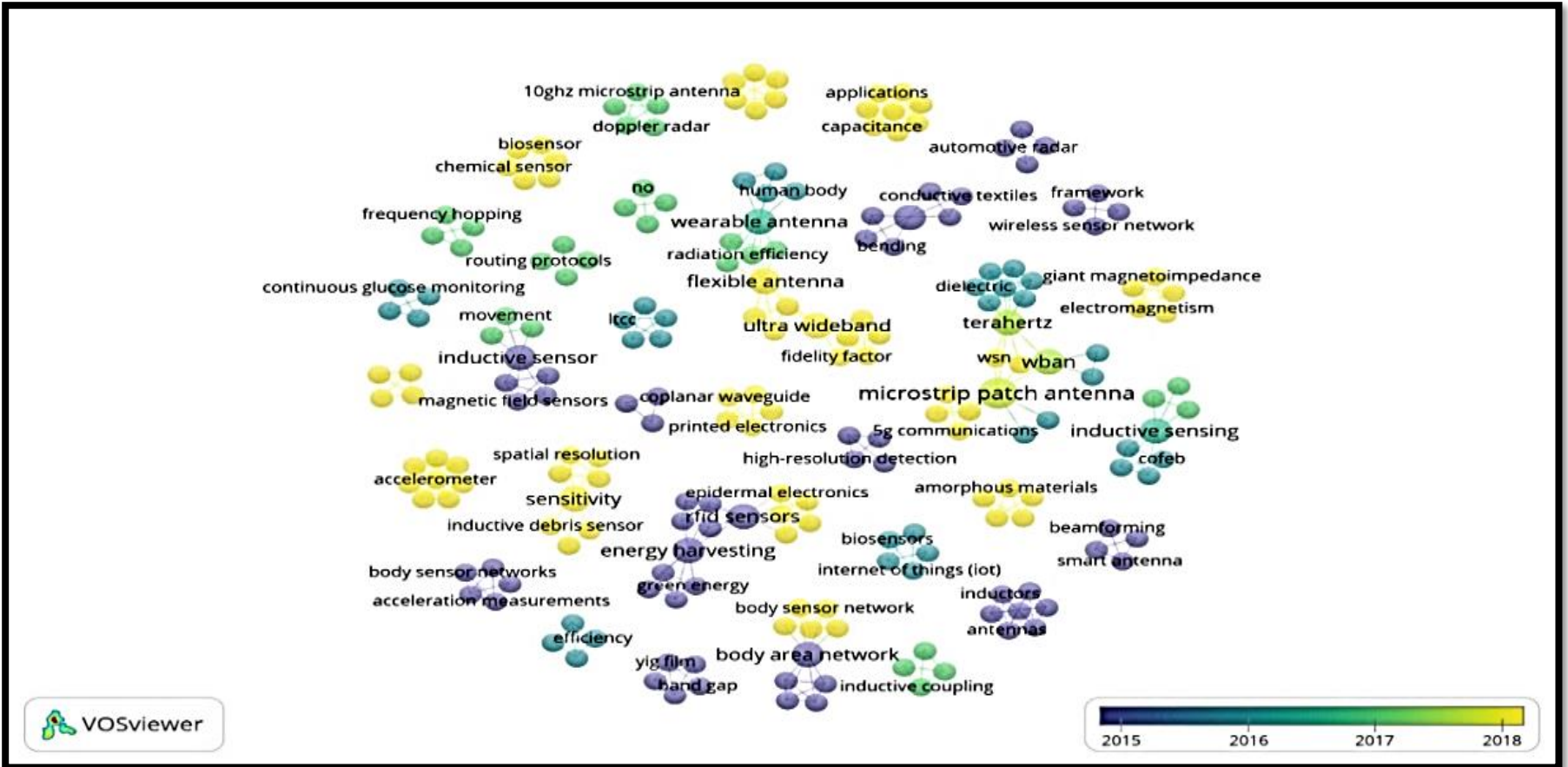
1.1 ANTECEDENTES

Según los análisis realizados en la biblioteca y en las diferentes bases de datos de acceso en la Universidad Católica de Colombia, tales como (EBSCO, ProQuest, Science Direct,) y otras bases de datos (IEEE Xplore, Google Scholar) se realizó un proceso de exploración de información (Vigilancia tecnológica), en donde se formula la siguiente ecuación de búsqueda:

(((((((simulation) OR printing) AND microstrip antenna) OR microstrip patch antenna) AND high frequency) AND application) OR inductive sensor planar)

Con la anterior ecuación de búsqueda de encontraron diferentes tesis de grado con fines similares al proyecto de grado propuesto, los cuales serán descritos en forma cronológica. Según los datos obtenidos en la ecuación de búsqueda original, se realizó la búsqueda exhaustiva en las bases de datos de la Universidad Católica de Colombia y se encontró que en un intervalo de tiempo del 2015 al 2018 en la base de datos Science Direct, las palabras claves en los documentos más citados fueron: *Microstrip patch antena, body sensor network, communication 5G*. Tal como en la Ilustración 1, generada por el software analizador VOSviewer la geometría circular de color amarillo indica las palabras más relevantes en el año 2018 y a su vez la misma geometría de color verde, representa el año 2017.

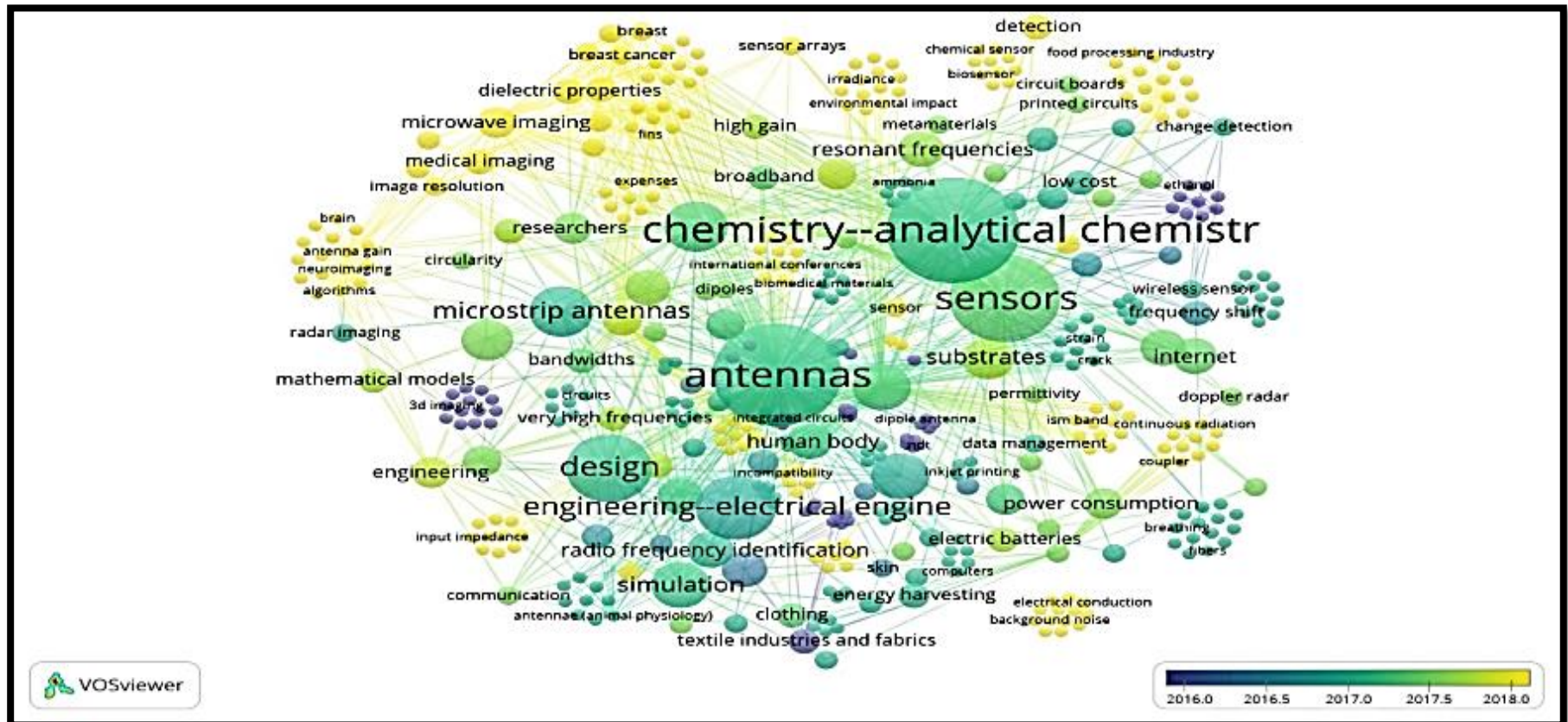
Ilustración 1. VOSviewer. Science Direct palabras clave VS periodo de tiempo.



Fuente. El Autor

Por último, con la misma ecuación de búsqueda se realizó la consulta en la base de datos PROquest en donde se evidencia: palabras claves más citadas en periodo de tiempo de dos años 2016 a 2018, la cuales fueron: antenas, sensors, design, simulación. Véase Ilustración 2.

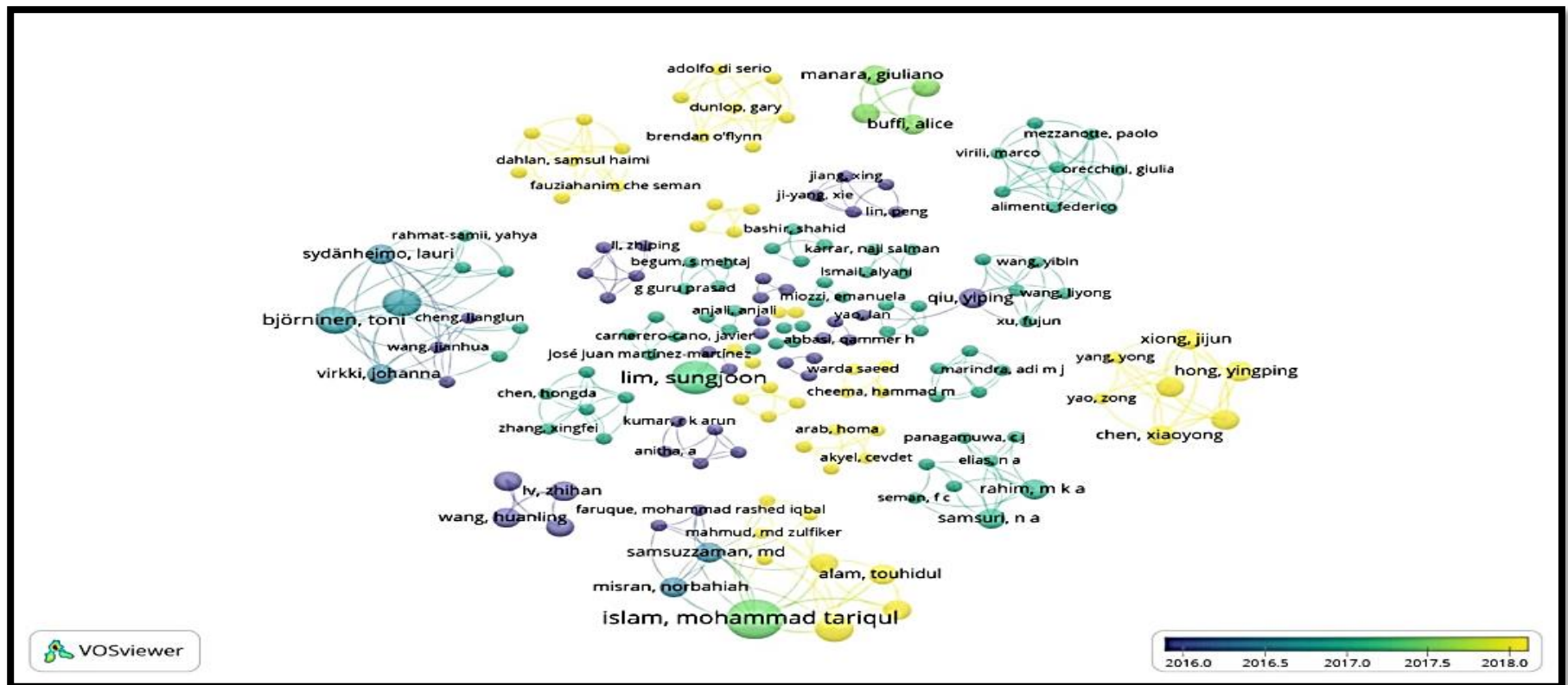
Ilustración 2. VOSviewer. PROquest palabras clave VS periodo de tiempo.



Fuente. El Autor

Como se evidencia en este resultado (Ilustración 3), los autores con mayor número de participaciones fueron: “Islam, Mohammad, Tariqul – Año 2018”, “Lim, Sungjoon – año 2017”, “Bjorninen, Toni – año 2016” son autores que han tenido una participación con otras/varios autores en los tópicos seleccionados en la ecuación de búsqueda. Sus participaciones en mayoría fueron realizadas en publicaciones del año 2017.

Ilustración 3. VOSviewer. PROquest Autores VS periodo de tiempo.



Fuente. El Autor

En conclusión, de este primer análisis, la ecuación de búsqueda que se ejecutó en las diferentes bases de datos logró esclarecer las tendencias e investigadores más citados y relevantes en un rango de 3-5 años respectivamente a nivel mundial, lo cual permitió identificar los documentos y artículos que se correlacionan con el proyecto de grado.

Continuando con el análisis de los antecedentes, se procede a comparar algunos de los artículos más relevantes generados por la ecuación de búsqueda. En el año 2014 en el siguiente artículo "*Analysis and optimization of spiral circular inductive coupling link for bio-implanted applications on air and within human tissue*", investigadores realizaron el análisis y la optimización de un enlace inductivo circular para aplicaciones implantadas en tejidos del cuerpo humano⁶, en donde se expone el proceso de análisis diseño y simulación de una antena Microstrip. También en el documento se muestran las variables tenidas en cuenta en el desarrollo de la investigación (ver cuadro 1), adicional a ello en la ilustración 4, se evidencia el diseño final para la antena Microstrip.

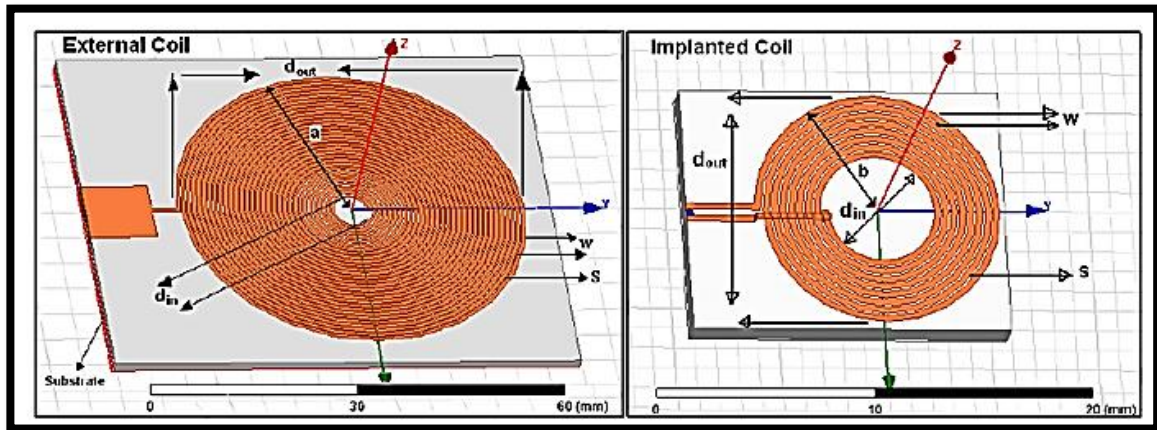
Cuadro 1. Valores y parámetros de la bobina externa e interna.

Quantity	Symbol	External Coil	Internal Coil
Inductance	L	4.92 μ H	1 μ H
Series Resistance	R	2.2 Ω	1.6 Ω
Capacitance	C	33.11 pF	33.11 pF
Quality Factor	Q	190	53
Outer diameter	d _{out}	56 mm	11.6 mm
Inner diameter	d _{in}	10 mm	0.5 mm
Number of turns	N	30	8
Inductor Width	W	0.5 mm	0.3 mm
Turn Spacing	S	0.3 mm	0.1 mm
Fill factor	ϕ	0.69	0.39
PCB substrate	---	60 mm * 70 mm	12 mm * 15 mm
Link operating frequency	f	13.56MHz	
Secondary nominal loading	R _{load}	300 Ω	
Optimum p/Am resistance	R _p	41.89 Ω	
Coupling Coefficients	K	0.087	
Mutual inductance	M	0.95 μ H	
Coil relative distance within tissue	X	6 mm	

Fuente. El Autor

⁶ Mutashar, Saad, et al. "Analysis and optimization of spiral circular inductive coupling link for bio-implanted applications on air and within human tissue." {En línea}. {30 de junio de 2014} disponible en {<https://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/11522>}.

Ilustración 4. Geometrías generadas para Bobina en ANSYS HFSS.



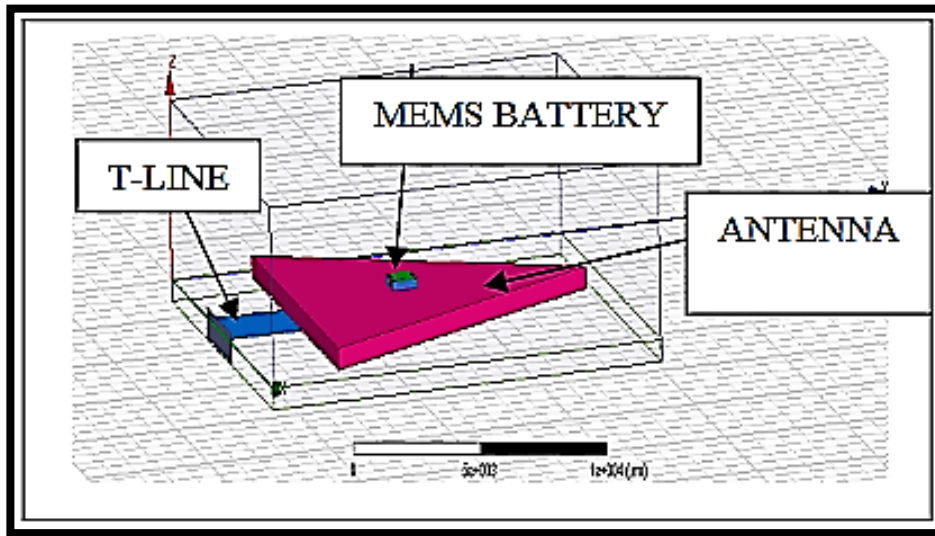
Fuente. Mutashar, Saad, et al. "Analysis and optimization of spiral circular inductive coupling link for bio-implanted applications on air and within human tissue. [Ilustración]. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/263506901>.

En resumen, los autores mencionados anteriormente realizaron el diseño de una red de antenas ("External Coil e implanted Coil") con geometría circular, los análisis obtenidos se generaron mediante la simulación en el software ANSYS HFSS en donde ubicaron la antena alrededor de la cabeza con el objetivo de evidenciar como el patrón de radiación penetraba en el modelo de cabeza utilizada.

A. Amoah, B. Jingfu, A. Kwaku and E. S. Mawuli⁷, autores del siguiente trabajo investigativo realizaron el diseño de una antena Microstrip la cual opera en rangos de súper alta frecuencia (9 GHz a 18 GHz) para aplicaciones de telecomunicaciones tales como sistemas de comunicación satelital, radares y navegación de aviones. Los diseños obtenidos fueron verificados mediante la simulación de la antena Microstrip triangular, se realizaron en el software ANSYS HFSS, los resultados de dicha simulación se evidencian en la Cuadro 2 e Ilustración 5.

⁷ A. Amoah, B. Jingfu, A. Kwaku and E. S. Mawuli, "Microwave Super High Frequency (SHF) Antenna for (Satellite Communication Systems, Radar, Aircraft Navigation, Radio Astronomy, Remote Sensing and Communications (<https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.javeriana.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8604474>))

Ilustración 5. Antena Microstrip Triangular



Fuente. A. Amoah, B. Jingfu, A. Kwaku and E. S. Mawuli, "Microwave Super High Frequency (SHF) Antenna for (Satellite Communication Systems, Radar, Aircraft Navigation, Radio Astronomy, Remote Sensing and Communications). [Ilustración] Recuperado de <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.javeriana.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8604474>.

Cuadro 2. Resultados simulación geometría antena Microstrip Triangular.

Número	Frecuencia (GHz)	VSWR (INPORT-1)	VSWR (INPORT-1)	VSWR (OUTPORT-1)	VSWR (OUTPORT-2)	VSWR (WAVEPORT)
13	8.5	297.93	405.76	439.93	302.18	15.88
14	9.0	259.66	354.49	384.33	263.39	14.05
15	9.5	227.51	311.40	337.59	230.82	12.14
16	10.0	200.27	274.90	297.98	203.20	10.14
17	10.5	177.01	243.71	264.08	179.64	8.10
18	11.0	157.01	216.88	234.94	159.36	6.04
19	11.5	139.68	193.64	209.68	142.04	4.08
20	12.0	124.63	173.40	187.70	126.60	2.42
21	12.5	111.46	156.00	168.46	113.24	1.32
22	13.0	99.88	140.12	152.60	102.00	1.70
23	13.5	89.65	126.34	136.60	91.20	3.12
24	14.0	80.59	114.10	123.26	82.00	4.90
25	14.5	72.53	103.22	111.42	74.00	6.66

Fuente. El Autor

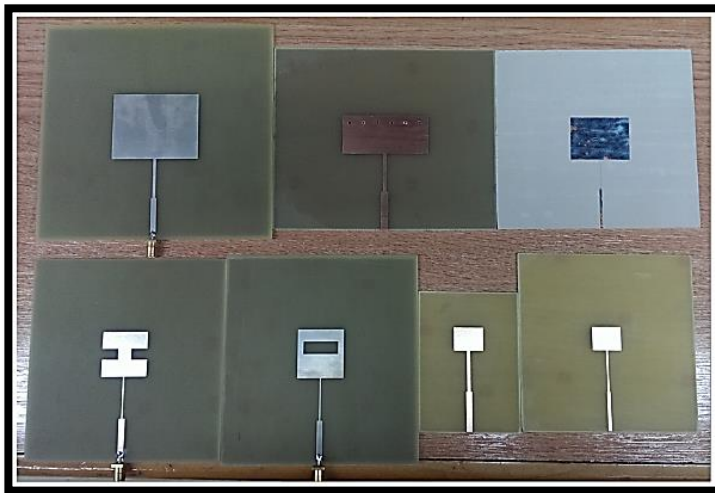
Con lo anterior el autor indica los diferentes valores de relación de onda estacionaria que se presentaron frente a diferentes números de frecuencias calculadas y

simuladas. Por medio del software de simulación electromagnética ANSYS HFSS los autores generaron el respectivo análisis del comportamiento de la antena propuesta.

Por otro lado, a nivel nacional se encontraron los siguientes documentos. En el año 2014, Omar Ferney Alvares Herrera⁸ estudiante de la Pontificia Universidad Javeriana realizó el diseño, simulación y miniaturización de 8 antenas Microstrip en el software ANSYS HFSS. Véase Ilustración 6.

El autor de esta tesis de grado eligió materiales de sustrato FR4 y CER10 de taconic por sus bajos costos. “Las antenas fabricadas operan entre las frecuencias 1850MHz y 1910MHz con un ancho de banda de 60MHz. Las técnicas que uso para la miniaturización de estas antenas Microstrip fueron: postes de cortocircuito, ranuras en el parche, forma de parche, carga distribuidas, material del sustrato, estructura periódica EBG y estructura metamaterial”.⁹

Ilustración 6. Comparación visual antenas construidas.



Fuente. Álvarez Herrera, Omar Ferney. Análisis comparativo de diversas técnicas de miniaturización de antenas parche en la banda PSC (1,9 GHz). [Ilustración]. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12746>.

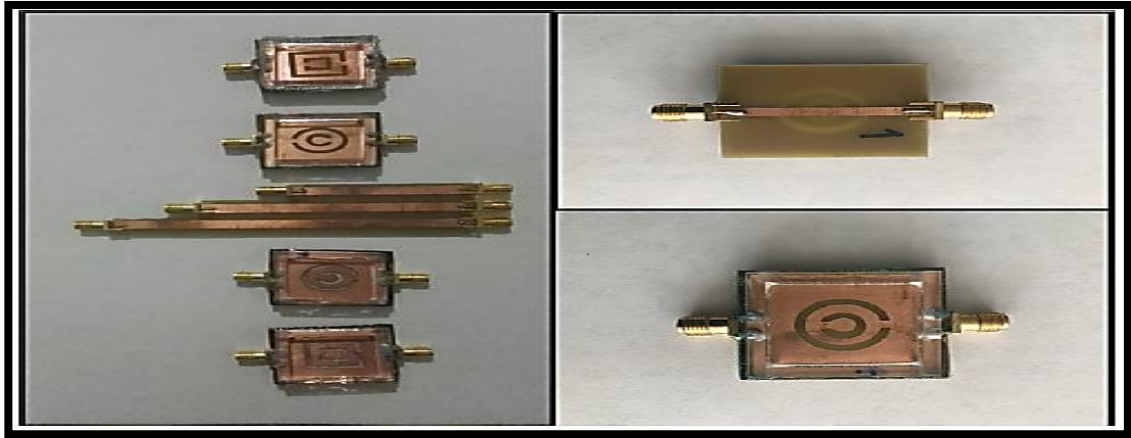
Por último, el autor concluye que las antenas Microstrip tienen la capacidad de reducir su tamaño mediante técnicas de miniaturización, además de evidenciar los diferentes tipos de forma geométricas que se utilizaron en estos radiadores, el autor realizó la simulación de las antenas mediante el software ANSYS HFSS.

⁸ Álvarez Herrera, Omar Ferney. análisis comparativo de diversas técnicas de miniaturización de antenas parche en la banda PSC (1,9 GHz). Trabajo de Grado. Bogotá.: Universidad Pontificia Javeriana. Facultad de ingeniería. Departamento Electrónica. 2014. 65 p.

⁹ *Ibíd.*, p.24

En el año 2017, Duver Ricardo Vargas Solano y José Luis Zamora Fernández estudiantes de la Universidad Católica de Colombia, desarrollaron prototipos de sensores planares con el objetivo de detectar presencia de glifosato en el agua. La investigación expone técnicas usadas para la simulación de los prototipos de estos sensores, adicionalmente este documento contiene diferentes simulaciones de parámetros de radiación de una antena planar utilizando el software Keysight-ADS. Véase Ilustración 7.

Ilustración 7. Kit de sensores CSRR.



Fuente. Vargas Solano, D. R. & Zamora Fernández, J. L. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. [Ilustración]. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15293>.

Los resultados generados por la geometría cuadrada se adjuntan a continuación, véase Cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados sensor cuadrado.

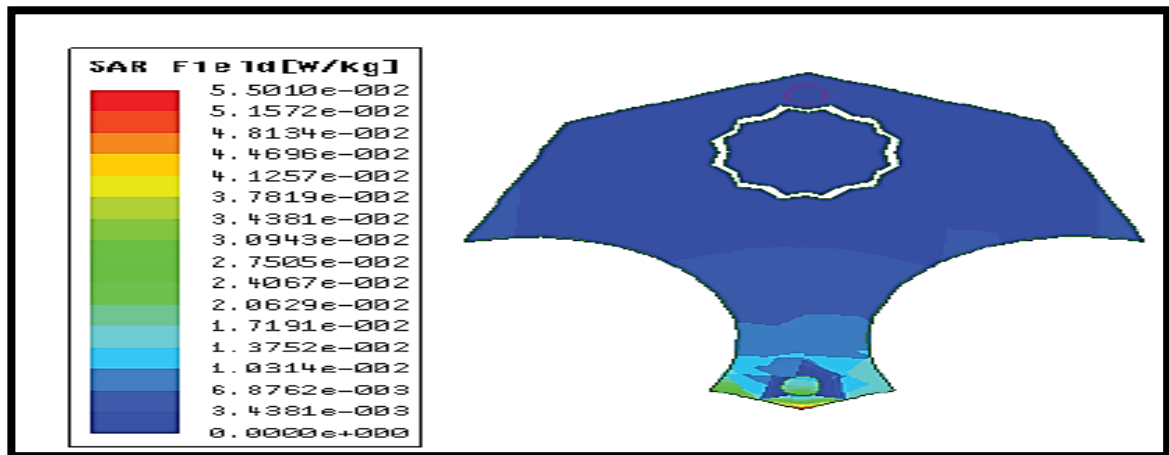
RESULTADO EXPERIMENTAL RESONADOR CUADRADO		
Concentración cada 400 ml	Parámetro S_{21} (dB)	Frecuencia (MHz)
0	- 11.8	585.80
0.2	-11.52	576.23
0.4	-11.26	571.47
0.6	-10.95	571.47
0.8	-10.43	576.26
1	-10.15	576.23
1.4	-9.35	573.05
1.6	-8.36	574.64
1.8	-8.87	577.82
2	-8.69	574.64

Fuente. El Autor

Las técnicas usadas para la detección de glifosato en agua fueron: “variación de estructuras planares que permitieran determinar cambios en la permitividad, considerando diferentes materiales de fabricación y formas geométricas tales como cuadradas y circulares para luego ser simuladas en el software Keysight-ADS. Los autores mencionan como por medio de la variación del diseño de los parámetros CSRR predecían la frecuencia de resonancia para encontrar glifosato en el agua”¹⁰.

En la Ilustración 5, la simulación realizada se puede identificar la tasa de absorción específica S.A.R (Specific Absorption rate, acrónimo en inglés) que se generaría sobre la superficie de la antena diseñada. En el año 2015 investigadores realizaron estudio y diseño de 2 antenas Microstrip, de las cuales una de ellas tiene una frecuencia de operación de 2.4GHz diseño 1 (ver ilustración 8) y 5.8GHz diseño 2 (ver ilustración 9), respectivamente. “El primer diseño se generó para aplicaciones médicas, el segundo diseño de antena Microstrip cuyas frecuencias de operación están entre 3.5GHz y 7.5GHz. Las dos antenas se simulan mediante el software ANSYS HFSS con el objetivo de evidenciar que la energía radiada se encuentre entre las normas de seguridad S.A.R para proteger los tejidos humanos de las ondas electromagnéticas”¹¹.

Ilustración 8. Distribución de S.A.R diseño 1.

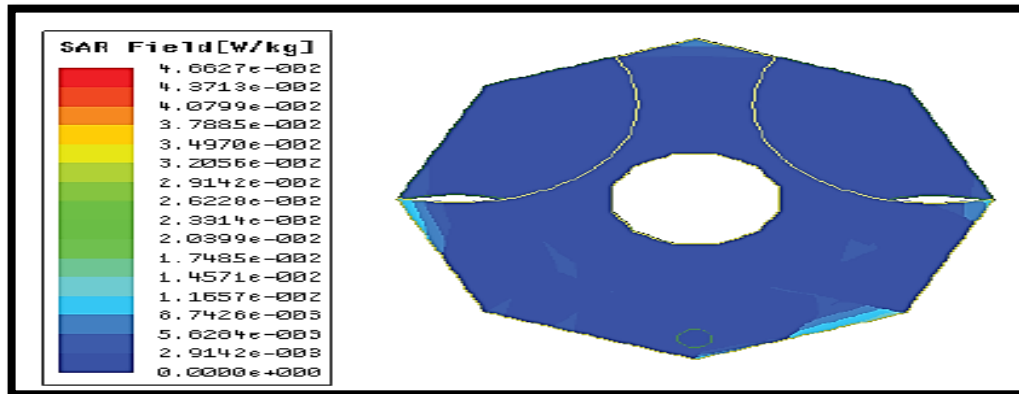


Fuente. M. Y. ElSalamouny and R. M. Shubair, "Novel design of compact low-profile multi-band microstrip antennas for medical applications. [Ilustración]. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366015>.

¹⁰ Vargas Solano, D. R. & Zamora Fernández, J. L. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Trabajo de Grado. Bogotá.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería de Electrónica y Telecomunicaciones. 2017. 63 p.

¹¹ M. Y. ElSalamouny and R. M. Shubair, "Novel design of compact low-profile multi-band microstrip antennas for medical applications," {En línea}. {25 de marzo de 2019} disponible en (<https://ieeexplore.ieee.org/document/7366015>).

Ilustración 9. Distribución de S.A.R diseño 2.

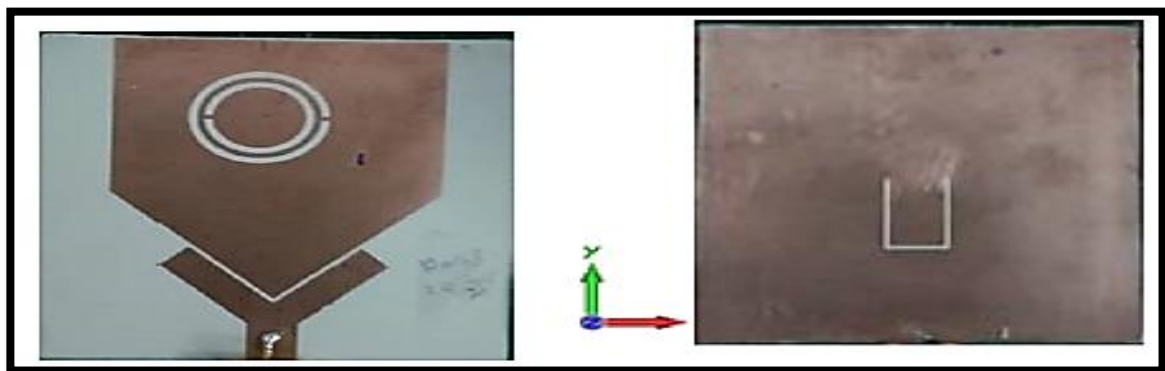


Fuente. M. Y. ElSalamouny and R. M. Shubair, "Novel design of compact low-profile multi-band microstrip antennas for medical applications. [Ilustración]. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366015>.

Las dos ilustraciones 8 y 9 anteriores permiten evidenciar el comportamiento que tuvieron las antenas planteadas diseñadas y simuladas frente al parámetro de la tasa de absorción específica (S.A.R.) y mediante este analizar cómo estos radiadores pueden comportarse en aplicaciones médicas.

En febrero del 2019 el investigador K. N. Paracha¹² realizó un estudio en donde propuso una antena planar de bajo perfil y doble banda con el objetivo de localizarla sobre cuerpo humano. El investigador genero la adición de un plano magnético conductor con el objetivo de mejorar la ganancia de la antena, posterior a ello genero la evaluación de tasa de absorción específica (S.A.R.). Véase Ilustración 10.

Ilustración 10. Distribución de S.A.R diseño 2.



Fuente. K. N. Paracha *et al.*, "A Low Profile, Dual-band, Dual Polarized Antenna for Indoor/Outdoor Wearable Application [Ilustration]. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632896>.

¹² K. N. Paracha *et al.*, "A Low Profile, Dual-band, Dual Polarized Antenna for Indoor/Outdoor wearable Application. {En línea}. {20 febrero de 2019}. Disponible en: (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8632896>).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La tecnología de telecomunicaciones se desarrolla rápidamente y en varias direcciones (medicina, educación, telecomunicaciones entre otros), esta lidera el crecimiento de la economía en aspectos básicos del ser humano, transforma la forma de vida de las personas, estableciendo nuevos negocios, nuevos empleos los cuales mejoran la vida del individuo. Según McKinsey Global Institute¹³ indica, que el potencial estimado de impacto económico de las tecnologías en el año 2025 estará liderado por el internet móvil, seguido de este, se ubica software inteligente, y en tercera posición, el internet de las cosas.

Según los datos obtenidos por este instituto “McKinsey Global Institute” se puede evidenciar la importancia que tomará esta última tecnología en las comunicaciones inalámbricas que afectarían la vida del ser humano. Por otro lado, los impactos de desarrollo tecnológico vienen acompañados por el creciente uso de redes inalámbricas las cuales permitan transmitir y enviar información de manera instantánea por medio de diferentes tipos de antenas las cuales operaran a súper altas frecuencias y baja latencia.

Dados estos avances es importante utilizar diferentes estudios de simulación electromagnética que permitan evidenciar y verificar respectivamente el patrón de radiación emitida por las antenas Microstrip en tejidos humanos en súper altas frecuencias (3.5 GHz – 6 GHz). El uso de súper altas frecuencias en antenas Microstrip, está directamente relacionado con el tamaño de esta, entre menos área requiera esta antena, esta radiara a frecuencias mayores, sin embargo, las antenas de este tipo presentan condiciones negativas tales como, poca banda ancha, baja directividad y potencia entre otros. Por otro lado, con el uso de dispositivos electrónicos cerca o alrededor de tejidos humanos los cuales usen antenas Microstrip que evidencien una frecuencia operación (SHF / 3 - 30 GHz según la UIT) y bandas altas (frecuencias de 6 GHz y superiores según la ANE) para transmitir y recibir ondas electromagnéticas es importante generar gráficos del patrón de radiación de este tipo de antenas.

Según la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer ¹⁴ (I.R.A.C.) en el año 2011 se evidencio en el lapso de 3 años el aumento de enfermedades producidas por la exposición de dispositivos celulares en el cuerpo humano. Estas conexiones inalámbricas según estudios de radiación sobre el cuerpo humano realizados por “la UIT indican el nivel de frecuencia mínimo (10 MHz) y máximo (10 GHz) al que se puede exponer el cuerpo humano”¹⁵.

¹³ Manyika, James, et al. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. Vol. 180. San Francisco, CA: McKinsey Global Institute, 2013. p 51.

¹⁴ Union Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Protección contra las interferencias. Edición de 2000. Ginebra: International Telecommunication Union, 2000, p 23

¹⁵ Ibid., p.2

Por lo tanto, el siguiente trabajo de grado busca plantearse la siguiente pregunta de investigación para su desarrollo:

¿Cuáles son los parámetros de diseño (eléctricos, físicos, materiales) de una antena Microstrip cuya frecuencia de operación se encuentre entre rangos de 3.5 GHz a 6 GHz para evaluar la tasa de absorción específica en el tejido humano según el patrón de radiación generado?

1.3 OBJETIVOS

- Objetivo general.
 1. Diseñar y simular una antena Microstrip de frecuencia de operación de 3.5 GHz a 6GHz para determinar el patrón de radiación en tejidos humanos según la tasa de absorción específica (S.A.R.).
- Objetivos específicos.
 1. Identificar los parámetros de diseño eléctricos, geométricos y de tipos de materiales de una antena Microstrip de rangos de frecuencia de operación entre (3.5 GHz – 6 GHz).
 2. Calcular los parámetros de diseño de una antena Microstrip de rangos de frecuencia de operación entre (3.5 GHz – 6 GHz).
 3. Corroborar los parámetros de diseño de la antena Microstrip por medio de herramientas simulación electromagnéticas (ej. ANSYS HFSS - FEKO).
 4. Validar los resultados obtenidos en un modelo de simulación CAD del tejido humano según la tasa de absorción específica recomendada por la UIT.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existen diferentes dispositivos electrónicos que radian ondas electromagnéticas para realizar funciones tales como el envío y recepción de información. Según un informe técnico realizado por Dave Evan¹⁶ colaborador de la empresa Cisco, indica que la población mundial será de 7,6 mil millones y 50 mil dispositivos conectados a internet en el año 2020, esto da una idea de la cantidad de conexiones inalámbricas que se generaran en los próximos años.

Según Gustavo Escudero Fernández e Ildelfonso Castro Angulo¹⁷ a nivel internacional América Latina es la zona con mayor crecimiento en las Telecomunicaciones, sin embargo, este desarrollo en comunicación inalámbrica ha traído consigo preocupación por los efectos negativos que ello podría traer para las personas que residen en Latinoamérica, puesto que la radiación emitida por las diferentes antenas interactúan involuntariamente con los tejidos del cuerpo humano los cuales pueden causar traumas o consecuencias negativas para el mismo en tiempos futuros. Adicional a ello, el uso del espectro electromagnético por los diferentes tipos de antenas, según la IARC¹⁸ (como lo dice su acrónimo en inglés "International Agency for Research on Cancer") por medio de una investigación acerca del uso del celular en el año 2004 mostro un 40% de aumento frente a Gliomas o cáncer en el cerebro.

En la actualidad existen diferentes simuladores electromagnéticos los cuales permiten evidenciar por medio de simulaciones virtuales en tiempo real el comportamiento que tendrán los diferentes tipos de antenas existentes actualmente, adicional a ello estos softwares permiten la integración desde objetos cotidianos hasta partes del cuerpo humano con lo que se puede evidenciar el patrón de radiación y la cantidad de energía que será absorbida por las diferentes partes del cuerpo.

Por lo tanto, este trabajo de grado se desarrolla con el objetivo de complementar el proyecto realizado por el grupo de Investigación TELSAF en el 2018 denominado "Desarrollo de metodologías para la caracterización y modelado de enlaces inductivos con aplicaciones en implantes corporales" y a su vez, acercar al semillero RF MEMS de la Universidad Católica de Colombia a la utilización de técnicas de diseño y utilización de software para simular antenas tipo Microstrip de frecuencia de operación entre (3.5 GHz – 6 GHz).

¹⁶ Dave, op, cit. p.3.

¹⁷ Fernández, Gustavo Escudero, and Ildelfonso Castro Angulo. "Exposición poblacional a campos electromagnéticos de radiofrecuencias en la localidad histórica y del Caribe Norte de Cartagena de Indias." Teknos revista científica Vol4. No 2 (2008): p 18.

¹⁸ Lin, James C. "The Curious Case of the IARC Working Group on Radio Frequency Electromagnetic Fields and Cell Phones [Health Effects]." IEEE Microwave Magazine 12.6 (2011): p 32.

1.5 ALCANCES

- El presente trabajo busca establecer los parámetros de diseño (Físico, Materiales, geometrías) de una antena Microstrip que opere en un rango de operación de 3.5 GHz a 6 GHz.
- El uso de un emulador o simulador (ANSYS HFSS) electromagnético permitirá evidenciar e incorporar el modelo del tejido humano en donde por medio de simulación se evidenciará el comportamiento de la antena.
- Las herramientas de análisis de los diferentes softwares de simulación permitirán obtener el patrón de radiación en el tejido humano validando de esta manera, el parámetro de absorción específica recomendado por la UIT en la piel el cual comprende epidermis y dermis.

1.6 LIMITACIÓN

- La falta de información encontrada en las bases de datos de la Universidad Católica de Colombia referente a simulaciones electromagnéticas y antenas Microstrip puede ocasionar falencias en la selección de las diferentes características de diseño que se tendrán en cuenta en la simulación de la antena final.
- La selección de ciertos tipos de materiales (ej. dieléctricos o Conductores) en los substratos o en las líneas conductoras de la Antena Microstrip a diseñarse, podrá afectar el diseño eléctrico del circuito y a su vez el rango de frecuencias de operación deseadas (3.5 – 6 GHz).
- Para la elaboración del trabajo de grado se requiere el uso de diferentes softwares de simulación electromagnética ANSYS HFSS, FEKO, para lo cual en el segundo semestre del año 2019 la renovación de la licencia del software FEKO no fue efectuada por la facultad de ingeniería de la Universidad Católica de Colombia, lo que puede afectar el desarrollo de la simulación en el software FEKO.
- La corroboración de los resultados del SAR en este trabajo de Grado, se deben mejorar con ayuda de un especialista en Piel (Dermatólogo).

2. MARCO REFERENCIAL

En la actualidad el ser humano se comunica a través del espectro electromagnético, su uso y estudio permitió que se desarrollaran nuevas formas en que el ser humano transmite, recibe información y realiza diferentes tareas diarias, el desarrollo del IoT permitirá conectar cosas con internet, lo que a su vez generara mayor administración sobre los recursos y mejor uso de estos. El orden de los conceptos evidenciados a continuación se generó de forma secuencial de acuerdo con el Anexo 1.

2.1 Marco Teórico - (INTERNET DE LAS COSAS (IoT))

La primera vez que se mencionó el internet de las cosas (IoT) fue en el año 1999. El IoT es el mundo en el que cada objeto tiene una identidad virtual propia y capacidad potencial para integrarse e interactuar de manera independiente en la red con cualquier otro individuo, ya sea una máquina (M2M) o un humano¹⁹. El concepto IoT hace referencia a la conexión de objetos cotidianos usados por el ser humano a internet.

Con la invención del internet de las cosas las personas han logrado mejorar aún más su calidad de vida, según Cisco en el año 2003 existían aproximadamente 6,3 mil millones de personas en el planeta y respectivamente 500 millones de dispositivos electrónicos conectados a internet, según esto el porcentaje de cosas conectadas a internet eran muy bajas, por lo cual el termino IoT no existía en ese entonces, como se evidencio en los años posteriores el desarrollo de celulares o tabletas aumento drásticamente las conexiones de cosas con internet de 500 millones se establecieron 12,5 mil millones de dispositivos electrónicos conectados a internet en un lapso de 7 años, esta creciente evolución de internet y conexiones impactaron positivamente en temas tales como educación, ciencia, avances tecnológicos y calidad de vida de las personas²⁰.

El internet de las cosas está presente en la salud, muchas compañías venden dispositivos que se usan generalmente en los miembros superiores del cuerpo humano con la finalidad de informar y alertar los signos vitales del portador. En comunidades rurales el IoT por medio de sensores, agricultores o campesinos verifican el estado de sus cultivos y animales por medio de esta tecnología, administrar y controlar los recursos de esta.

¹⁹ Everlet, Alvaro, and Javier Pastor. "Introducción al Internet de las cosas." Construyendo un proyecto de IOT. {En línea}. {28 marzo de 2019} disponible en: (https://www.altairsmartworks.com/newFrontend/img-carriots/press_room/Construyendo_un_proyecto_de_IOT.pdf)

²⁰ Dave, op, cit. p.6.

El termino ciudades inteligentes en donde todo está conectado con todo, desde el suelo hasta los semáforos, permite el mejoramiento del tráfico, reducción de accidentes, esta tecnología también está presente en edificios, lo cual genera mayor administración de la energía que el mismo consume. En redes de comunicaciones existen diferentes tipos de conexiones que se establecen de acuerdo con la necesidad a la que se desee adaptar la red, existen diferentes tipos de conexiones tales como. Ver cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación de redes.

	CLASIFICACIÓN DE REDES			
	PAN	LAN	MAN	WAN
Estándar	IEEE 802.15	IEEE 802.11	IEEE 802.16	IEEE 802.20
Velocidad	< 1Mbps	11 a 54Mbps	11 a 100Mbps	10 a 344Kbps
Rango	Corto	Media	Medio-largo	Amplia
Aplicación	Bluetooth	Redes empresariales	Redes metropolitanas	Red celular

Fuente. El Autor

Como se puede evidenciar en el cuadro anterior las características generales de las redes mencionadas permite diferir el uso en que se pueden utilizar, el tipo de antena propuesta en este trabajo de grado se planea diseñar para un individuo, con lo anterior se presenta a continuación el tipo de red que se acomoda a esta situación.

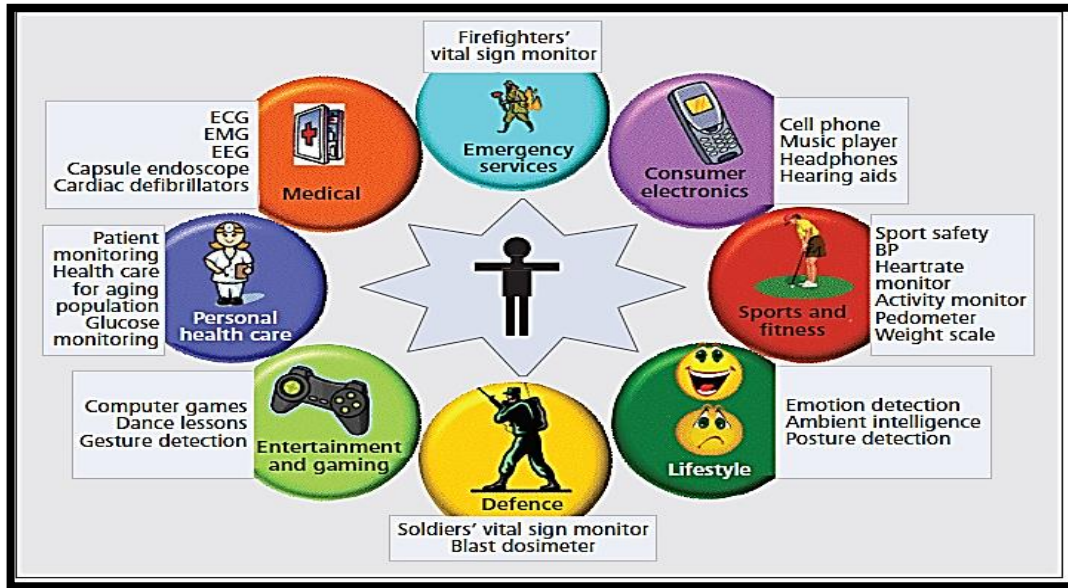
2.2 REDES DE AREA CORPORAL (BAN)

Según M. Patel y J. Wang²¹ el término BAN (Body Area Network) o red de área corporal se refiere a la interconexión de dispositivos sobre o alrededor del cuerpo humano con características tales como: conexión máxima de 64 dispositivos, una cobertura de operación de 0 hasta 5 metros, sin embargo, la vida útil que debe ser contemplada para estas aplicaciones sobre el cuerpo humano debe ser máxima de 5 años, donde las velocidades de transmisión pueden ir desde Kbps hasta máximo

²¹ M. Patel and J. Wang, "Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies". {En línea}. {29 de marzo de 2019} disponible en: (<https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.javeriana.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5416354>).

10Mbps. En la Ilustración 11 se puede evidenciar las aplicaciones que se pueden implementar para este tipo de red B.A.N.

Ilustración 11. Aplicaciones red B.A.N.



Fuente. M. Patel and J. Wang, "Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies". [Ilustración] recuperado de (<https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.javeriana.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5416354>).

Lo anterior constituye las diferentes tipologías de redes son utilizadas actualmente según las necesidades que se deseen solucionar, las diferentes redes contemplan nodos interconectados los cuales intercambian información, dichas redes cuentan con diferentes elementos los cuales permiten la comunicación, una de ellas son la gran variedad de antenas que se utilizan, por lo cual este tópico será parte de estudio en el próximo capítulo.

2.3 TEORÍA DE ANTENAS

El desarrollo de las antenas se debe a los estudios y avances que realizó el científico James Clerk Maxwell. Según Constantine A. Balanis²², Maxwell fue el que unificó las teorías de electricidad y magnetismo y elocuentemente representó su relación en

²² BALANIS, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edition. New Jersey: Wiley – Interscience, 2005, p. 20.

un set de fórmulas (ver ecuación 1,2,3,4) conocidas como las Ecuaciones de Maxwell²³. Las cuales se describirán a continuación:

$$\nabla \times \varepsilon = \frac{\partial B}{\partial T} - \mathcal{M} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial T} + \mathcal{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (4)$$

Donde:

- ε es la intensidad de campo eléctrico, en (V/m)
- H es la intensidad de campo magnético, en (A/m)
- D es la intensidad de flujo eléctrico, en (Coul/m²)
- B es la densidad de flujo magnético, en (Wb/m²)
- \mathcal{M} es la densidad ficticia de corriente magnética
- \mathcal{J} es la densidad de corriente eléctrica, en (A/m²)
- ρ es la densidad de carga eléctrica, en (Coul/m³)

Como lo menciona Jaume Anguera²⁴, las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y campos que lo crean. Completando esta definición, se denomina antena al dispositivo capaz de convertir corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas y transmitir las por medio del espectro hacia una antena receptora encargada de convertir ondas electromagnéticas en corriente eléctrica.

La frecuencia y longitud de onda caracterizan las ondas electromagnéticas, variando estas podemos utilizar el espectro electromagnético más eficientemente, la ecuación (Ver ecuación 5) que relaciona los conceptos mencionados es:

$$\lambda = \frac{C}{F} \quad (5)$$

Donde:

- λ es la longitud de onda (m).
- C es la velocidad de la luz (3x10⁸ m/s)
- F es la frecuencia de operación (Hz).

²³ Ibid., p 10.

²⁴ Jaume, Anguera, and Pérez Antonio. "Teoría de Antenas." Guía de Estudio. La Salle Ingeniería i Arquitectura. Universitat Ramon Llull 2000, p.91

Estos avances permitieron que el ser humano desarrollara dispositivos en donde estos usaran el espectro electromagnético para diversas funciones. En la actualidad existen diferentes rangos de frecuencias los cuales son asignados a una tarea en específico dependiendo la función que vaya a realizar, como se puede evidenciar en el cuadro 5, el rango de frecuencias comprende bajas, medianas y altas en donde estos rangos permiten distinguir la frecuencia mínima y máxima que puede ser utilizada para transmitir y recibir información.

Cuadro 5. Nombre y rango de frecuencias.

Banda	Frecuencias	Denominación	Designación métrica
VLF	3 - 30 kHz	Very Low Frequency	Ondas miriamétricas
LF	30 – 300 kHz	Low Frequency	Ondas Kilométricas
MF	300 – 3000 kHz	Medium Frequency	Ondas hectométricas
HF	3 – 30 MHz	High Frequency	Ondas decamétricas
VHF	30 – 300 MHz	Very High Frequency	Ondas métricas
UHF	300 – 300MHz	Ultra High Frequency	Ondas decimétricas
SHF	3 – 30 GHz	Super High Frequency	Ondas centimétricas
EFH	30 – 300 GHz	Extra High Frequency	Ondas milimétricas

Fuente. Ramos, Pascual, Francisco. Radiocomunicaciones. Recuperado (<https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=3175449>).

2.3.1 Características de las antenas. Las particularidades que poseen el estudio de la antena permiten que, mediante gráficas, diagramas, patrones, y formulas se pueda evidenciar el comportamiento que puede presentar una antena en un ambiente determinado, para ello se consideran las características principales para el estudio de estas.

2.3.1.1 Patrón de radiación. El autor BALANIS²⁵ define el patrón de radiación como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en las coordenadas espaciales.

2.3.1.2 Diagrama de radiación. Corresponde a información gráfica del campo E y H, electricidad y campo magnético respectivamente donde se evidenciará el máximo vector de radiación en campo eléctrico y magnético²⁶.

2.3.1.3 Impedancia de entrada. La impedancia es la relación entre voltaje y corriente, es una cantidad compleja expresada en “ohm” formada por dos componentes: una parte real denominada resistencia y una parte imaginaria conocida como reactancia²⁷. Ver ecuación 6 y 7.

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{e_r}} \times \ln\left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}\right) \text{ para } \frac{W}{d} < 1 \quad (6)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{e_r}\left(\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{d} + 1.444\right)\right)} \text{ para } \frac{W}{d} > 1 \quad (7)$$

Donde:

- Z_0 , será la impedancia característica. (Ω)
- e_r , constante dieléctrica del material.
- d , ancho del sustrato (cm).
- W , ancho de la línea de transmisión. (cm).

2.3.1.4 Directividad. Relación entre la densidad de potencia radiada por una antena a cierta distancia y una determinada dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica con la misma potencia radiada.²⁸ Ver ecuación 8.

²⁵ BALANIS, op. cit p. 27

²⁶ Ibid., p. 71.

²⁷ Ibid., p. 13.

²⁸ Ramos, op. cit, p. 74

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{Prad} \quad (8)$$

Donde:

- D = Directividad (dB)
- U_{max} = Máxima intensidad de radiación (W)
- $Prad$ = Potencia total radiada (W)

La directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación de su radiación Intensidad en una dirección dada sobre la de una fuente isotrópica²⁹. La directividad se expresa en dB, las antenas que radian en todas las direcciones se conocen en antenas isotrópicas.

2.3.1.5 Eficiencia de radiación. Según los autores Víctor Javier Villar Etxeondo y Mario Sorolla Ayza³⁰, es la relación entre la relación entre la potencia de salida y la suministrada en la entrada, ya que, debido a las pérdidas resistivas existentes, la potencia proporcionada a la entrada y la potencia radiada por ella no es igual. Ver ecuación 9.

$$e_{rad} \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (9)$$

Donde:

- P_{rad} es la potencia radiada por la antena (W).
- P_{in} es la potencia suministrada por la antena (W).
- P_{loss} será la potencia perdida por la antena (W).

2.3.1.6 Ganancia. Se define a la ganancia (G) como a la relación que existe entre la densidad de potencia entregada a la antena en una dirección con respecto a la densidad de potencia radiada por una antena isotrópica³¹. Ver ecuación 10.

$$G = e_{rad} D \quad (10)$$

Donde:

- e_{rad} sera la efectividad de radiación (%)

²⁹ BALANIS, op. cit, p. 44

³⁰ Etxeondo, Villar, and Víctor Javier. "Diseño antena Microstrip de ranura y antena de parche con geometría fractal." (2012) p 16.

³¹ Ibíd., p 14

- D será la directividad de la antena.

Similar a la directividad, excepto que tiene en cuenta la potencia entregada a la antena en lugar de la potencia radiada.

2.3.1.7 Intensidad de radiación. Como lo indica el autor Francisco Ramos³² es la potencia radiada por unidad de Angulo solido en una determinada dirección. Es independiente de la distancia a la que se encuentre la antena.

2.3.1.8 Polarización. Es la forma en que la señal electromagnética se transmitirá por el espectro electromagnético.

2.3.1.9 Ancho de banda. El ancho de banda de una antena se define como margen frecuencial al que la antena está adaptada con su relación de onda estacionaria. Ver ecuación 11.

$$BW = F_{MAX} - F_{MIN} \quad (11)$$

Donde

- BW es el ancho de banda (Hz).
- F_{MAX} es la frecuencia máxima (Hz).
- F_{MIN} es la frecuencia mínima (Hz).

2.3.2.1 Área efectiva. Es importante determinar la potencia recibida que genera la incidencia de un plano de onda. También se puede interpretar como la relación entre potencia que entrega la antena a su carga (suponiendo una antena sin perdidas y una carga adaptada) y la densidad de potencia de la onda incídete³³. Ver ecuación 12.

$$P_r = A_e S_{avg} \quad (12)$$

Donde:

- S_{avg} es el vector de dirección expresado en (W/m^2).
- A_e es la apertura efectiva con dimensiones de (m^2).

2.3.2.2 Longitud efectiva. La relación entre la tensión en circuito abierto que aparece en los terminales de la antena y la intensidad de campo eléctrico en la dirección de la polarización de la antena. La longitud efectiva es la longitud de un

³² Ramos Pascual, Francisco. Radiocomunicaciones. Barcelona: Marcombo, 2007, p.70.

³³ Jaume, op, cit. p. 63

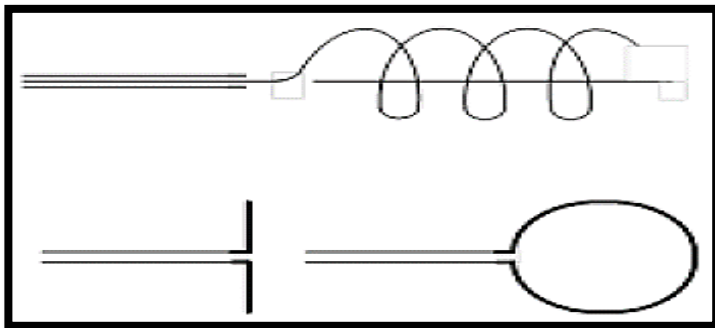
conductor lineal recto orientado perpendicularmente a la dirección dada y paralelo a la polarización de la antena, que tiene una corriente uniforme igual a la de los terminales de la antena y que produce la misma intensidad en campo alejado que la antena en esta dirección.³⁴

2.3.2.3 Parámetros de dispersión. Según el autor José Alberto Bava³⁵ indica que estos parámetros permiten evaluar y medir un comportamiento en microondas la cual establecen medir de forma simultánea la adaptación de cada puerto y la función de transferencia, en donde estos caracterizan un componente de N puertos.

2.4 TIPOS DE ANTENAS

Comprenden los dipolos, monopolos, espiras y helicoides. Un ejemplo muy común de este tipo de antenas son las que se ubican generalmente para la recepción de ondas electromagnéticas las cuales están formadas por conjuntos de dipolos.³⁶ Véase Ilustración 12.

Ilustración 12. Antenas lineales



Fuente. Jaume, Anguera, and Pérez Antonio. "Teoría de Antenas." Guía de Estudio. La Salle Ingeniería i Arquitectura. Universitat Ramón Llull 2000, p.221.

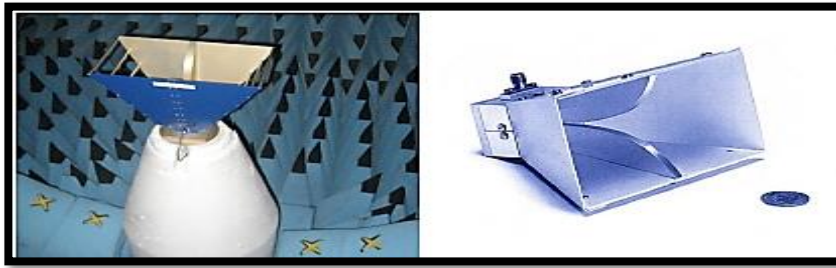
2.4.1 Antenas de apertura. Son antenas cuya forma geométrica que poseen una apertura en su extremo final, este tipo de antenas posee muchas aplicaciones, estas antenas también son conocidas como bocinas. Ver Ilustración 13.

³⁴ Jaume, op, cit. p. 64

³⁵ Bava, J. Alberto. Antenas reflectoras en microondas, D - Editorial de la Universidad de La Plata, 2013. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=4499359>.

³⁶ Jaume, op, cit. p. 22.

Ilustración 13. Antenas de apertura

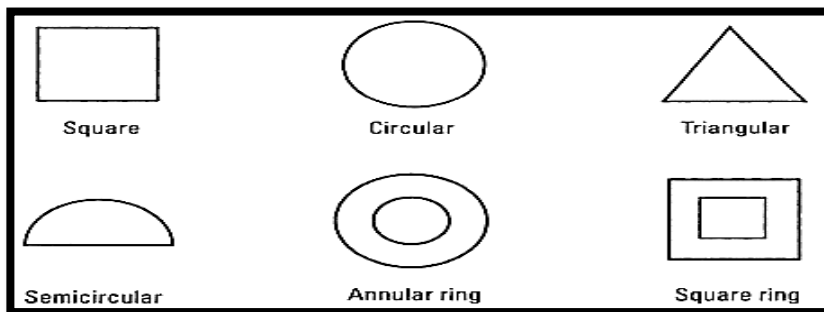


Fuente. Jaume, op, cit. p. 22

2.5 ANTENAS MICROSTRIP

El termino antenas Microstrip fue en el año 1953 por G.A. Deschamps³⁷, sin embargo, el desarrollo de estas se realizó en 1970. En la actualidad existen diferentes geometrías de este tipo de antenas (Ver Ilustración 14). Según David Pozar³⁸ una antena Microstrip es la línea de transmisión plana más popular, porque esta puede ser fabricada bajo procesos de fotolitografía y fácilmente estas pueden integrarse con otros dispositivos de microonda, también se considera la definición del autor Francisco ramos³⁹ quien define la antena Microstrip como parches metálicos impresos sobre un sustrato dieléctrico situado sobre de un plano metálico.

Ilustración 14. Ilustración de antena Microstrip



Fuente. Lee, Kai Fong. "A personal overview of the development of microstrip patch antennas." 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). IEEE, 2016.

El funcionamiento de estas antenas dependerá de los elementos de fabricación como lo son parámetros de permitividad, permeabilidad, y las dimensiones físicas de la antena tipo parche, las cuales son, ancho, largo del parche de la antena. Estas

³⁷ Lee, Kai Fong. "A personal overview of the development of microstrip patch antennas." 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). IEEE, 2016.

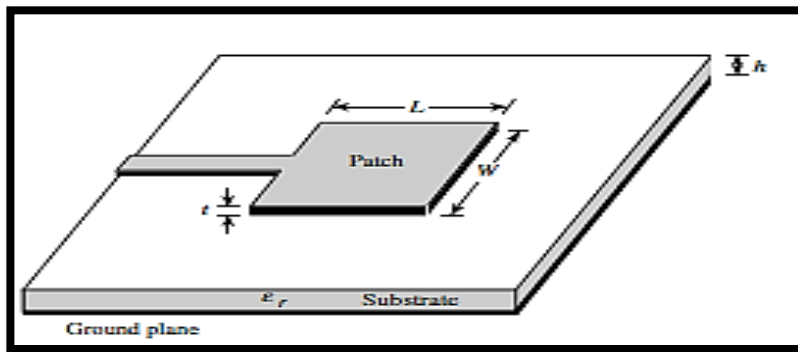
³⁸ M. Pozar David. Microwave Engineering: 2da Edition. Nueva York: John Wiley & Sons, 1998, p. 160.

³⁹ Ramos Pascual, Francisco. Radiocomunicaciones. Barcelona: Marcombo, 2007. Accessed March 1, 2019. ProQuest Ebook Central. Pag 94.

antenas están en constante desarrollo, su geometría y tamaños cada vez se van haciendo más pequeños⁴⁰, ya que permiten adaptarse a las nuevas exigencias que presentan las nuevas tendencias de telecomunicaciones⁴¹.

Existen diferentes tipos de geometrías que se pueden realizar para estas antenas tales como, espiral, circular, rectangular (Ver Ilustración 15), cuadrada, fractal. El diseño geométrico dependerá de las características mencionadas anteriormente. Para realizar el cálculo del ancho y largo de la antena Microstrip con geometría rectangular, se deben resolver las ecuaciones 13,14,15,16 respectivamente.

Ilustración 15. Antena Microstrip



Fuente. BALANIS, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edition. New Jersey: Wiley –Interscience, 2005, p. 6.

$$W = \frac{c}{2Fr} \times \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (13)$$

$$E_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[1 + 12 \frac{0.1588}{1.186} \right]^{-1/2} \quad (14)$$

$$\Delta L = (h)0.412 * \frac{(E_{eff} + 0.3) * \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(E_{eff} - 0.258) * \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (15)$$

$$L = \frac{c}{2(Fr)(\sqrt{E_{eff}})} - 2(\Delta L) \quad (16)$$

⁴⁰ Martínez Rodríguez, Alfredo. Diseño de antenas transparentes para WIFI. Trabajo de fin de grado (ingeniería en tecnologías de telecomunicación). Madrid, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de teoría de la señal y las telecomunicaciones. 2017. 11 p.

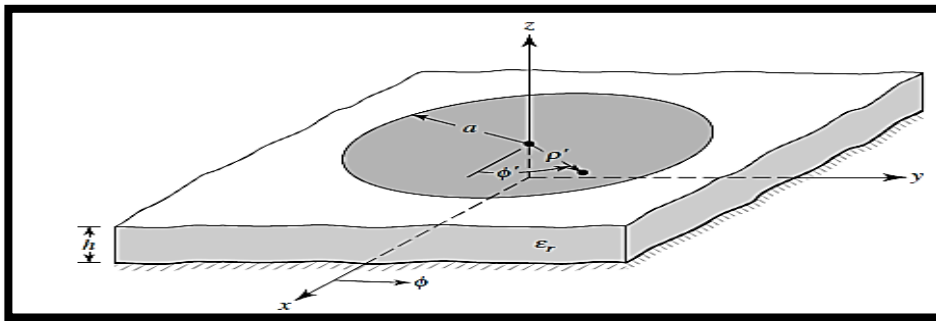
⁴¹ Deschamps, Georges A. "Microstrip microwave antennas." Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, Oct. 1953.

Donde:

- W es el ancho de la antena (mm)
- c es la velocidad de la luz (m/s^2)
- F_r es la frecuencia de operación (m/s^2)
- ϵ_r es la constante dieléctrica.
- ΔL es el largo de la antena (mm)
- h es el grosor del material (mm)
- E_{reff} constante dieléctrica efectiva.

A continuación, se puede evidenciar en la ilustración 16, la geometría que presenta una antena Microstrip circular, sus características y posterior a ello los cálculos que se deben realizar para su diseño.

Ilustración 16. Antena Microstrip geometría circular.



Fuente. Balanis, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edition. New Jersey: Wiley – Interscience, 2005, p. 844.

Para una antena Microstrip con geometría circular (Ilustración 16) deben resolverse las ecuaciones 17 y 18.

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (17)$$

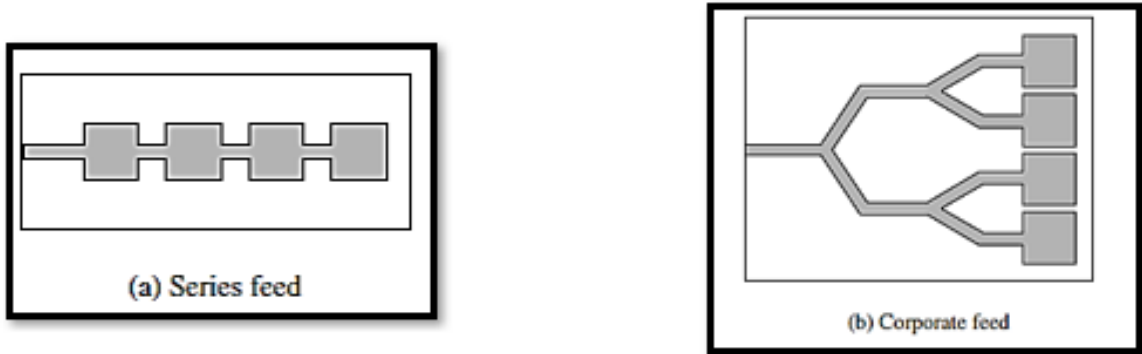
$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left[\frac{\pi F}{2h} \right] + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

Donde

- ϵ_r es la constante dieléctrica del material.
- F esta dado en (Hz)
- h altura del sustrato (cm)
- f_r es la frecuencia de resonancia (GHz)
- a radio del círculo (cm)

Este tipo de antenas también no son solo usadas como elemento único, es decir, con este tipo de antenas se pueden diseñar arreglos de estas, las cuales permitan operar a determinadas frecuencias según sea su aplicación, estos arreglos pueden ser alimentados por una única línea de transmisión o múltiples arreglos de una red de alimentación. Ver Ilustración 17a y 17b.

Ilustración 17. (a) Alimentación de un arreglo de antena Microstrip en serie, (b). Alimentación de un arreglo de antena Microstrip en arreglo.



Fuente. Balanis, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edición. New Jersey: Wiley –Interscience, 2005, p. 866.

2.5.1 Métodos de alimentación. Según el autor Gordón Corrales y Andrea Lizeth existen diferentes métodos de alimentación para este tipo de antenas los cuales se pueden agrupar en tres grupos los cuales son:

- Alimentación Directa: Como su nombre lo indica la alimentación se dará mediante una conexión entre la alimentación y la antena radiante,⁴²
- Alimentación por proximidad: En este tipo de alimentación es requerido un conector que se ubica en la parte trasera del circuito impreso y el conector central del coaxial se une con el conductor de la antena parche.⁴³

Adicional a los métodos de alimentación descritos anteriormente, a continuación, se describen las ecuaciones para el cálculo de diseño de una línea de transmisión, la ecuación 19 describe la fórmula para hallar la constante dieléctrica efectiva de una línea de transmisión.

$$\epsilon_{\epsilon} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 \times d}{W}}} \quad (19)$$

⁴² Gordón Corrales, Andrea Lizeth. Diseño, simulación e implementación de una antena Microstrip Yagi para operar en la banda de 5.8 GHz. BS thesis. Quito, 2016.: 40 p

⁴³ Ibid., p 42

Donde;

- e_r es la constante dieléctrica del material.
- d es el grosor del material (cm).
- W es el ancho de la línea de transmisión (cm).
- ϵ_{ϵ} constante dieléctrica efectiva.

Para calcular y hallar las variables correspondientes al ancho (W) y largo de la línea (l), se procede a resolver las ecuaciones que se describen a continuación, donde A (primera condición) será utilizado dado el caso de $W/d < 2$ ó, B (segunda condición) se deberá utilizar su la condición $W/d > 2$, ver ecuaciones 20 a la 25 respectivamente.

$$A = \frac{Z_0}{60} \times \sqrt{\frac{e_{r+1}}{2}} + \frac{e_{r-1}}{e_{r+1}} \times \left(0.23 + \frac{0.11}{e_r}\right) \quad (20)$$

$$B = \frac{377\pi}{2 \times Z_0 \times e_r} \quad (21)$$

$$\frac{W}{d} < 2 = \frac{2}{\pi} \frac{8e^A}{e^{2 \times A - 2}} \quad (22)$$

$$\frac{W}{d} > 2 = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{e_{r-1}}{2 \times e_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.11}{e_r} \right\} \right] \quad (23)$$

$$K_0 = \frac{2 \times \pi \times f}{c} \quad (24)$$

$$l = \frac{90^\circ \times \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right)}{\sqrt{\epsilon_{\epsilon} \times K_0}} \quad (25)$$

Donde;

- e_r es la constante dieléctrica del material.
- d es el grosor del material (cm).
- W es el ancho de la línea de transmisión (cm).
- Z_0 es la impedancia característica (Ω).
- π es constante matemática 3.1416.
- C es la velocidad de la luz (m/s^2).
- f es la frecuencia de operación en (Hz).
- l es la longitud de la línea (cm).

2.5.2 Conductores y sustratos de fabricación antenas Microstrip. En la actualidad existen diferentes materiales y sustratos de fabricación que pueden ser utilizados para el diseño de las antenas Microstrip, a continuación, se describen algunos materiales conductores con su respectiva conductividad (Cuadro 6) y sustratos de fabricación con algunas de sus características más relevantes (Cuadro 7).

Cuadro 6. Materiales Conductores

Material	Conductividad
Aluminio	3.816×10^7
Latón	2.564×10^7
Bronce	1.00×10^7
Cromo	3.846×10^7
Cobre	$5,813 \times 10^7$
Oro	4.098×10^6
Grafito	7.0×10^4
Plomo	4.56×10^6
Platino	9.52×10^6

Fuente. M. Pozar David. Microwave Engineering: 2da Edition. Nueva York: John Wiley & Sons, 1998, p. 704.

En el cuadro 7 pueden observarse las características tales como permitividad dieléctrica y tangente de pérdidas del dieléctrico los cuales afectaran directamente el diseño y el comportamiento de la antena a diseñar.

Cuadro 7. Características sustratos de Fabricacion.

Sustrato	Permitividad dieléctrica	Tangente de pérdidas del dieléctrico
FR4 Epoxi	4.4	0.02
Vidrio	5.5	0.002
Rogers RO3003	3	0.0013
Rogers RT/Duroid 5870	2.33	0.0012
Rogers RT/Duroid 5880	2.2	0.0009

Fuente. El Autor

En la actualidad los acoples que se realizan entre antenas se generan mediante inducción o auto inducción, para generar este fenómeno se deben tener en cuenta las características de algunos elementos pasivos y activos y como por medio de circuitos RLC se generan estos acoples.

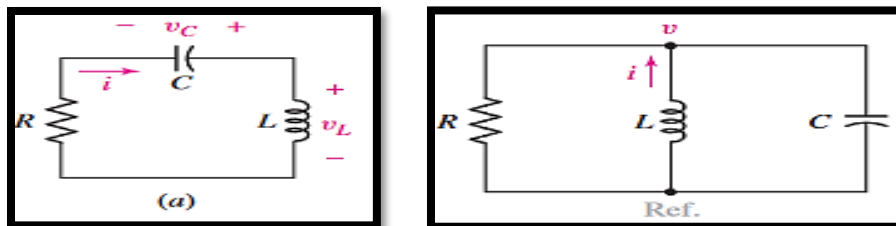
2.6 CIRCUITOS RLC

De acuerdo con Nilsson, James ⁴⁴, los circuitos electrónicos RLC son configuración de conexión entre componentes pasivos, estas conexiones pueden realizarse en serie o en paralelo según James Nilsson, estas se encuentran en gran cantidad de aplicaciones y son usados para sistemas de suspensión de automóviles, controladores de temperatura e incluso la respuesta de un avión a los cambios de posición de los alerones.

Existen dos tipos de circuitos RLC: 1) los que se conectan en serie; 2) los que se conectan en paralelo, según el autor recitado un circuito RLC:

Esta combinación específica de elementos ideales es un modelo razonable para porciones de muchas redes de comunicación. Representa, por ejemplo, una parte importante de ciertos amplificadores electrónicos que se encuentran en los radios, y permite que los amplificadores produzcan una gran amplificación de tensión dentro de una banda angosta de frecuencias de la señal (con casi cero amplificaciones fuera de esta banda)⁴⁵. Véase Ilustración 18a.

Ilustración 18. (a) Circuito RLC en serie. (b) Circuito RLC en paralelo.



Fuente. Nilsson, James W., et al. Circuitos eléctricos. Addison-Wesley. 8va Edición. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2012, p. 321-346.

Ahora, un circuito en RLC en serie (Ver Ilustración 18 a) tendrá sus componentes pasivos conectados en serie, resistencia, condensador y bobina, en donde el condensador y la bobina almacenarán energía, dependiendo la fuente de voltaje que se vaya a aplicar. El estudio de las diferentes respuestas que se pueden obtener mediante la conexión de estos dispositivos se evidencia en el cuadro 8.

Para la ilustración 18b se observa que los elementos tales como bobina resistencia y capacitor se encuentran conectados en serie, por lo cual las ecuaciones características se describen en el cuadro 8.

⁴⁴Nilsson, James W., et al. Circuitos eléctricos. Addison-Wesley Iberoamericana, 1995. 321p

⁴⁵Ibid., p 321.

Cuadro 8. Ecuaciones relevantes de los circuitos RLC sin fuente.

TIPO	CONDICION	CRITERIO	α	ω_0	RESPUESTA
PARALELO	Sobre amortiguado	$a > \omega_0$	$\frac{1}{2RC}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$, donde, $s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega^2}$
SERIE			$\frac{R}{2L}$		
PARALELO	Críticamente Amortiguado	$a = \omega_0$	$\frac{1}{2RC}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$e^{-\alpha t} (A_1 + A_2)$
SERIE			$\frac{R}{2L}$		
PARALELO	Subamortiguado	$a < \omega_0$	$\frac{1}{2RC}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$e^{-\alpha t} (B_1 \cos \omega_d t - B_2 \sin \omega_d t)$, donde, $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$
SERIE			$\frac{R}{2L}$		

Fuente. Nilsson, James W., et al. Circuitos eléctricos. Addison-Wesley. 8va Edición. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2012, p. 347.

Una vez enunciados los circuitos RLC, a continuación, se encuentran las definiciones de los componentes pasivos utilizados en estos circuitos.

Un componente electrónico según Marcos Lorenzo García son dispositivos que hace parte de un circuito electrónico y realiza una función determinada, estos a su vez pueden clasificarse en componentes activos y componentes pasivos. Siendo los componentes activos aquellos que realizan algún tipo de control sobre la corriente que fluye en el circuito electrónico, ahora, los componentes pasivos son los que se interconectan con los elementos activos para que estos funcionen de manera adecuada⁴⁶.

2.6.1 Componentes pasivos.

- Resistencia: es un componente que se opone al flujo de electrones, esta oposición variara teniendo en cuenta material de fabricación y el valor de resistencia que tenga la misma. Existen diferentes tipos de resistencias, tales como variables y fijas, las resistencias fijas siempre tendrán el mismo valor de

⁴⁶ García, Lorenzo, Marcos, et al. Electrónica, RA-MA Editorial, 2014. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=3229512>. P 98.

resistencia a diferencia de las variables las cuales tienen definidos rangos de operación los cuales se pueden cambiar según la necesidad que presente el circuito.

- Condensadores: Son componentes cuya función principal es almacenar energía eléctrica, en donde su fabricación se realiza con dos materiales conductores en paralelo y un material dieléctrico en el medio⁴⁷.
- Bobinas: De igual forma estos componentes pasivos almacenan carga eléctrica, pero estos lo realizan en forma de campo magnético⁴⁸.
- La inductancia de una bobina se presenta en la ecuación 26.

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (26)$$

Donde:

- I es el flujo eléctrico ($N \cdot m^2/C$).
- Φ es el flujo Magnético. (Wb).

Con la teoría descrita a continuación, en la actualidad con los diferentes softwares de simulación para el diseño de antenas se puede evidenciar el comportamiento que tendrá la antena en diferentes ambientes de simulación, los cuales pueden generar y evidenciar el comportamiento del campo eléctrico y magnético en determinada superficie. Para realizar estas simulaciones, los softwares utilizan diferentes métodos los cuales serán descritos a continuación.

Actualmente existen diferentes softwares electromagnéticos los cuales permiten simular la antena Microstrip teniendo en cuenta los parámetros generados para esta antena con el circuito RLC diseñado, los diferentes softwares de simulación existentes realizan diferentes métodos de análisis descritos a continuación.

2.7 MÉTODOS DE SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO

Para realizar el diseño y simulación de esta antena Microstrip, actualmente existen varios softwares especializados los cuales resuelven las ecuaciones de Maxwell, y esto lo realizan bajo varios métodos matemáticos, tales como:

⁴⁷ Ibid., p 105.

⁴⁸ Ibid., p 114.

2.7.1 Método de momentos.

Según lo indica el autor Ernesto Ávila

Este método resuelve la ecuación integral de potencia mixta realizando una discretización del problema a simular. Existen dos variantes de este método, una en el dominio espacial y otra en el frecuencial. Esta segunda variante es la más utilizada, ya que requiere menor carga computacional y permite obtener las principales características del elemento a simular en un rango de frecuencias determinado⁴⁹.

Método Diferencias finitas en el dominio del tiempo este método resuelve las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo realizando una discretización temporal de las mismas, de forma que se obtienen ecuaciones en diferencias finitas. Para ello, realiza previamente una discretización espacial del problema en celdas rectangulares, siendo ésta la principal limitación del método FDTD.⁵⁰

Para el diseño y simulación de antenas, existen varios softwares de simulación electromagnética, que utilizan los métodos matemáticos descritos anteriormente y que me permiten evidenciar el patrón de radiación generado en tejidos humados según el tipo de antena. A continuación, se describen algunos:

2.7.2 ANSYS HFSS. Este simulador tiene características de trabajo amigables y comprensibles, en el, un usuario no solo podría simular y diseñar una antena, también este poderoso software describirá las características del comportamiento de las antenas. HFSS dispone de una discretización espacial que realiza de forma automática y muy precisa, y obtiene los resultados en un rango frecuencial determinado por el usuario.⁵¹

El uso de este software requiere exigencias en cuanto al nivel de procesamiento del equipo de cómputo que se utilice para su uso, estas exigencias físicas se describen con más detalle a continuación. Ver cuadro 9.

2.7.3 FEKO. Altair FEKO es un software que permite realizar simulaciones de radiación en el campo eléctrico y magnético de diferentes tipos de antenas. Ver cuadro 7.

⁴⁹ Navarro, Ernesto Ávila. Diseño, modelado, fabricación y medida de antenas impresas para comunicaciones inalámbricas. tesis Doctoral. Elche., Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales, Universidad Miguel Hernández de Elche., 2008. 11 p.

⁵⁰ Ibid., p.12

⁵¹ Ibid., p.13

De acuerdo con el desarrollador del software⁵², la amplia gama de tecnologías de solver de FEKO lo hace ideal para resolver una gama de diferentes tipos de antenas. Por ejemplo, el solucionador de MoM es adecuado para resolver antenas metálicas, mientras que el método FDTD es una mejor opción para antenas de banda ancha o multibanda. Tipos de antenas típicas que incluyen antenas de alambre, Microstrip antenas, antenas de bocina y apertura con lentes, antenas de banda ancha y multibanda, diseños MIMO para comunicaciones inalámbricas, reflectores, matrices en fase y antenas conformes.

2.7.4 ADS.

Según su fabricante Advanced Design System⁵³, es el software de automatización de diseño electrónico líder en el mundo para RF, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad. ADS es pionero en las tecnologías de simulación térmica 3DEM-circuito integrado más innovadoras y potentes que utilizan las empresas líderes en las industrias de redes inalámbricas, redes de alta velocidad, defensa aeroespacial, automoción y energías alternativas. ADS proporciona un entorno de simulación y verificación integrado para diseñar hardware de alto rendimiento que cumpla con los últimos estándares inalámbricos, de alta velocidad, digitales y militares, y para 5G, IoT, enlace de datos de varios gigabits, radar, satélite y modo de conmutación de alta velocidad.

Los softwares mencionados anteriormente permiten generar resultados de patrones de radiación en diseños CAD, adicional a ello estos también generan tablas con la cantidad de nivel S.A.R evidenciado en estos modelos. Ver cuadro 9.

⁵² Altair Hyperworks, Antenna Design. {En línea}. [citado el 29 de marzo de 2019]. Disponible en internet: (https://www.terabyte.co.jp/Hyper/supprt_platform.pdf).

⁵³ KEYSIGHT TECHNOLOGIES, Advance Design System. {En línea}. [citado el 29 de marzo de 2019] Disponible en internet (<https://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system>)

Cuadro 9. Requisitos mínimos de ANSYS y FEKO

	SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE AMBIENTES ELECTROMAGNETICOS		
	FEKO REQUISITOS HARDWARE	ANSYS REQUISITOS HARDWARE	ADS REQUISITOS HARDWARE
Procesador	Intel Core 2 Duo o AMD Athlon X2 CPU o superior	1-2 CPU, 4-12 núcleos	64-bit CPU
Memoria RAM	4 GB	16GB RAM (mínimo), 64GB+ recomendado	8 GB RAM o superior.
Memoria Interna	1TB	2TB	20 GB libres
Tarjeta Grafica	OpenGL 3D acelerador grafico compatible with OpenGL 3.2	Si	Si
Sistema operativo	Windows 7/10/SUSE Linux	Windows 7/10 o RedHat/SUSE Linux	Windows 7/10/SUSE Linux

Fuente. El Autor

Como se mencionó en el capítulo 1, el creciente uso de dispositivos electrónicos cerca o alrededor del cuerpo generó gran preocupación a La Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante generó estudios en donde alertaban el crecimiento de tipos de cáncer cerebral. Debido a lo anterior, en la actualidad existe un parámetro que deben tener en cuenta los fabricantes de dispositivos electrónicos para prevenir posibles afectaciones en la salud del ser humano.

A continuación, como se evidencia en el cuadro 10, se observan las frecuencias mínimas y máximas a la que pueden ser expuesto la cabeza el tronco respecto a la cantidad S.A.R que generan estas en el cuerpo del hombre.

Según el autor David Seabury⁵⁴, indica que es una medida electromagnética absorbida por tejido biológico, sus unidades son vatios por Kilogramo (W/Kg) Ver ecuación 27, esta se usa comúnmente para evidenciar que cantidad de energía que absorbe el cuerpo humano cuando se usa un teléfono celular.

$$SAR = \left(\frac{\sigma |E^2|}{\rho} \right) \quad (27)$$

Donde:

- σ es conductividad del tejido (S/m).
- ρ Es densidad de masa del tejido (Kg/m^3).
- E Es fuerza de campo eléctrico RMS (V/m).

⁵⁴ Seabury, David. "An update on SAR standards and the basic requirements for SAR assessment." Feature Article, Conformity (2005): p 1

Cuadro 10. Límites básicos de la ICNIRP

Tipo de Exposición	Gama de Frecuencias	Densidad de corriente en la cabeza y el tronco	SAR media en todo el cuerpo (mA/m^2)	SAR localizada Cabeza y tronco (W/Kg)	SAR localizada extremidades (W/Kg)
Ocupacional	Hasta 1 Hz	40	--	--	--
	1 - 4 Hz	40/f	--	--	--
	4 Hz - 1 KHz	10	--	--	--
	1 - 100 KHz	f/100	--	--	--
	100 KHz - 10 MHz	f/100	--	--	--
	10 MHz - 10 GHz	--	0,4	10	20
Publico General	Hasta 1 Hz	8	0,4	10	20
	1 - 4 Hz	8/f	--	--	--
	4 Hz - 1 KHz	2	--	--	--
	1 - 100 KHz	f/500	--	--	--
	100 KHz - 10 MHz	f/500	0,8	0,2	4
	10 MHz - 10 GHz	--	0,8	0,2	4

Fuente. El Autor

Algunas observaciones cuadro 10:

- f es la frecuencia (Hz)
- Debido a la no homogeneidad del cuerpo eléctrica del cuerpo, las densidades de corriente deben promediarse en la sección de corte de 1 cm^2 perpendicular a la dirección de la corriente.
- Todos los valores SAR deben promediarse en cualquier periodo de 6 minutos.
- La masa de premediación del SAR localizada es cualquiera 10 g de tejido contiguo; la máxima SAR así obtenida debe ser el valor utilizada para estimación de la exposición.

Es importante mencionar que el tipo de exposición ocupacional se refiere a situaciones en que las personas están expuestas como consecuencia del lugar donde laboran y en donde estas mismas personas han sido advertidas sobre el potencial de exposición, también se le llama exposición ocupacional cuando esta es de naturaleza transitoria de acuerdo a la Union Internacional de Telecomunicaciones⁵⁵, es decir se presenta cuando un individuo transita por un

⁵⁵ Op. cit., p 2.

lugar determinado que exceda los límites y estos puedan ser mayor a los límites no controlados.

Adicional a lo mencionado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la comisión federal de comunicaciones (CFF)⁵⁶ menciona que el uso de dispositivos electrónicos, la radiación que sea absorbida por tejidos humanos debe estar en rangos de 0 a 1.6 W/Kg para el cuerpo y 0.628W/Kg para la cabeza humana.

En la actualidad el espectro electromagnético se encuentra dispuesto por muchas frecuencias que permiten la transmisión y recepción de información de diferentes sistemas de telecomunicaciones, también por este medio se encuentran la radiación que generan diferentes fenómenos naturales, dichas radiaciones pueden ser clasificadas como se evidencia a continuación.

De acuerdo con Aníbal Aguirre las radiaciones no ionizantes (RNI) puesto que la energía fotónica asociada a estas radiaciones es diez a millones de veces menor que la necesaria para romper un enlace molecular (decenas de electrón-Volts) o “arrancar” el electrón más débil de un átomo y así dar lugar a la formación de un ion; de ser éste el caso estaríamos frente a una “Radiación Ionizante”⁵⁷.

En gran medida el uso diario de radiaciones no ionizantes preocupa diferentes tipos de comunidades, por la gran cantidad de fuentes que generan radiación, la exposición diaria en entornos abiertos y cerrados en donde la piel está expuesta a estas radiaciones, con ello es importante conocer los tipos de tejidos que están presentes y como por medio de simulación se puede evidenciar la posible cantidad de radiación absorbida por la piel.

De acuerdo con lo anterior se consideran los tipos de tejidos del ser humano, el instituto iberoamericano de cosmetología establece 4 tipos de tejidos biológico los cuales se caracterizan y se comportan de la siguiente manera:

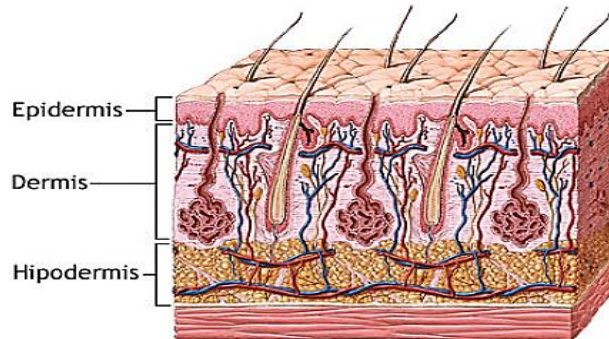
- Tejido Epitelial: los tejidos de este tipo protegen el medio interno, regulan el intercambio de materiales, producen o secretan productos químicos. Están caracterizado por células estrechamente adheridas. Se encuentra en todo el cuerpo tanto (dermis, epidermis). También produce algunas superficies tales como pelo, dientes uñas entre otros⁵⁸. Ver Ilustración 19.

⁵⁶ Federal Communications Commission. Specific Absorption Rate (SAR) for Cellular Telephones. {En línea}. [citado el 29 de marzo de 2019] Disponible en internet (<https://www.fcc.gov/general/specific-absorption-rate-sar-cellular-telephones>).

⁵⁷ Aguirre, Aníbal. "introducción al problema de las radiaciones no ionizantes provenientes del sistema de telefonía móvil. p 24.

⁵⁸ Rigutti, Adriana. Atlas ilustrado de anatomía. Susaeta Ediciones, (2002): p 26.

Ilustración 19. Tejido epitelial dermis y epidermis.



Fuente. Instituto Iberoamericano de cosmetología y SPA “Constitución Epidermis, Dermis, Hipodermis y Anexos”. Consultado el 18 de mayo de 2019 06:30 p.m.) en línea <http://www.cosmetologiayspa.com/constitucion-epidermis-dermis-hipodermis-y-anexos/>.

Existen 3 tipos de tejidos que se describen brevemente a continuación:

- Tejido nervioso: está formado por celular excitables, especializadas en estímulos o impulsos nerviosos gracias a una serie muy compleja de actividades fisicoquímicas de su membrana⁵⁹.
- Tejido Muscular: está formado por células elásticas y tiene funciones de movimiento y sostén Haces de tejido muscular se envuelven las cavidades digestivas, se entrelazan con los huesos y a los pelos.
- Tejido Conjuntivo: es un tejido en que las células se encuentran inmersas en abundante sustancia intermolecular amorfa, constituida principalmente por agua y proteínas.

Es importante mencionar que el tejido donde se realizará el estudio sobre el patrón de radiación será el tejido epitelial ya que comprende la dermis y epidermis del cuerpo humano.

2.8 MARCO LEGAL

La Unión Internacional de Telecomunicaciones⁶⁰(UIT) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). El Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T) es un órgano permanente de la UIT.

⁵⁹ Ibid., p 28.

⁶⁰ ITU-T K.52 - SERIES K: protection against interference, 2018, p. 2 disponible en (<https://www.itu.int/rec/t-rec-k.52-201801-i/en>)

La UIT-T es responsable de estudiar las cuestiones técnicas, operativas y arancelarias y de emitir recomendaciones sobre ellas con miras a estandarizar las telecomunicaciones a nivel mundial.

Una de las recomendaciones⁶¹ que realiza este órgano a las comunidades en el mundo, son las diferentes técnicas y procedimientos en donde se evalúa la gravedad de la exposición de campos eléctricos magnéticos y electromagnéticos en el cuerpo humano con rangos de frecuencia de 9KHz hasta los 300GHz estos datos fueron publicados por la comisión internacional sobre la protección contra radiaciones no ionizantes.

Colombia también tiene un organismo (ANE) que se encarga de gestionar y administrar y controlar el uso del espectro electromagnético, este organismo perteneciente al gobierno colombiano acoge las recomendaciones que generan la UIT.

La agencia nacional del espectro y la unión internacional de telecomunicaciones tienen relación directa con las comunicaciones inalámbricas y el uso del espectro radio eléctrico, a continuación, se describen las bandas de frecuencias que se establecen en el territorio nacional. A nivel nacional la ANE (Agencia Nacional del Espectro), genero consideraciones referentes al espectro en Colombia, en donde indican el potencial de la red 5G en el país y la posibilidad del desarrollo que la 5ta generación móvil podría generar con el internet de las cosas IoT. La Agencia Nacional del Espectro divide el espectro en tres bandas para el desarrollo de las tecnologías mencionadas anteriormente, las cuales son:

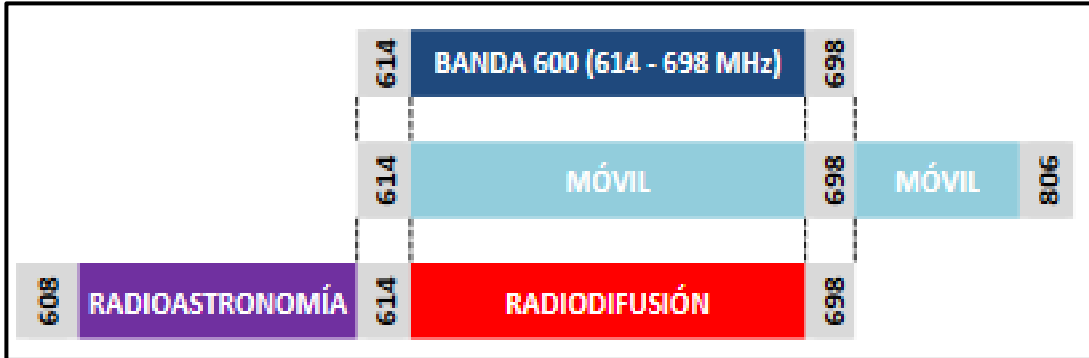
- Bandas Bajas
- Bandas Medias
- Bandas Altas

Bandas bajas: Esta clasificación del espectro contempla frecuencias de operación menores a 1GHz en las bandas 600MHz y 700MHz, en donde su uso será destinado para Radio difusión y servicio móvil⁶². Ver Ilustración 20.

⁶¹ Ibid., p 1.

⁶² Agencia Nacional del Espectro, "Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia". {En línea} {22 de abril del 2019}. Disponible en: (<http://www.evaluamos.com/pdf/ConsultaPublica5GxANE.pdf>)

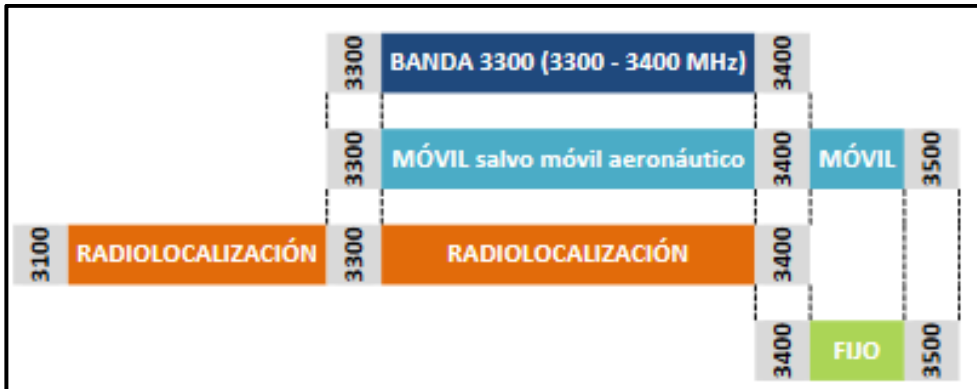
Ilustración 20. Atribución banda 600MHz en Colombia



Fuente. Agencia Nacional del Espectro, "Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia". {En línea} {22 de abril del 2019}. Recuperado de (<http://www.evaluamos.com/pdf/ConsultaPublica5GxANE.pdf>).

Bandas Medias: La clasificación de esta contempla frecuencias en el rango de 1 a 6 GHz, en esta banda se considera el despliegue inicial de la tecnología 5G. Ver Ilustración 21.

Ilustración 21. Atribución banda 600MHz en Colombia



Fuente. Agencia Nacional del Espectro, "Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia". {En línea} {22 de abril del 2019}. Recuperado de (<http://www.evaluamos.com/pdf/ConsultaPublica5GxANE.pdf>).

Bandas Altas: Esta clasificación comprende rangos de frecuencia mayores a 6 GHz. En donde las aplicaciones destinadas serán aquellas que contemplen anchos de banda entre estas frecuencias y bajas latencias.

3. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología que se utilizara para el desarrollo del trabajo de grado. Véase ilustración 22.

Ilustración 22. Diseño metodológico



Fuente. El Autor

Etapa 1 Diseño antena Microstrip

- Leer las recomendaciones de radiación generadas por la UIT.
- Generar una ecuación de búsqueda que permita encontrar las tendencias de diseño de antenas Microstrip de super altas frecuencias de operación. Teniendo en cuenta periodos de tiempo de 5 años en las bases de datos de la Universidad católica de Colombia e IEEE Xplore.
- Analizar la información consultada con las herramientas de vigilancia tecnológica teniendo en cuenta, palabras clave, autores, numero de citas y años de publicación.
- Definir y calcular las variables eléctricas y de diseño de la antena Microstrip para una frecuencia de operación de rango de 3.5 GHz a 6 GHz.
- Validar las variables eléctricas y de diseño generadas previamente para plantear la línea de transmisión de la antena Microstrip proyectada.

Etapa 2 Simulación antena Microstrip.

- Seleccionar la herramienta de simulación de Ambiente electromagnético (ej. ANSYS HFSS y FEKO) más adecuada, según las variables eléctricas y diseño de la antena Microstrip de la etapa 1.
- Incluir los parámetros de diseño en el ambiente de simulación seleccionada para la antena Microstrip.
- Analizar los datos generados por el software de simulación electromagnético (ej. patrón de radiación, coeficiente de reflexión, impedancia característica y atenuación) de la antena Microstrip en la frecuencia de operación de 3.5 GHz a 6 GHz.

Etapa 3. Validación de los resultados

- Realizar el Modelo de la piel que represente el tejido humano comprendido entre dermis y epidermis de un adulto promedio.
- Exportar del modelo CAD al software de simulación escogido en la etapa 2.
- Generar y validar el patrón de radiación de la antena Microstrip sobre el tejido humano según la tasa de absorción específica presentada en la Ilustración 25.
- Generar pruebas de radiación con las antenas finales.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1 DISEÑO ANTENA MICROSTRIP

Diariamente se generan miles de nuevas conexiones inalámbricas, dichas conexiones están relacionadas directamente con el uso de antenas Microstrip utilizadas por teléfonos móviles o demás dispositivos de comunicación existentes, por lo que según la Unión internacional de Telecomunicaciones los fabricantes de estos tipos de tecnología deben seguir una serie de recomendaciones para mitigar factores que puedan alterar o generar afectaciones en la salud de los seres humanos. Ver Anexo 2.

Para ello, disponen de diferentes recomendaciones, una de ellas UIT K-52⁶³ en donde indican los métodos de seguridad que se deben tener en cuenta cuando existe una exposición de cuerpos humanos a campos electromagnéticos de 9 KHz a 300 GHz. Es importante mencionar que la recomendación descrita anteriormente no está enfocada en la exposición al uso de la corriente ni el uso de teléfonos celulares u otros dispositivos radiantes donde su uso se realice cerca al cuerpo humano.

Siendo así la UIT realiza las siguientes recomendaciones relacionadas con los siguientes factores, límites básicos y derivados, tiempos promedio de uso, límites de exposición de bajas y altas frecuencias.

Para expresar los límites básicos al cual una persona puede estar expuesta a campos electromagnéticos, se expresa mediante la tasa de absorción específica (S.A.R.). Dicho esto, la tasa de absorción específica evidencia la cantidad de penetración de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano el S.A.R; está directamente relacionado con la altura, masa y frecuencia de la persona que se encuentre expuesta a la radiación recibida por los diferentes tipos de antenas de que existen actualmente.

Según la UIT⁶⁴ existen dos tipos de radiación que pueden dar tales como (radiación ionizante y no ionizante), las de uso ocupacional en donde la radiación recibida es ocasionada por que la persona labora diariamente con este tipo de fuente, los límites básicos de absorción son de 0.4 W/Kg y es para el público en general es de 4 W/Kg.

Sin embargo, la comisión federal de comunicaciones también realiza a los fabricantes de dispositivos electrónicos y público en general los límites permitidos del S.A.R sobre el cuerpo humano, los cuales deben estar en el rango de 0 a 1.6 W/Kg.

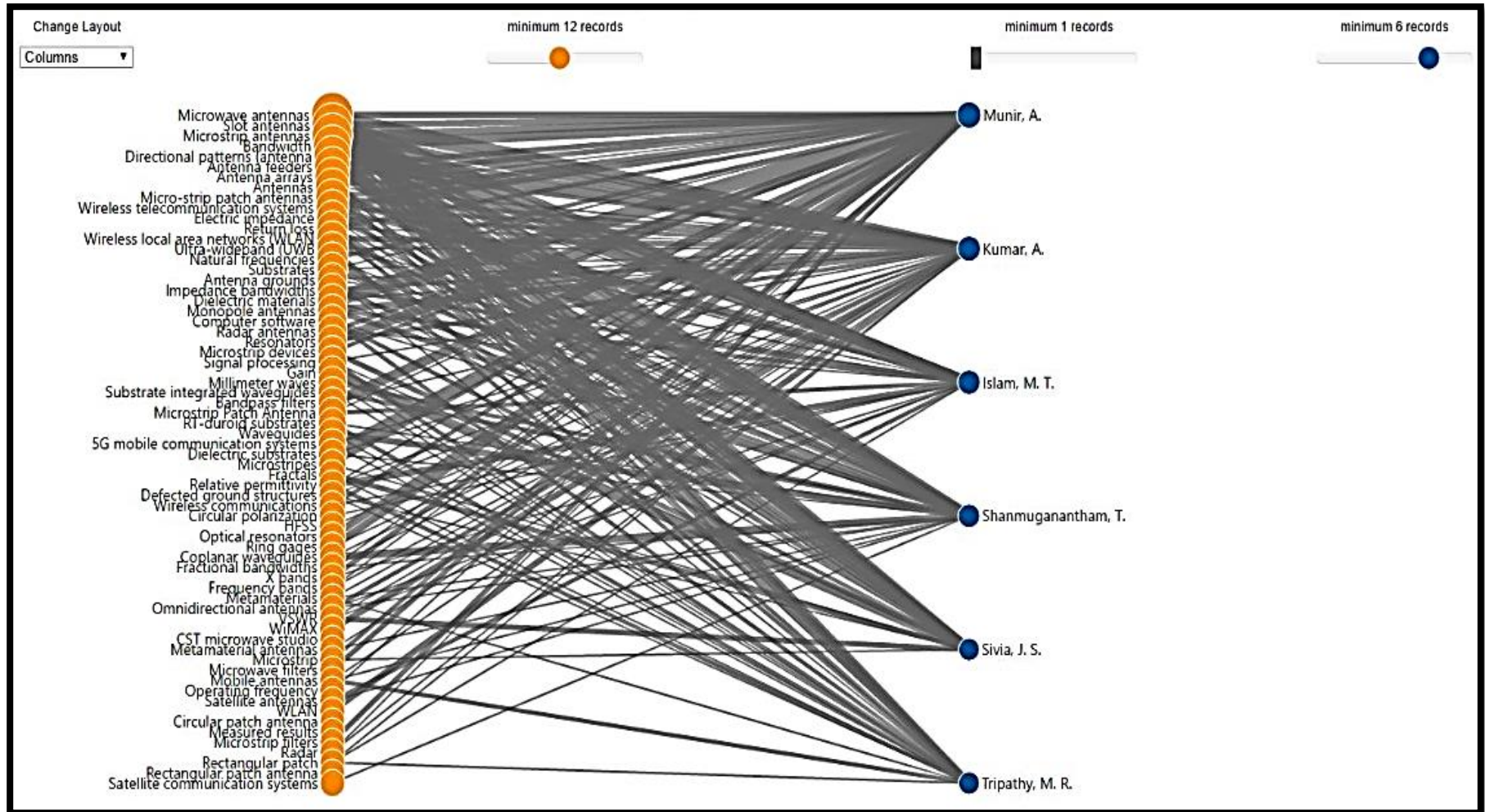
⁶³ ITU-T K.52 - SERIES K: protection against interference, 2018, p. 2 disponible en (<https://www.itu.int/rec/t-rec-k.52-201801-i/en>)

⁶⁴ Op. cit., p 2.

Por otro lado, en la ilustración 24 se pueden evidenciar las diferentes características del diseño de la antena Microstrip, respectivamente los círculos naranjas representan las palabras claves y enfrente de estas se evidencian los autores. Se utilizaron tres tipos de filtros los cuales se encuentran en la parte superior de la misma ilustración, en el filtro superior naranja se pueden validar el número de palabras claves con un mínimo de 12 apariciones, de igual forma para el filtro azul se observa un filtro de mínimo 6 apariciones con un valor de correlación de 1.

En donde se puede establecer las geometrías más utilizadas tales como rectangular y circular, sustratos de fabricación RT Duroid y FR4 por último el software de simulación utilizado mayoritariamente fue ANSYS HFSS.

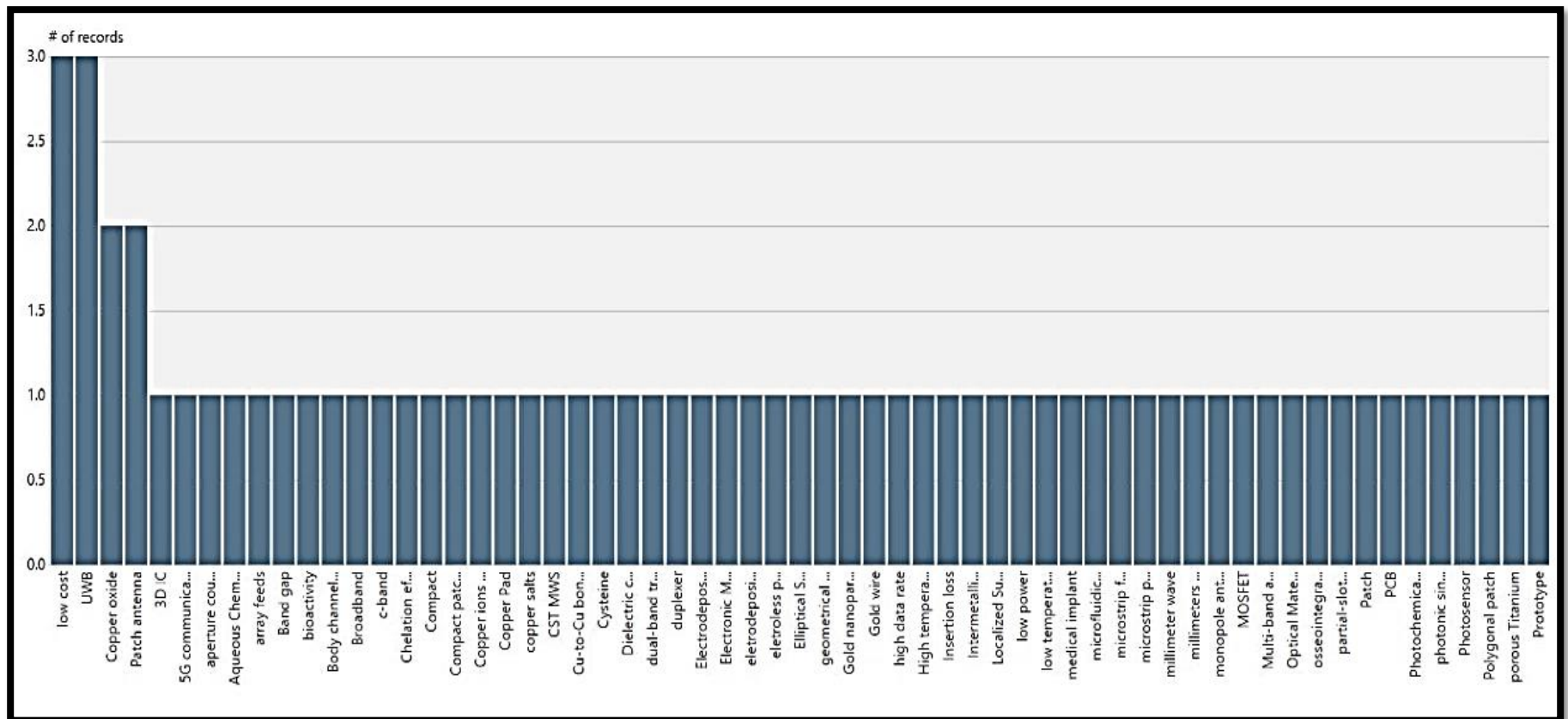
Ilustración 24. Matriz de palabras claves versus autores



Fuente. El autor

Respectivamente se puede evidenciar en la ilustración 25 el diagrama de barras de las Keywords en donde las palabras más utilizadas fueron oxido de cobre, en cuanto a frecuencias de operación la que presento mayor número de apariciones fue banda C, adicional a ello se puede encontrar en la misma ilustración los materiales de fabricación para este tipo de antenas fueron cobre y oro.

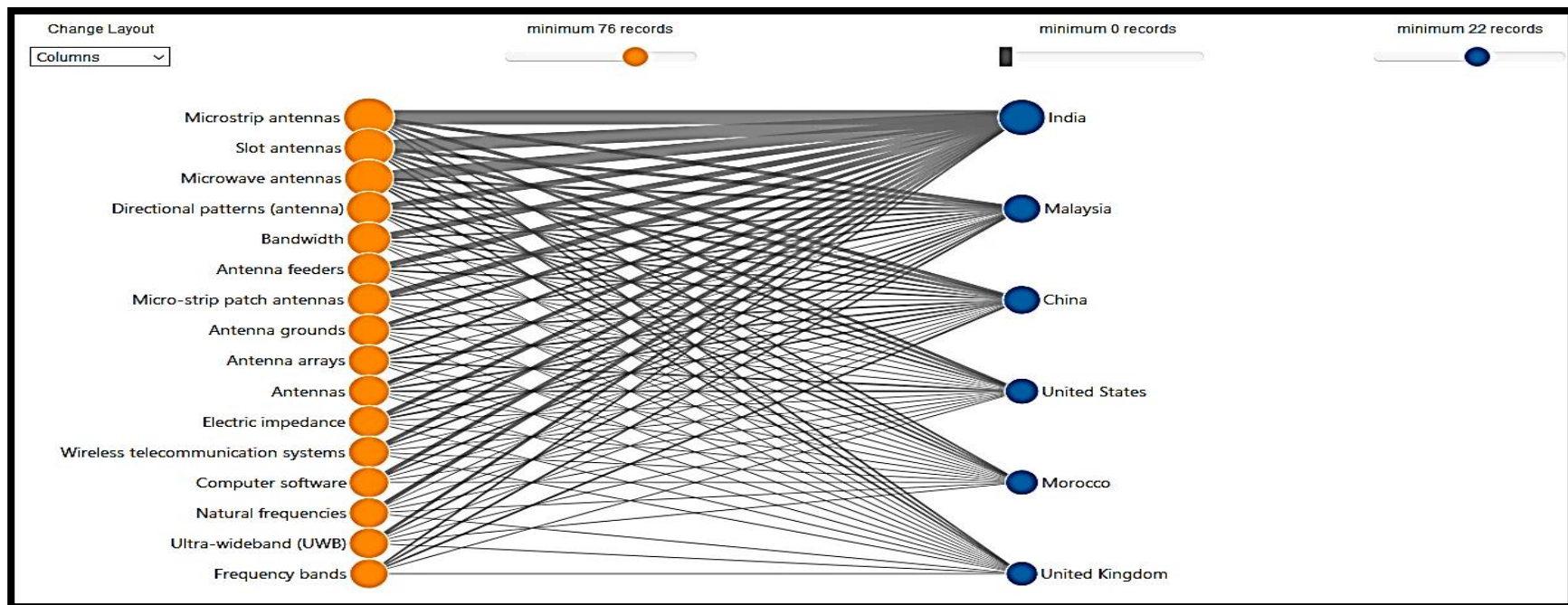
Ilustración 25. Ilustración. Diagrama de barras Keywords



Fuente. El Autor

En la ilustración 26 se visualiza la matriz generada entre palabras claves y países, es decir el círculo naranja representa las palabras claves con mínimo 76 apariciones en las ciudades que aparecen al lado derecho de color azul, las palabras claves con mayor número de publicaciones en países como India, Malaysia, China, Estados Unidos fueron: Antena Microstrip, antena de ranura, antenas microondas, patrón direccional, banda ancha, alimentación antena, arreglo de antena, entre otros.

Ilustración 26. Matriz por palabras claves por países de publicación.



Fuente. El Autor

Teniendo en cuenta el análisis anteriormente realizado, se evidencio que al autor con mayor número de publicaciones fue Munir, A. Quien publicó un total de 22 artículos en un periodo de tiempo del 2015 al 2019, este análisis permitió encontrar las características de la antena Microstrip para su respectivo diseño, entre los cuales se tienen geometrías de antenas Microstrip tales como (rectangular y circular).

Por otro lado, se evidenció que los autores con mayor número de publicaciones realizaron el diseño y simulación de las geometrías anteriormente descritas en donde mayoritariamente el sustrato de fabricación fue (RT Duroid y FR4), por otro lado, de acuerdo a la corporación Rogers los materiales de circuito de alta frecuencia RO3000® son compuestos de PTFE rellenos de cerámica destinados para uso en aplicaciones comerciales de microondas y RF. Esta familia de productos es diseñada para ofrecer una estabilidad eléctrica y mecánica excepcional a precios competitivos.⁶⁵

4.3 SELECCIÓN Y CALCULO PARÁMETROS DE DISEÑO

Las propiedades más importantes para este tipo de antenas son las líneas de transmisión que conforman una Microstrip y a su vez en cuanto a diseño se refiere, son la impedancia característica y la velocidad de propagación las características a tener en cuenta dentro de la selección. Es importante mencionar que al no ser contenida la propagación de la energía en la microstrip y en el sustrato y al existir dos dieléctricos (aire y sustrato), los modos propagados son híbridos.

Por otro lado, las dimensiones del parche radiador (W , L ; en el caso de ser rectangular o a ; para un circular) estarán determinadas por la frecuencia de resonancia, la permitividad dieléctrica, el espesor h del sustrato y la geometría del radiador. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante generar una lista de factores de rendimiento relevantes de antenas microstrip la cual permite cualitativamente seleccionar las mejores condiciones para el diseño de este tipo de antena⁶⁶. Ver cuadro 11.

⁶⁵CORPORATION ROGERS, RO3003. {En línea}. {30 de noviembre de 2019}. Disponible en internet: (<https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ro3000-laminate-data-sheet-ro3003----ro3006----ro3010----ro3035.pdf>).

⁶⁶ Nuñez, Karen Nallely Olan. Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas. Diss. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2019.

Cuadro 11. Lista de factores de rendimiento de antenas para diseñadores

Acoplamiento (Matching)	Terminal de entrada acoplada a la fuente de alimentación. ($Z_{in} = Z_s$) y está relacionado con las pérdidas por retorno S_{11} .
Lóbulo principal	Ganancia de la antena y propiedades del ancho de haz.
Eficiencia de radiación	Relación entre la potencia radiada u la potencia en la entrada.
Eficiencia de apertura	Relacionada con la distribución de los radiadores, ganancia y patrones característicos.
Ancho de banda	Rangos de frecuencias sobre el cual los parámetros anteriores satisfacen las especificaciones basadas en características de impedancia en la terminal de entrada.
Requerimientos físicos	Tamaño peso, costo, dependientes de la aplicación.
Radiación espuria	Existente en la mayoría de los tipos de antena, es dependiente de la tecnología, el desacoplamiento y las discontinuidades.

Fuente. Op. cit., p 61.

Con las diferentes características mencionadas en los párrafos anteriores, cuadro 11 y teniendo en cuenta las ilustraciones 23, 24, 25, los parámetros que se tendrán en cuenta para el diseño y simulación de la antena Microstrip contemplarán geometrías rectangular y circular, con sustratos de fabricación como FR4, RT Duroid en donde la frecuencia de operación será 3.5 GHz, 4.5 GHz y 6 GHz y a su vez el material conductor será cobre y oro. Ver cuadro 12.

Cuadro 12. Características antena Microstrip

Geometría	Frecuencia GHz	Sustrato de Fabricación	Permitividad Eléctrica ϵ_r	Material Sustrato
Rectangular	3.5	Rogers RO3003	3	Cobre
Rectangular	3.5	FR4	4.4	Oro
Rectangular	4.5	Rogers RO3003	3	Cobre
Rectangular	4.5	FR4	4.4	Oro
Rectangular	6.0	Rogers RO3003	3	Cobre
Rectangular	6.0	FR4	4.4	Oro
Circular	3.5	Rogers RO3003	3	Cobre
Circular	3.5	FR4	4.4	Oro
Circular	4.5	Rogers RO3003	3	Cobre
Circular	4.5	FR4	4.4	Oro
Circular	6.0	Rogers RO3003	3	Cobre
Circular	6.0	FR4	4.4	Oro

Fuente. El Autor

4.3.1 Cálculos diseño antena Microstrip Rectangular. Partiendo de la información analizada anteriormente, a continuación, se propone el diseño de una antena Microstrip con parámetros de diseño tales como geometría rectangular, frecuencia de operación de 3.5 GHz, sustrato de fabricación FR4 con constante dieléctrico de 4,4 y un material conductor cobre, por consiguiente, se pueden evidenciar los cálculos realizados para obtener las dimensiones del parche de antena.

Continuando con el respectivo cálculo los parámetros que involucran la geometría de la antena propuesta y teniendo en cuenta las ecuaciones 13, 14, 15, 16 dichos cálculos corresponden al ancho, permitividad eléctrica efectiva, longitud efectiva y por último la longitud que tendrá el parche, considerando la velocidad de la luz.

El paso siguiente será calcular el ancho respectivo del diseño de la antena Microstrip rectangular, teniendo en cuenta las características como la velocidad de la luz en el vacío y la permitividad del sustrato, Ver ecuación 12.

$$W = \frac{30}{2(3.5)} \times \sqrt{\frac{2}{4.4+1}} = 2.6082 \text{ cm}$$

Posterior a ello, se calculó la permitividad efectiva en donde se tuvieron en cuenta parámetros como permitividad del sustrato de fabricación y el ancho del sustrato dieléctrico, Ver ecuación 13.

$$E_{eff} = \frac{4.4+1}{2} + \frac{4.4-1}{2} \times \left[1 + 12 \frac{0.1588}{2.6082} \right]^{-1/2} = 3.9923$$

Continuando con el análisis se procede a determinar la longitud efectiva del parche rectangular, Ver ecuación 14.

$$\Delta L = (0.1588)0.412 \times \frac{(3.9923+0.3) \times \left(\frac{2.6082}{0.1588} + 0.264 \right)}{(3.9923-0.258) \times \left(\frac{2.6082}{0.1588} + 0.8 \right)} = 0.0729 \text{ cm}$$

Por último, se obtiene el largo que contendrá el diseño de la antena Microstrip final. Ver ecuación 15.

$$L = \frac{30}{2(3.5)(\sqrt{3.9923})} - 2(0.0729) = 2.14 \text{ cm}$$

Una vez calculados los parámetros del parche rectangular se procede a calcular el ancho y largo de la línea de transmisión que alimentara el parche rectangular. Inicialmente se realiza el cálculo de la variable “W/d” donde “d” es el ancho del sustrato, para calcular W se deben considerar las ecuaciones 19 y 20.

$$A = \frac{50}{60} \times \sqrt{\frac{4.4+1}{2}} + \frac{4.4-1}{2} \times \left(0.23 + \frac{0.11}{4.4}\right) = 1.5299$$

$$B = \frac{377\pi}{2 \times 50 \times 4.4} = 6.8380$$

Las variables A y B se encuentran descritas en el capítulo antena Microstrip página 40. Para continuar con el cálculo de la longitud y ancho de la línea de transmisión, se supone la razón $W/d < 2$ y se soluciona la ecuación 21, de no ser correcto se debe solucionar la ecuación 22.

$$\frac{Wl}{d} < 2 = \frac{8e^{1.5299}}{e^{2(1.5299)} - 2} = 1.9119$$

Como se puede evidenciar el resultado obtenido es (menor) < 2 , por consiguiente, continuamos con el cálculo de largo de la línea de transmisión, para lo cual se realiza el cálculo de la constante efectiva dieléctrica de la línea de transmisión donde d es el grosor del sustrato 0.127 cm^{67} . Ver la ecuación 23.

$$\epsilon_{\epsilon} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 \times 0.1588}{0.2975}}} = 3.3302$$

Posterior a ello, se realiza el cálculo de las ecuaciones 24 y 25 respectivamente. En donde se puede evidenciar que el resultado final se encuentra en metros.

$$K_0 = \frac{2 \times \pi \times 3.5 \times 10^9}{3 \times 10^8} = 73.30 \text{ m}^{-1}$$

⁶⁷ CORPORATION ROGERS, RO3003. {En línea}. {30 de noviembre de 2019}. Disponible en internet: (<https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ro3000-laminate-data-sheet-ro3003----ro3006----ro3010----ro3035.pdf>).

Para la longitud de la línea final se tiene en cuenta una fase de 90°, con ello se obtiene la longitud de la línea de transmisión.

$$l = \frac{90^\circ \times \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right)}{\sqrt{\epsilon_\epsilon} \times K_0} = 1.99 \text{ cm}$$

A continuación, se puede evidenciar el ancho y el largo respectivo del parche rectangular calculado, adicional a ello el largo y ancho de la línea de transmisión. Ver cuadro 12.

4.3.2 Cálculos diseño antena Microstrip Circular. Partiendo de la información analizada anteriormente y consignada en el cuadro 11, se propone el diseño de una antena Microstrip con parámetros de diseño tales como geometría circular, frecuencia de operación de 3.5 GHz, sustrato de fabricación Rogers con constante dieléctrica de 3 y un material conductor cobre. Respectivamente el cálculo y desarrollo para la variable F se evidencia en la siguiente ecuación 10.

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{3.5 \times 10^9 \times \sqrt{3}} = 1.4501$$

Por otro lado, el radio correspondiente al diseño de la antena Microstrip circular se evidencia en la siguiente ecuación 11.

$$a = \frac{1.6918}{\left\{1 + \frac{2(0.1558)}{\pi \times 3 \times 1.4501} \left[\ln \left[\frac{\pi \times 1.4501}{2(0.1558)} \right] + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} = 1.3817 \text{ cm}$$

Para el cálculo del ancho (W), largo (L) y el radio (a) de las diferentes variables que se describieron en el cuadro 9 tales como sustrato de fabricación, permitividad eléctrica y material del sustrato, para esto se realizó el cálculo y se completó el cuadro 12 descrito a continuación.

Teniendo en cuenta los parámetros del cuadro 12, se realizó el cálculo de las diferentes dimensiones que tendrán respectivamente el largo, ancho y el radio de la geometría rectangular y circular con el rango de frecuencias evidenciadas en el mismo cuadro, para ello los cálculos realizados fueron solucionados mediante las ecuaciones del capítulo anterior, los resultados se evidencian en el cuadro 13.

Es importante mencionar que los cálculos realizado se generaron en MATLAB versión 2016B, adicional a ello los cálculos pueden evidenciarse en el Anexo 3.

Cuadro 13. Variables calculadas antenas Microstrip

Geometría	Frecuencia GHz	ϵ_r	a cm	W cm	L cm	Wl cm	l cm
Rectangular	3.5	3	*	3,03	2.41	0.3992	1,3786
Rectangular	3.5	4.4	*	2.60	1.99	0.3036	1,1742
Rectangular	4.5	3	*	2.35	1.85	0.3992	1,0722
Rectangular	4.5	4.4	*	2.02	1.53	0.3036	0,9133
Rectangular	6.0	3	*	1.76	1.36	0.3911	0,8042
Rectangular	6.0	4.4	*	1.52	1.13	0.3036	0,6850
Circular	3.5	3	1.3817	*	*	0.3992	1,3786
Circular	3.5	4.4	1.1521	*	*	0.3036	1,1742
Circular	4.5	3	1.0642	*	*	0.3992	1,0722
Circular	4.5	4.4	0.8991	*	*	0.3036	0,9133
Circular	6.0	3	0.7878	*	*	0.3992	0,8042
Circular	6.0	4.4	0.6600	*	*	0.3036	0,6850

Fuente. El Autor

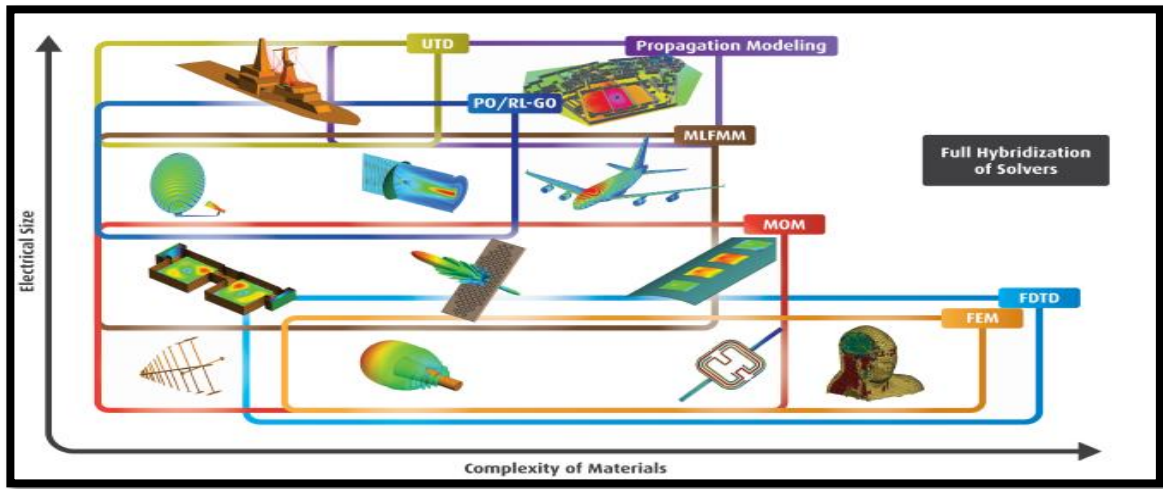
4.4. SELECCIÓN Y SIMULACIÓN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE LA ANTENA MICROSTRIP

El análisis presentado en el capítulo anterior presento las características principales que tuvieron los autores con mayor número de publicaciones en tópicos relacionados con antenas Microstrip para realizar el diseño y la simulación de este tipo de radiador, adicional a ello se evidencio que en la mayoría de los artículos los autores realizaron la simulación y evaluación de los diseños generados mediante el software de simulación ANSYS HFSS (High Frequency Software Simulation).

Por lo tanto, se realizó la respectiva gestión con ayuda de las directivas de la Universidad Católica de Colombia y la Universidad Sergio Arboleda un convenio con el cual permita realizar la simulación de las diferentes características de antenas diseñadas anteriormente en los laboratorios de la universidad Sergio Arboleda la cual cuenta con la licencia oficial del software ANSYS HFSS.

Adicional a ello ANSYS HFSS utiliza el método de simulación MoM métodos de los momentos, mediante el cual el software simulador realiza la resolución de las ecuaciones de maxwell en aplicaciones de radiación tales como simulación del comportamiento de todo tipo de antenas, lo que permite analizar las diferentes características de las antenas mencionadas en los capítulos anteriores (ver ilustración 27).

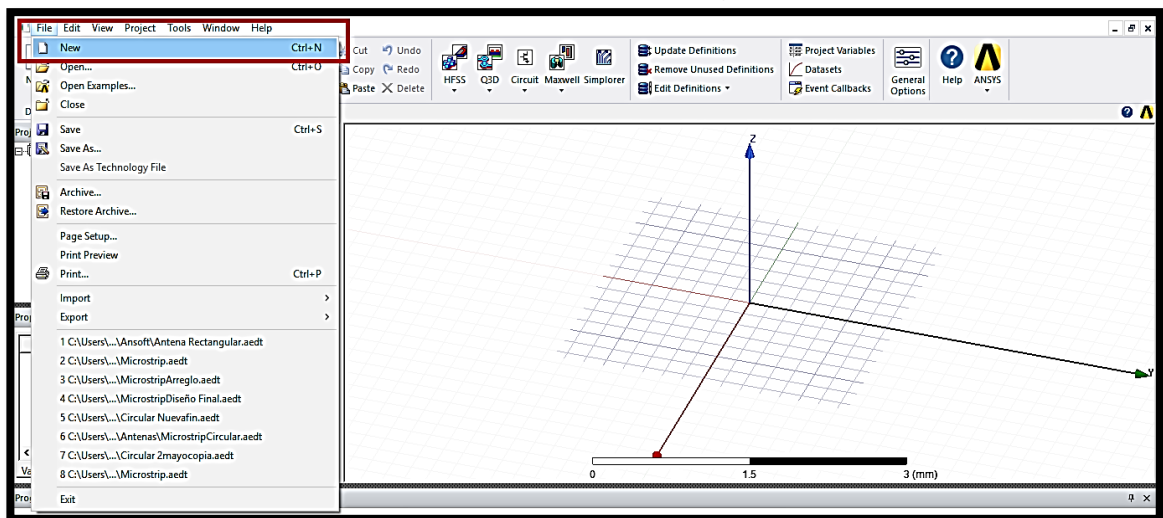
Ilustración 27. Métodos de análisis software de simulación electromagnética



Fuente. Altair Hyperworks, Antenna Design. {En línea}. [citado el 29 de marzo de 2019]. Disponible en internet: (https://www.terabyte.co.jp/Hyper/supprt_platform.pdf).

4.4.1 Diseño antena Microstrip Rectangular. Teniendo en cuenta los parámetros de diseño y los cálculos de geometría realizados anteriormente, a continuación, se evidencia el proceso para la simulación de la antena Microstrip rectangular. En este capítulo se evidencia secuencialmente el diseño de la antena rectangular y circular en el software de simulación ANSYS HFSS. Para iniciar se debe crear un nuevo ambiente de simulación, para esto se debe seleccionar *File* y posterior a ello *New*. Ver ilustración 28.

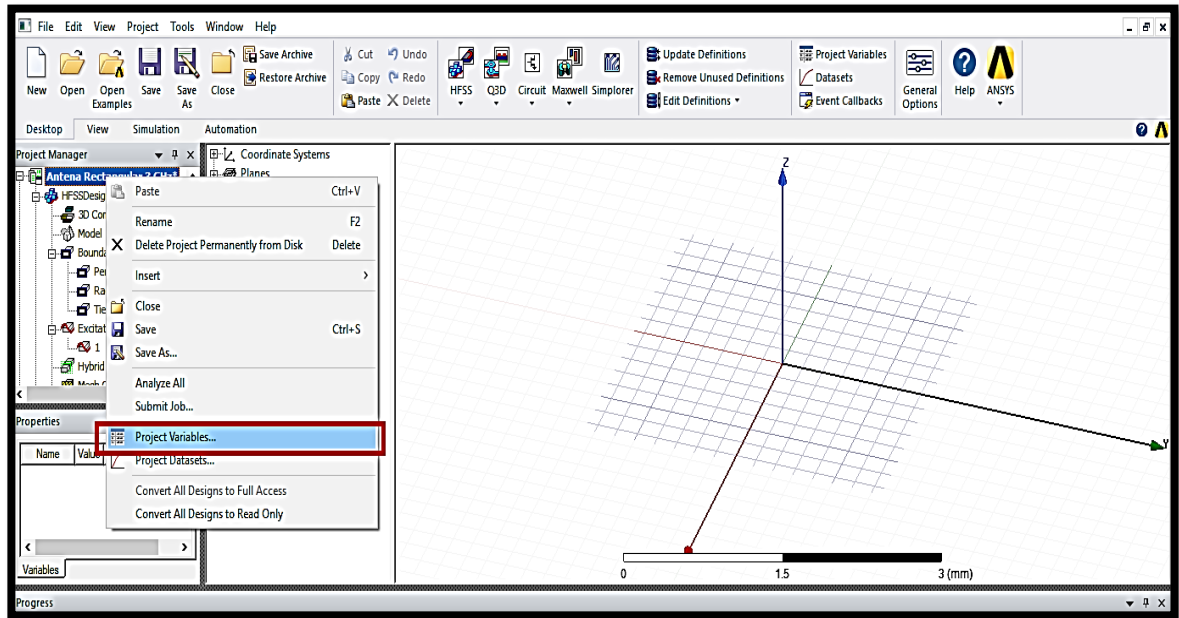
Ilustración 28. Simulación antena Microstrip rectangular



Fuente. El Autor

Continuando con el proceso de simulación, se deben añadir a la simulación las variables calculadas en el capítulo anterior, para ello visualizar la ilustración 29 y 30, oprimir *doble clic* sobre el botón enmarcado en el rectángulo rojo y por último con el botón *ADD* guardar las variables.

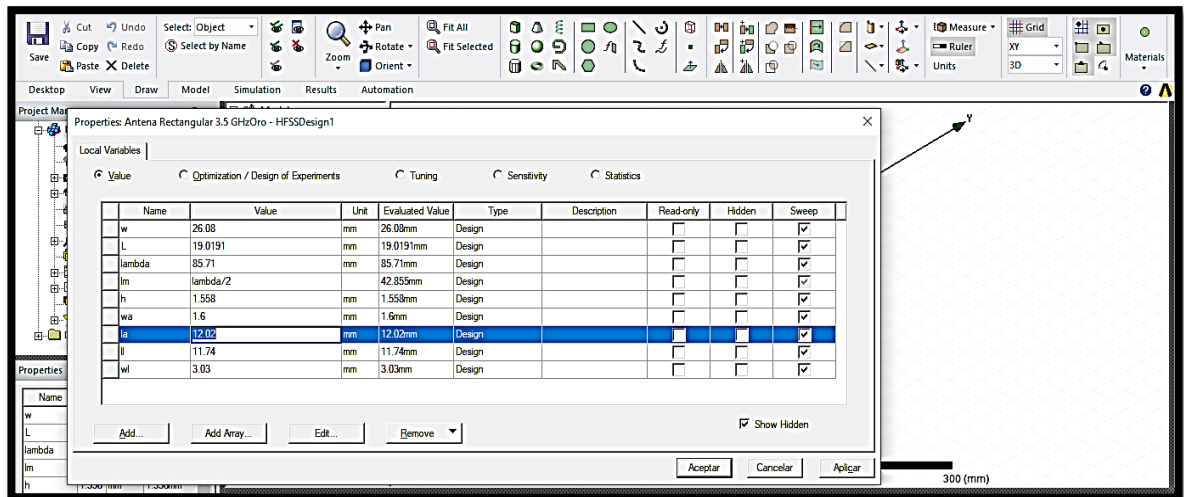
Ilustración 29. Creaciones variables del diseño.



Fuente. El Autor

En la ilustración 30 se puede observar el valor final que tendrán las variables del diseño de antena Microstrip rectangular, estas variables corresponden a los valores calculados en el capítulo anterior.

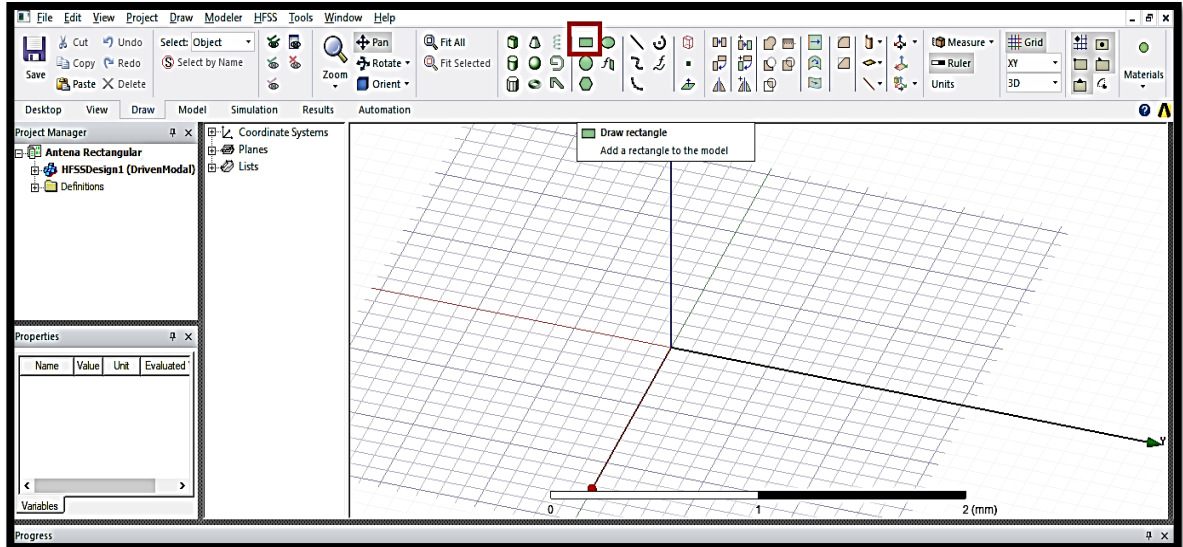
Ilustración 30. Variables asignadas a los parámetros de diseño.



Fuente. El Autor

Para iniciar con el diseño del tipo de antena, se deben crear dos rectángulos (Ver ilustración 31) los cuales serán el sustrato y plano de tierra respectivamente.

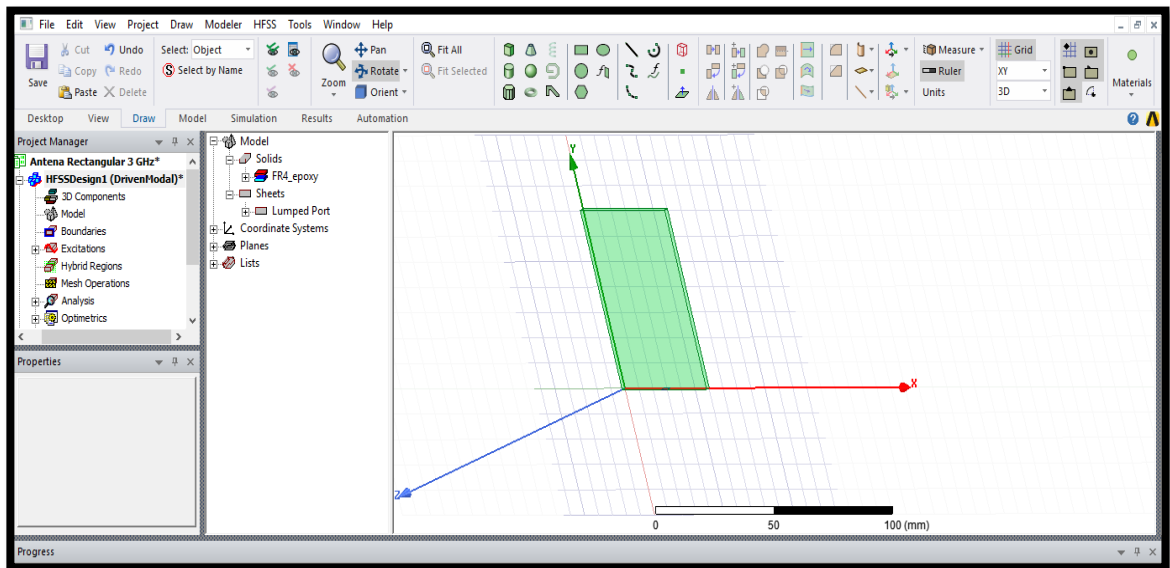
Ilustración 31. Diseño antena Microstrip Rectangular.



Fuente. El Autor

Para crear el rectángulo inicial se debe seleccionar el botón mostrado en la ilustración 31, seguido a esto oprimir *clic sostenido* sobre el plano del lugar de trabajo y desplazar el ratón hasta obtener un rectángulo. Ver ilustración 32.

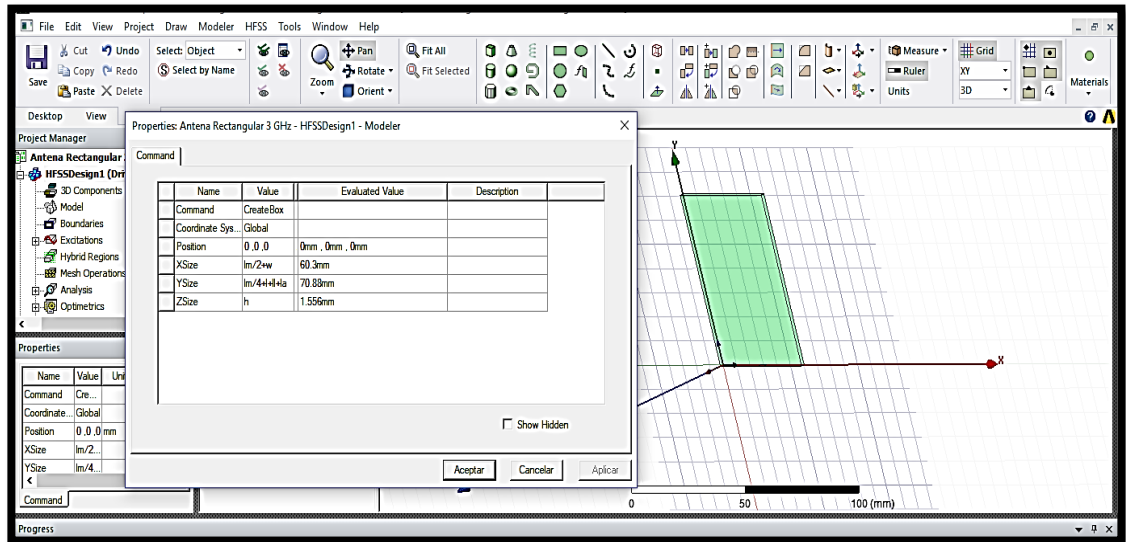
Ilustración 32. Creación del sustrato



Fuente. El Autor

Se debe centrar el sustrato con el objetivo de facilitar el proceso de ubicación y acople con el rectángulo dispuesto para el plano de tierra teniendo en cuenta los valores evidenciados en la ilustración 33. Para lograr esto se debe dar doble clic sobre *CreateBox*

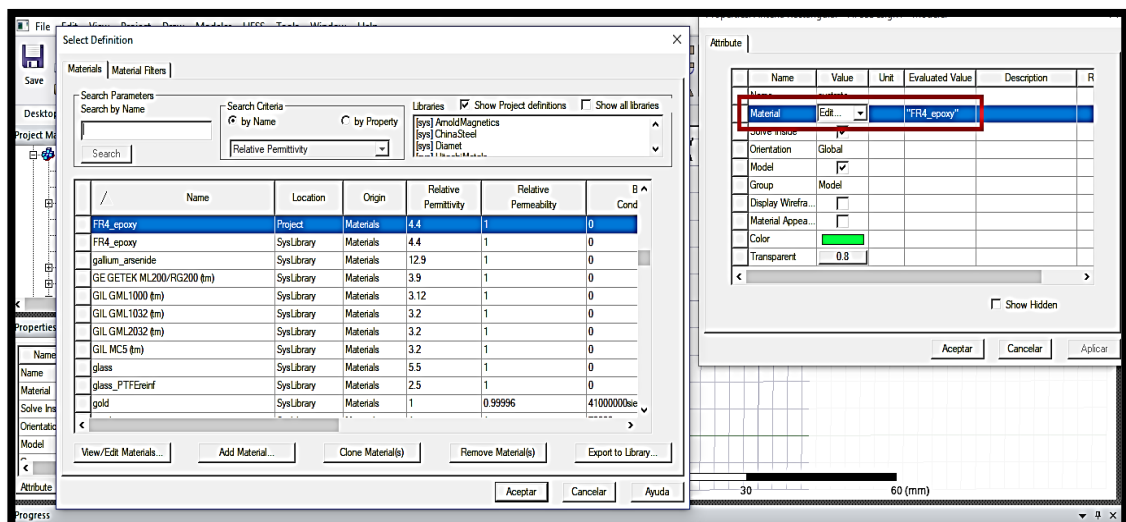
Ilustración 33. Ubicación sustrato.



Fuente. El Autor

Posterior a ello para realizar la asignación de las propiedades del sustrato propuesto en el análisis del capítulo anterior se debe seleccionar nuevamente el rectángulo y seleccionar editar material, lo que direccionara a la tabla con sustratos dispuesta por el software ANSYS HFSS. Ver ilustración 34.

Ilustración 34. Selección sustrato FR4

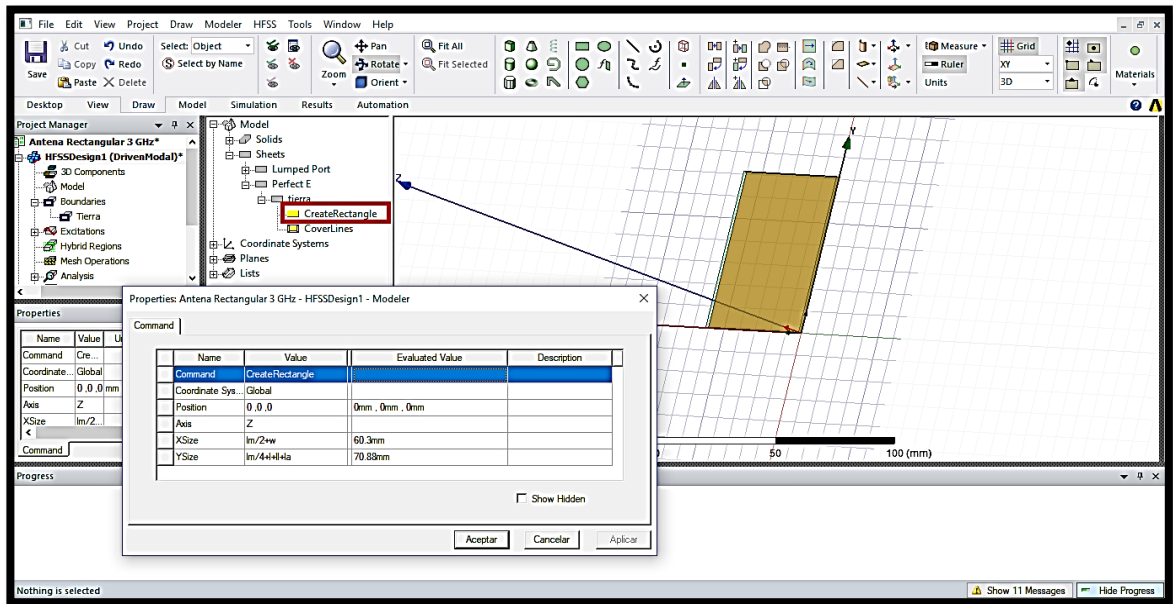


Fuente. El Autor

Como se puede evidenciar en la ilustración 35, se debe crear un nuevo rectángulo el cual se comportará como el plano de tierra del sustrato, este debe ubicarse bajo el rectángulo del sustrato, es decir las coordenadas del sustrato evidenciadas a continuación.

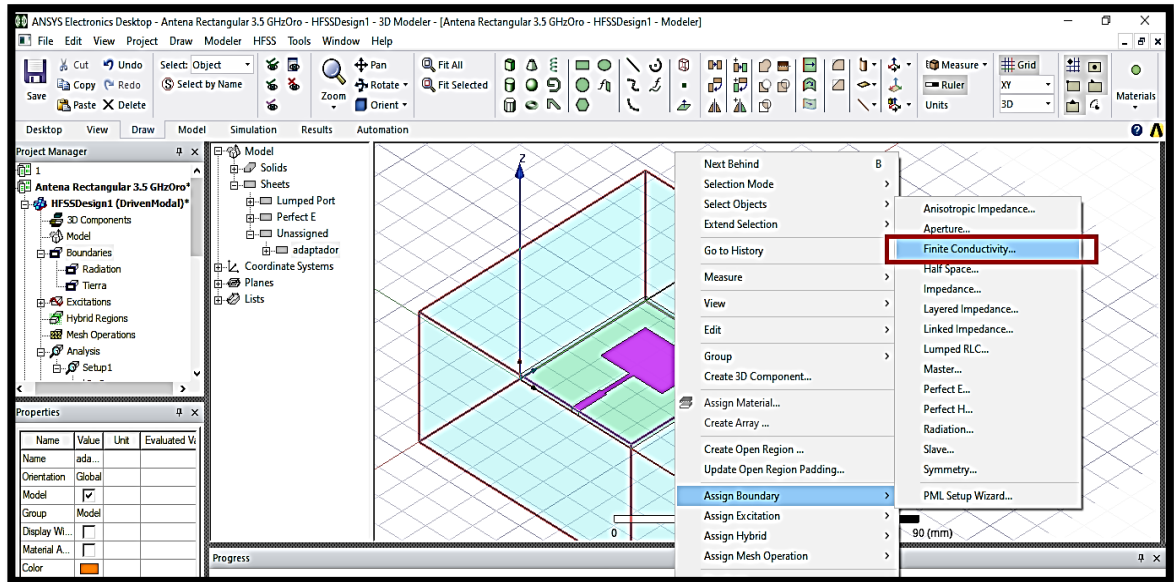
Una vez creado el plano de tierra lo ubicamos con las mismas coordenadas que se evidencian en la ilustración 33. Para ello se seleccionó nuevamente *CreateRectangle* con el objetivo de añadir y alinear los dos rectángulos. Posterior a ello se debe seleccionar nuevamente *create rectangle* para generar el rectángulo donde estará inmersa la antena Microstrip. Por otro lado, se debe seleccionar el plano de tierra con el objetivo de asignar las características que permitirán realizar el diseño y simulación de la antena Microstrip para ello se debe oprimir *click derecho* sobre el plano de tierra, seguido a esto seleccionar *Assign Boundary* y por último *Finite Conductivity*. Ver ilustración 35.

Ilustración 35. Creación plana de tierra.



Fuente. El Autor

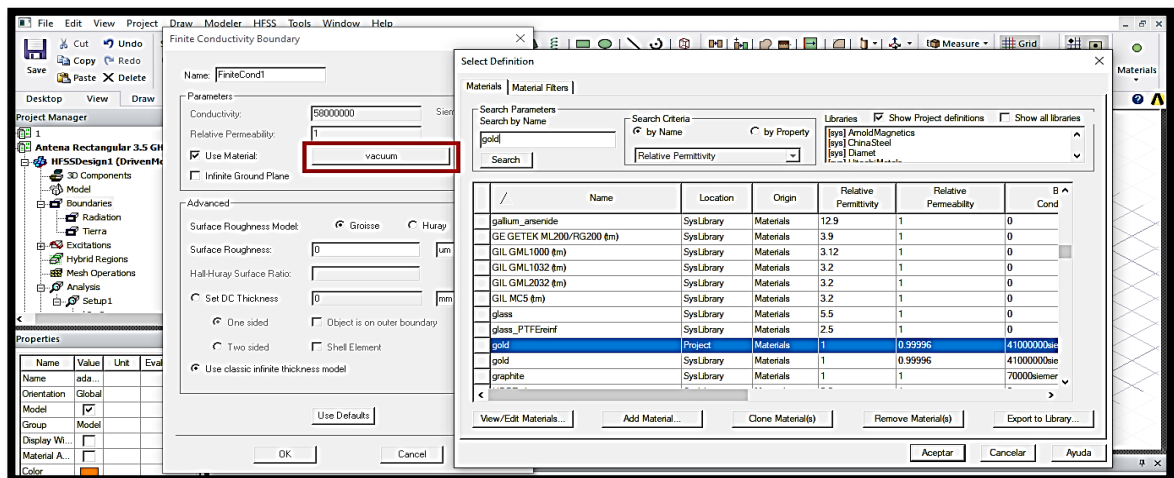
Ilustración 36. Parametrización material conductor



Fuente. El Autor

Posterior a ello como se evidencia en la ilustración 37, se debe añadir el material conductor del parche de antena, para ello se selecciona *Use material*, se busca el material deseado y se oprime el botón *aceptar*.

Ilustración 37. Selección material Oro.

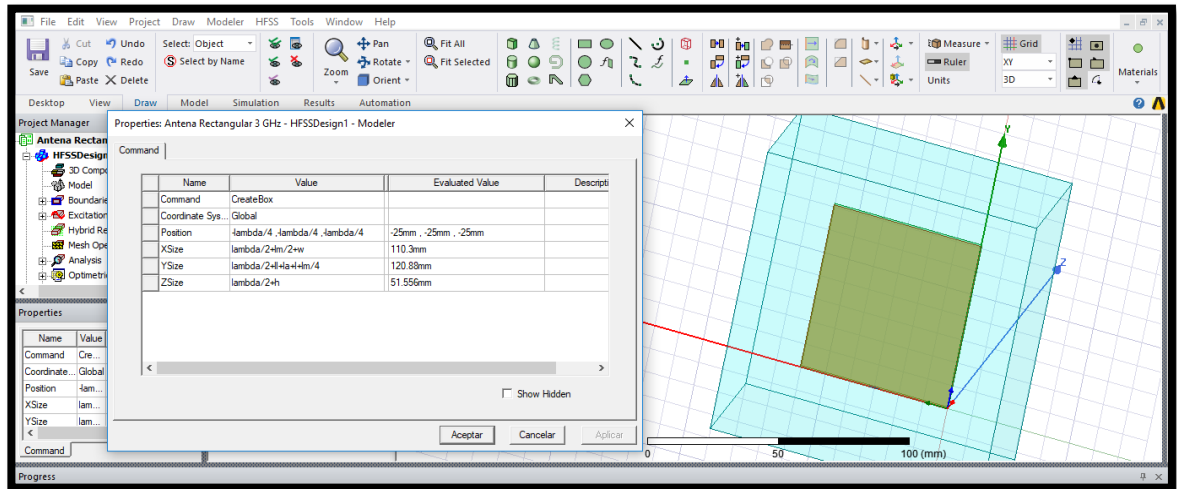


Fuente. El Autor

Como se puede observar en la ilustración 38 se debe seleccionar nuevamente el rectángulo marcado con color rojo (Ver ilustración 31), esto para añadir las variables del medio donde radiara la antena diseñada. Las medidas del plano infinito de tierra

deberán estar parametrizado de acuerdo con las variables que se crearon al inicio del capítulo. Para asignar las características del medio donde radiara la antena diseñada se debe seleccionar el rectángulo creado, oprimir *clic derecho* y por último *Assign Boundary* y por último *Perfect H*.

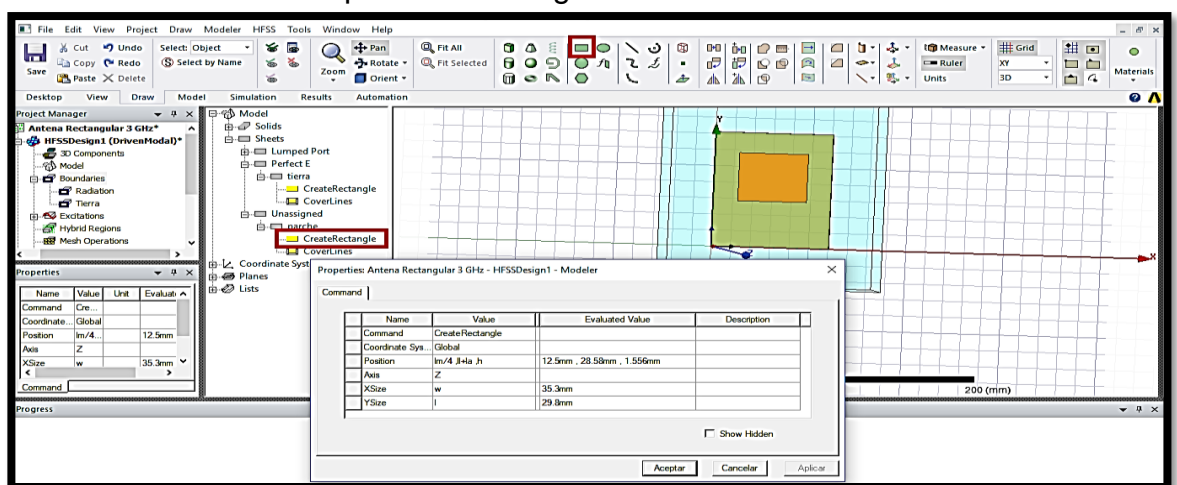
Ilustración 38. Creación de plano infinito



Fuente. El Autor

Una vez diseñado el sustrato de fabricación, plano de tierra y el plano infinito, se realiza la creación de un nuevo rectángulo el cual será el parche radiador. A continuación, se deben generar 3 rectángulos, los cuales serán el parche de la antena rectangular, el segundo rectángulo será el adaptador de lambda cuartos ($\lambda/4$) y por ultimo el tercer rectángulo la línea de transmisión. Todos estos nuevos rectángulos deberán ser ajustados de acuerdo con las variables creadas anteriormente. Ver ilustración 39

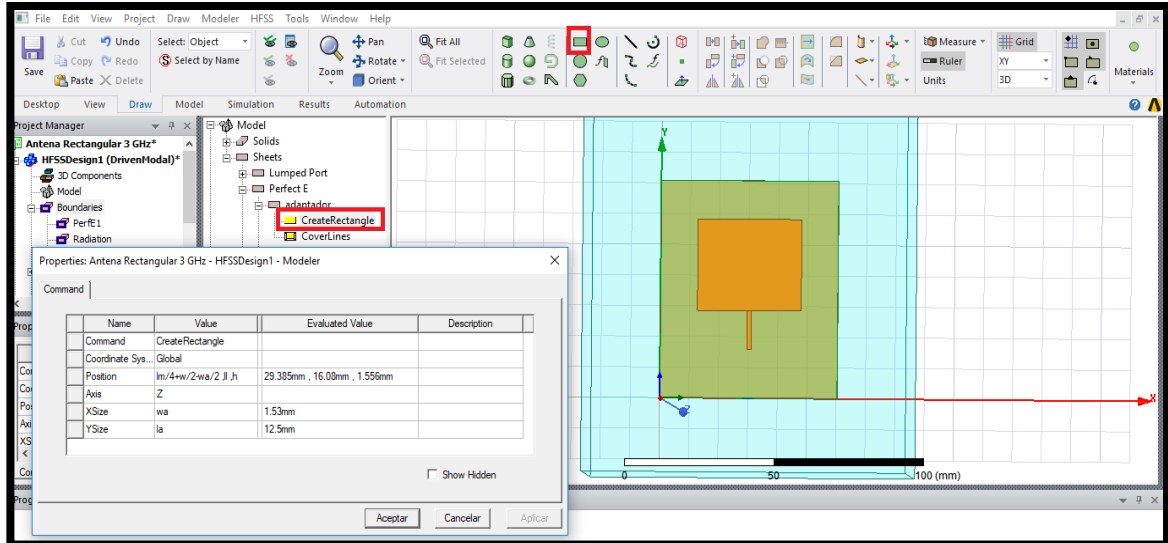
Ilustración 39. Creación parche Rectangular



Fuente. El Autor

Ahora, se añade un nuevo rectángulo y se ubica de acuerdo con las coordenadas evidenciadas en la ilustración 40.

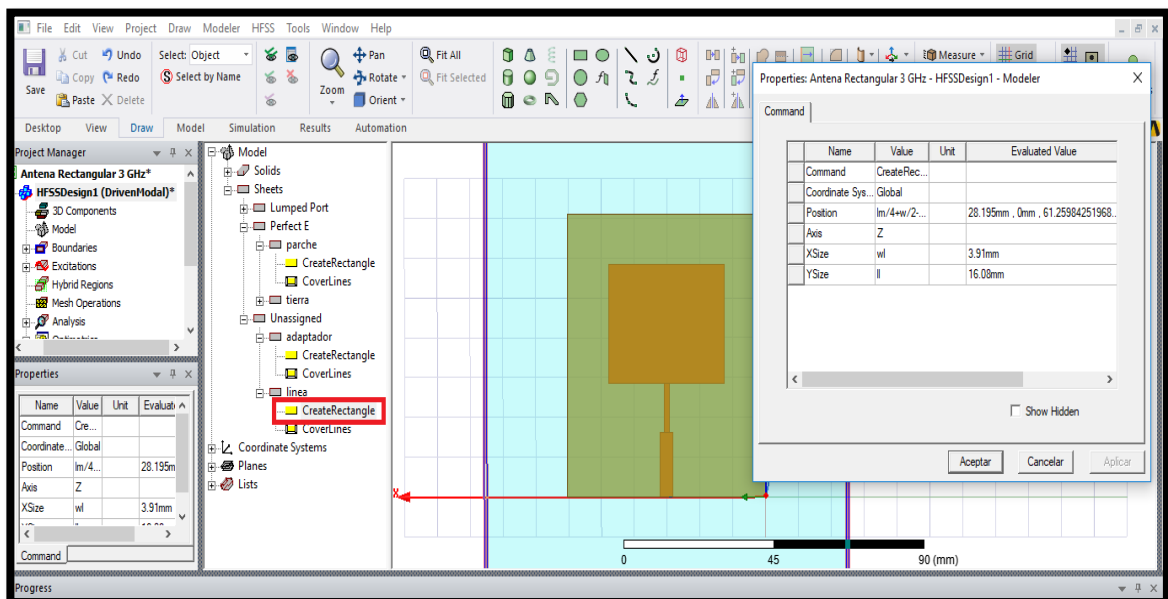
Ilustración 40. Creación adaptador Lambda cuartos



Fuente. El Autor

Por último, se debe añadir un cuadrado el cual simulara el puerto de conexión. Para ello se debe crear un nuevo rectángulo y ubicarlo como se evidencia en la ilustración 41.

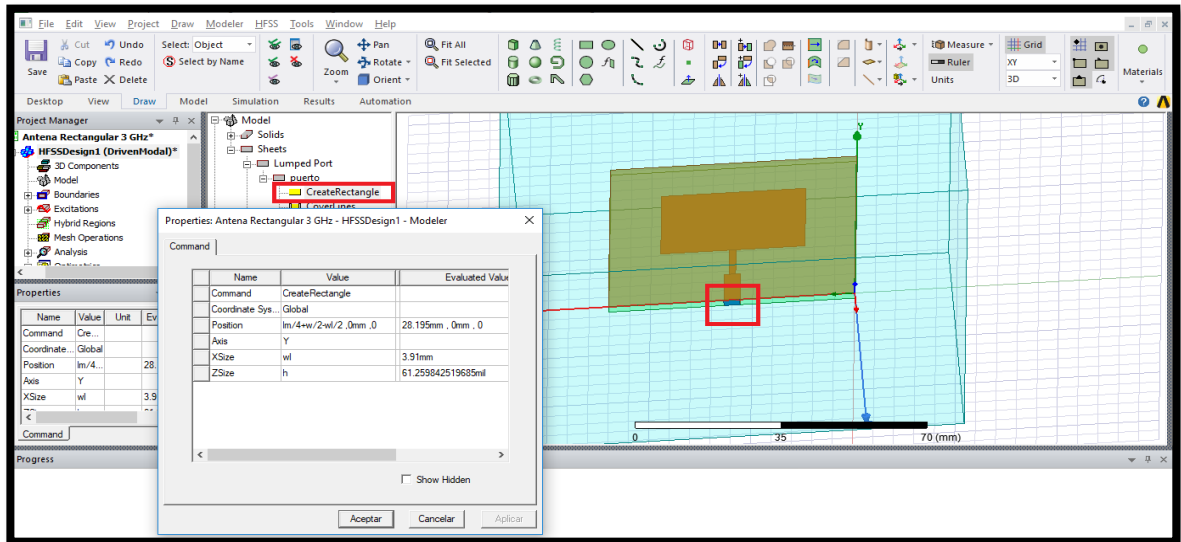
Ilustración 41. Creación línea de transmisión.



Fuente. El Autor

Se deben asignar las características de elementos tales como adaptador, para ello oprimir *double clic* sobre el rectángulo generado, luego seleccionar *Assign Excitation* y posterior a ello *Lumped Port*, renombrar el puerto y editar la impedancia del puerto, seleccionar *New Line*, después *siguiente* (Ver ilustración 42).

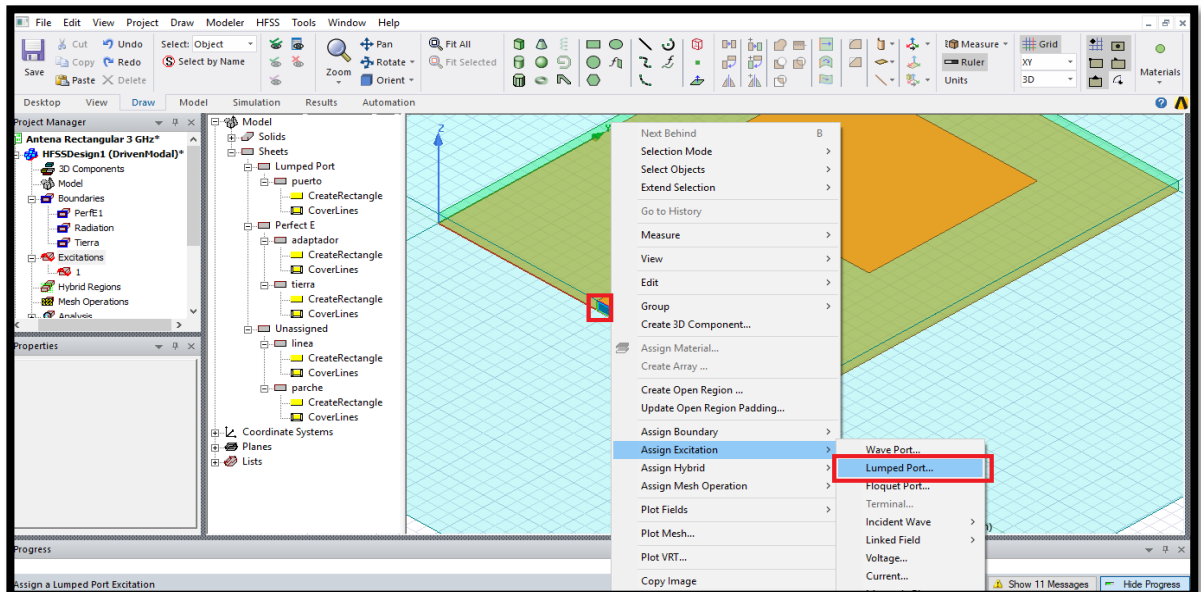
Ilustración 42. Creación puerto alimentación.



Fuente. El Autor

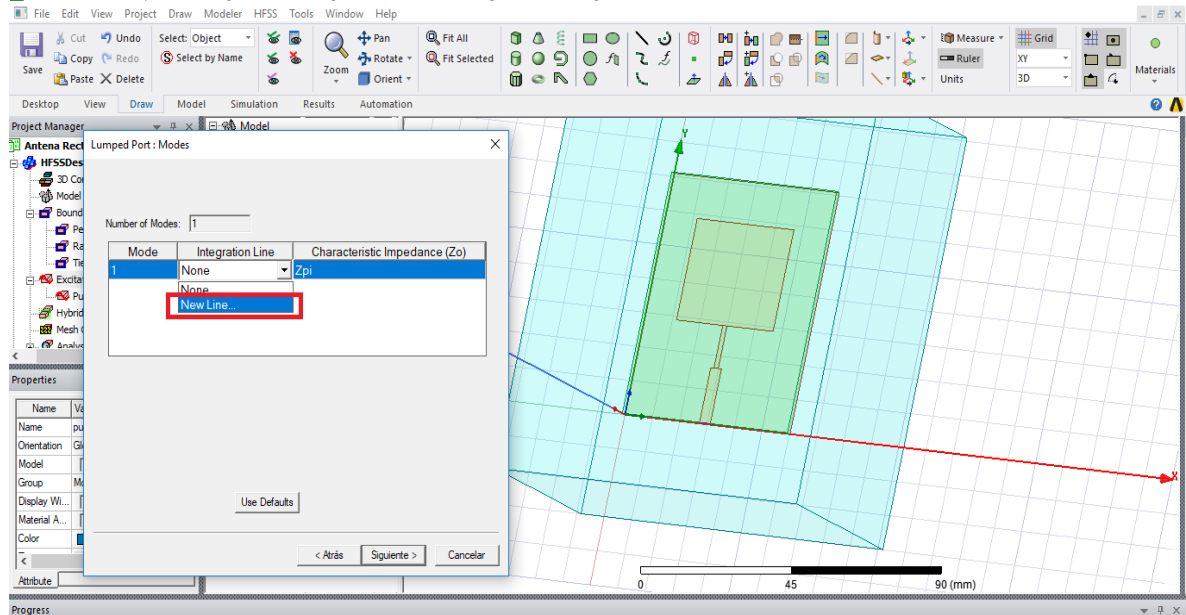
Por último, seleccionar con el cursor el rectángulo del puerto y se debe generar una trayectoria del rectángulo de tierra hasta el final del puerto. Ver ilustración 43 - 44.

Ilustración 43. Características puerto alimentación.



Fuente. El Autor

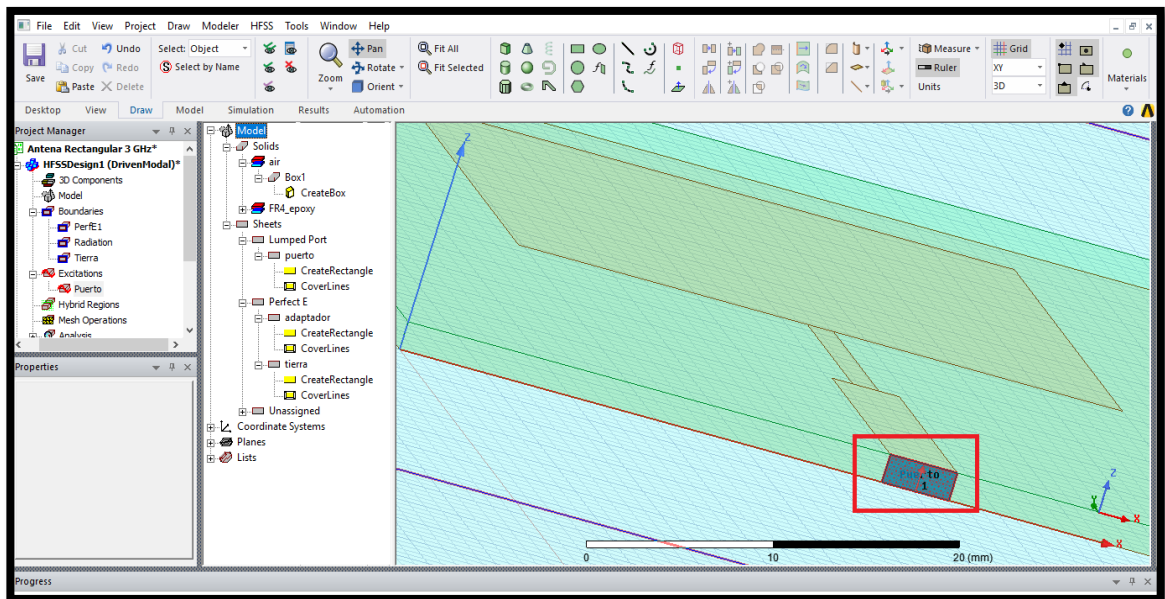
Ilustración 44. Características puerto alimentación.



Fuente. El Autor

Para verificar el puerto se debe seleccionar el rectángulo creado y verificar la línea de alimentación. Ver ilustración 45.

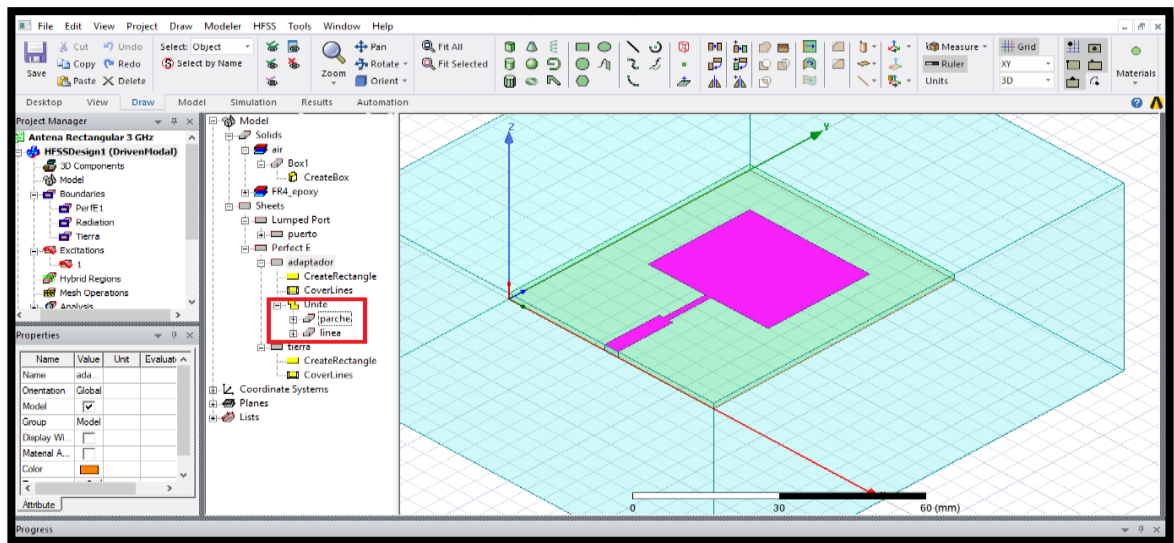
Ilustración 45. Características puerto alimentación.



Fuente. El Autor

Se deben seleccionar los tres elementos generados anteriormente, rectángulo, adaptador de lambda cuartos y línea de transmisión, esto se realiza con tecla *ctrl* y clic derecho, una vez los tres elementos se encuentren del color evidenciado en la ilustración 46, se debe oprimir clic derecho, *Edit*, *Boolean* y seleccionamos *Unite*, una vez realizado el paso anterior, se debe asignarle al rectángulo *Assign Boundary* y por último *Finite Conductivity*.

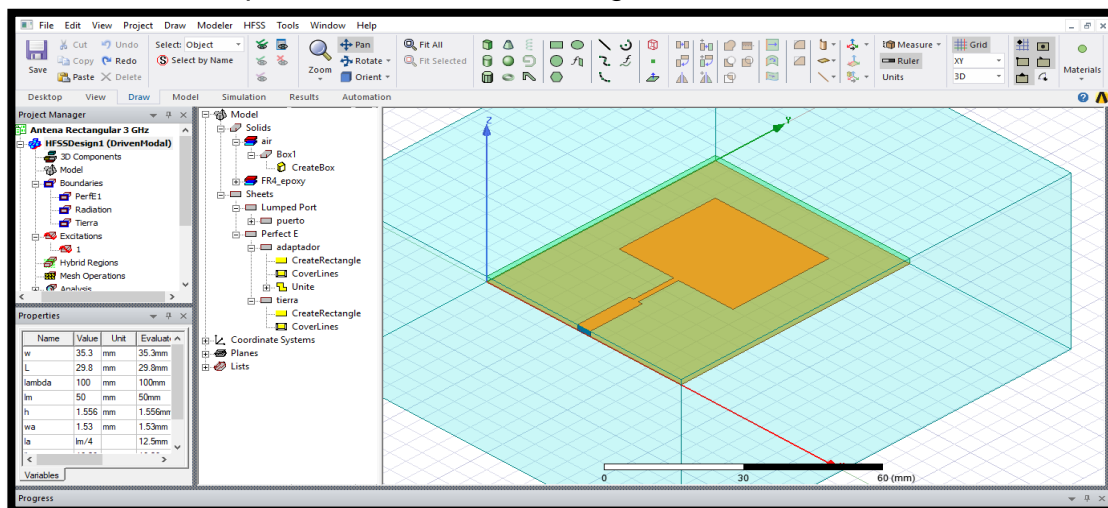
Ilustración 46. Suma Booleana antena Microstrip rectangular.



Fuente. El Autor

A continuación, se evidencia el diseño final de la antena Microstrip rectangular. Ver ilustración 47.

Ilustración 47. Aspecto final antena Rectangular



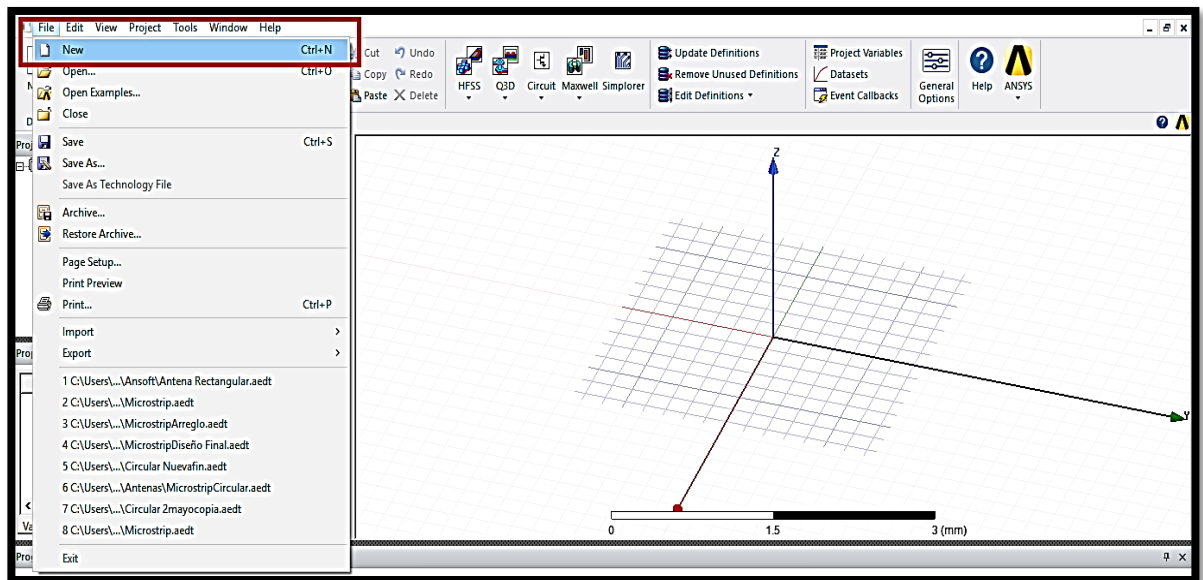
Fuente. El Autor

4.4.1 Diseño antena Microstrip circular

La alimentación propuesta para este tipo de antena circular se contempló con línea de transmisión y adaptador de $\lambda/4$, para ello se debe diseñar y crear los rectángulos del sustrato, plano de tierra, línea transmisión y adaptador. Se debe realizar el mismo procedimiento evidenciado en el diseño de la antena rectangular. Tener en cuenta las configuraciones realizadas en el diseño anterior tales como asignación de *Finite Conductivity*, *Perfect H*, creación y parametrización del puerto de conexión. Ver ilustración 48.

Para empezar, las variables calculadas para el tipo de antena circular en el capítulo anterior deben ser añadidas al diseño de simulación, para ello validar la ilustración 30 y cuadro 12.

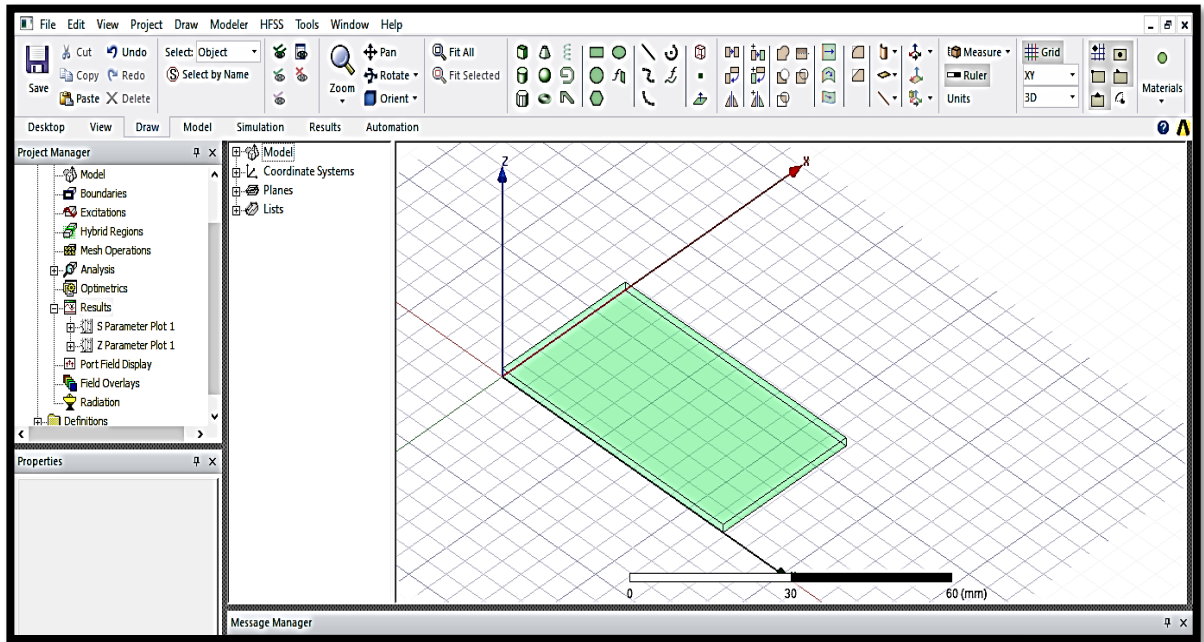
Ilustración 48. Diseño antena Microstrip circular



Fuente. El Autor

Para crear el rectángulo inicial se debe seleccionar el botón mostrado en la ilustración 48, seguido a esto oprimir *clic sostenido* sobre el plano del lugar de trabajo y desplazar el ratón hasta obtener un rectángulo. Ver ilustración 49.

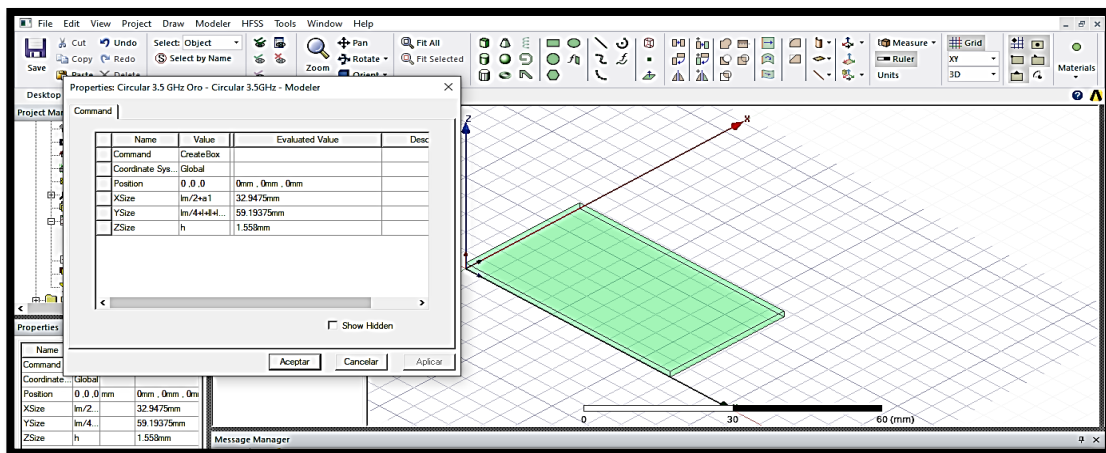
Ilustración 49. Creación sustrato FR4



Fuente. El Autor

Se debe centrar el sustrato con el objetivo de facilitar el proceso de ubicación y acople con el rectángulo dispuesto para el plano de tierra teniendo en cuenta los valores evidenciados en la ilustración 50. Para lograr esto se debe dar doble clic sobre *CreateBox* y editar los valores de cada eje (X, Y, Z).

Ilustración 50. Ubicación sustrato.

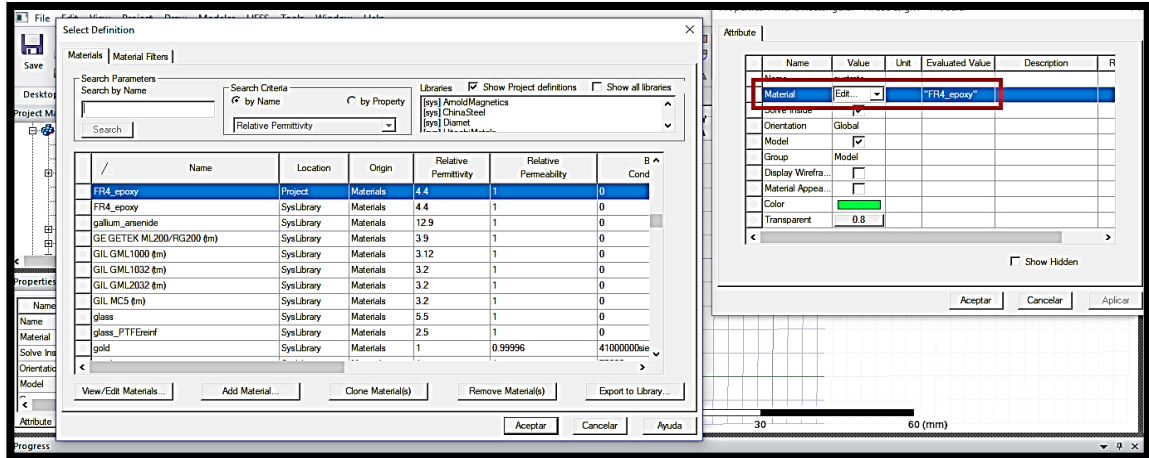


Fuente. El Autor

Posterior a ello para realizar la asignación de las propiedades del sustrato propuesto en el análisis del capítulo anterior se debe seleccionar nuevamente y seleccionar

editar material, lo que direccionara a la tabla con sustratos dispuesta por el software ANSYS HFSS. Ver ilustración 51.

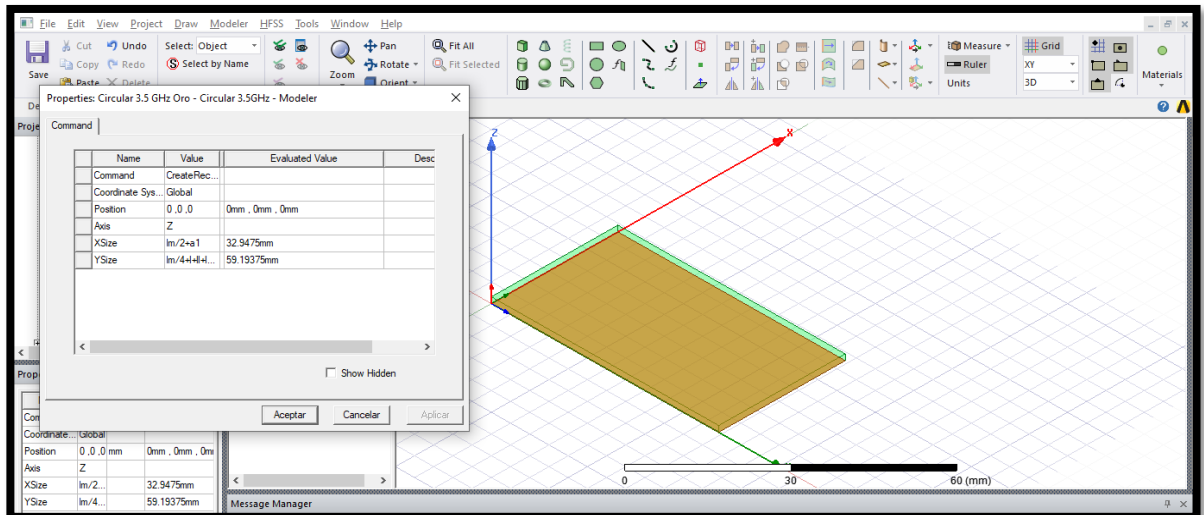
Ilustración 51. Selección sustrato FR4



Fuente. El Autor

Como se puede evidenciar se debe crear un nuevo rectángulo el cual se comportará como el plano de tierra del sustrato, este debe ubicarse bajo el rectángulo del sustrato, es decir las coordenadas del sustrato evidenciadas en la ilustración 52. Una vez creado el plano de tierra se ubica con las mismas coordenadas y variables calculadas anteriormente. Para ello se selecciona *CreateRectangle* con el objetivo de añadir y alinear los dos rectángulos. Ver ilustración 52.

Ilustración 52. Creación plano de tierra



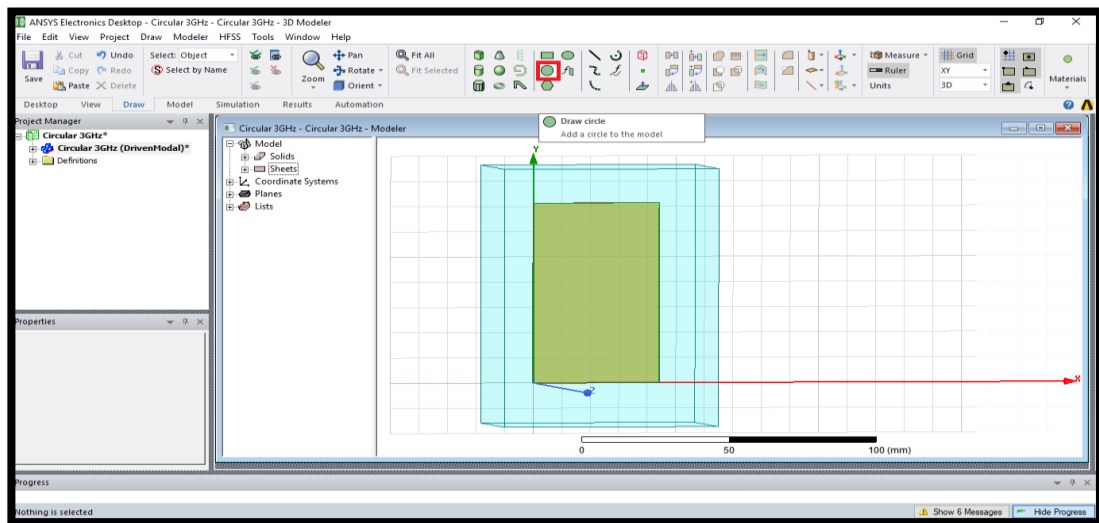
Fuente. El Autor

Por otro lado, se debe seleccionar el plano de tierra con el objetivo de asignar las características que permitirán realizar el diseño y simulación de la antena Microstrip para ello se debe oprimir *clic derecho* sobre el plano de tierra, seguido a esto seleccionar *Assign Boundary* y por último *Finite Conductivity*.

Posterior a ello como se debe añadir el material conductor del parche de antena, para ello se selecciona *Use material*, se busca el material deseado y se oprime el botón *aceptar*.

Una vez terminado el proceso de creación de tierra, sustrato de fabricación, y tierra, Inicialmente crear un círculo, para ello se debe seleccionar el botón enmarcado en rojo y ubicar la geometría sobre el sustrato Ver ilustración 53, posterior a ello seleccionar *CreateBox* y ajustar las variables de ubicación y respectivo radio del parche.

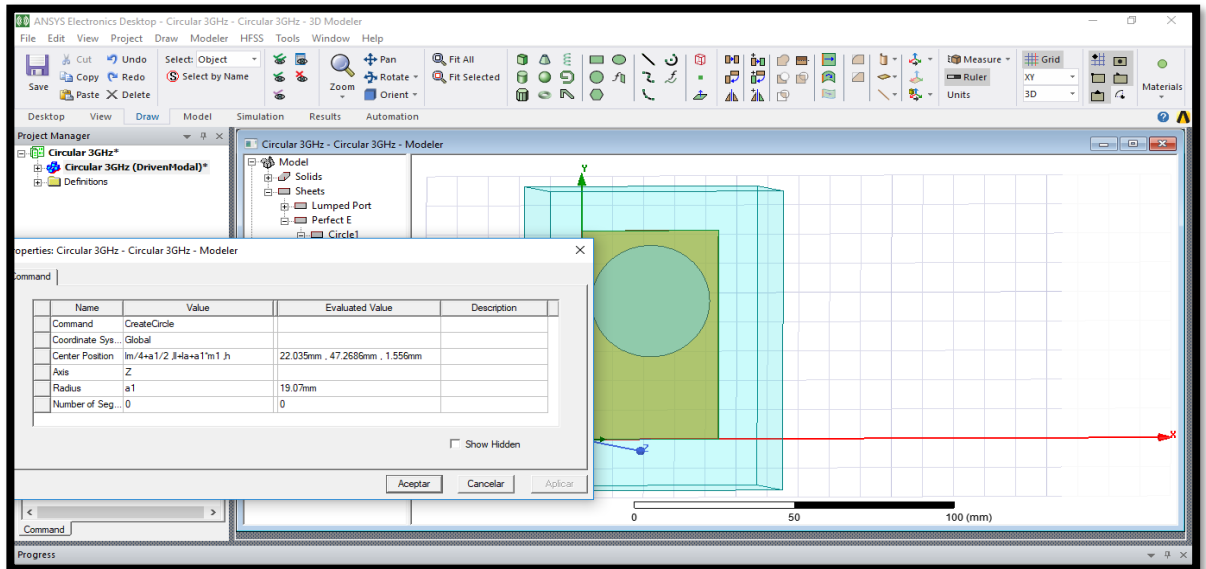
Ilustración 53. Creación parche Circular



Fuente. El Autor

Realizar la adición de la geometría circular, para ello seleccionar el círculo que se evidencia en la ilustración 54 y editar las variables de ubicación. La geometría debe ubicarse en el centro del sustrato.

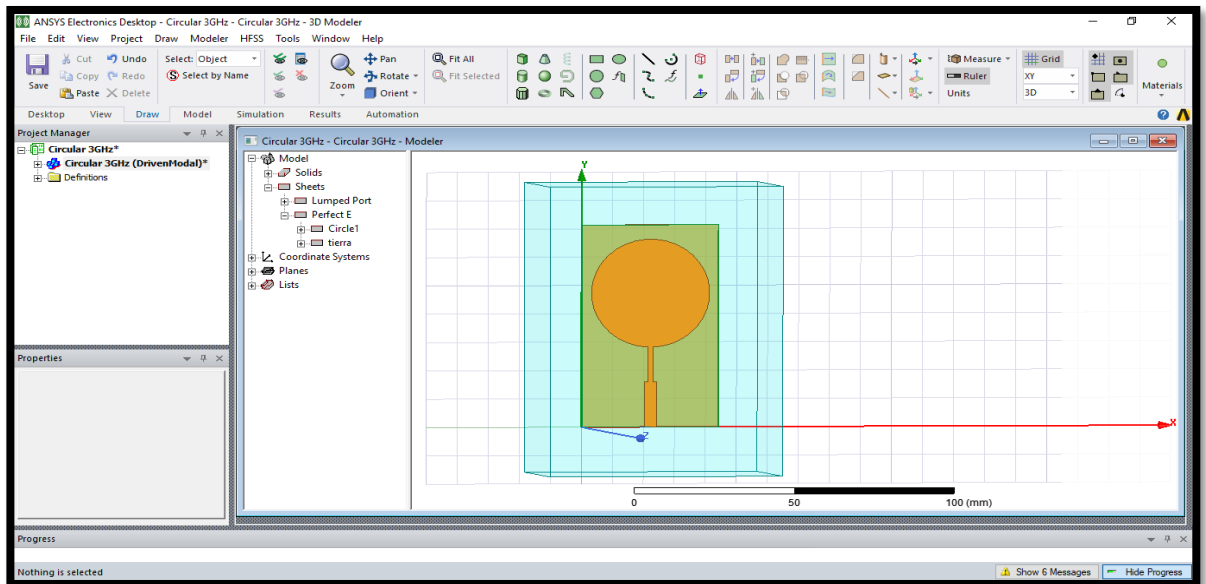
Ilustración 54. Variables antenna Microstrip Circular



Fuente. El Autor

Posterior a ello se deben añadir los rectángulos correspondientes al adaptador de lambda cuartos Ver ilustración 55, la línea de transmisión y por último el puerto de alimentación, una vez añadidos y ubicados se debe realizar la suma Booleana remitirse a la (ilustración 46).

Ilustración 55. antenna Microstrip Circular



Fuente. El Autor

4.4.2 Resultados obtenidos en la simulación de las dos geometrías de antenas Microstrip

4.4.2.1 Resultados Antena rectangular. De acuerdo con el cuadro 12 en donde se observan las diferentes características geométricas del diseño de las antenas rectangular y circular, es importante mencionar que todos los tipos de antenas se tuvieron en consideración y fueron diseñadas y simuladas en el software ANSYS HFSS (Ver anexo 4).

Posterior al diseño y simulación de cada antena en donde de acuerdo con los resultados obtenidos como impedancia característica, parámetro de dispersión S_{11} , patrón de radiación y directividad, se seleccionó la antena con la impedancia característica cercana al valor propuesto y su número imaginario; por último, también se tuvo en consideración la atenuación más baja generada en las simulaciones. Ver ilustración 55.

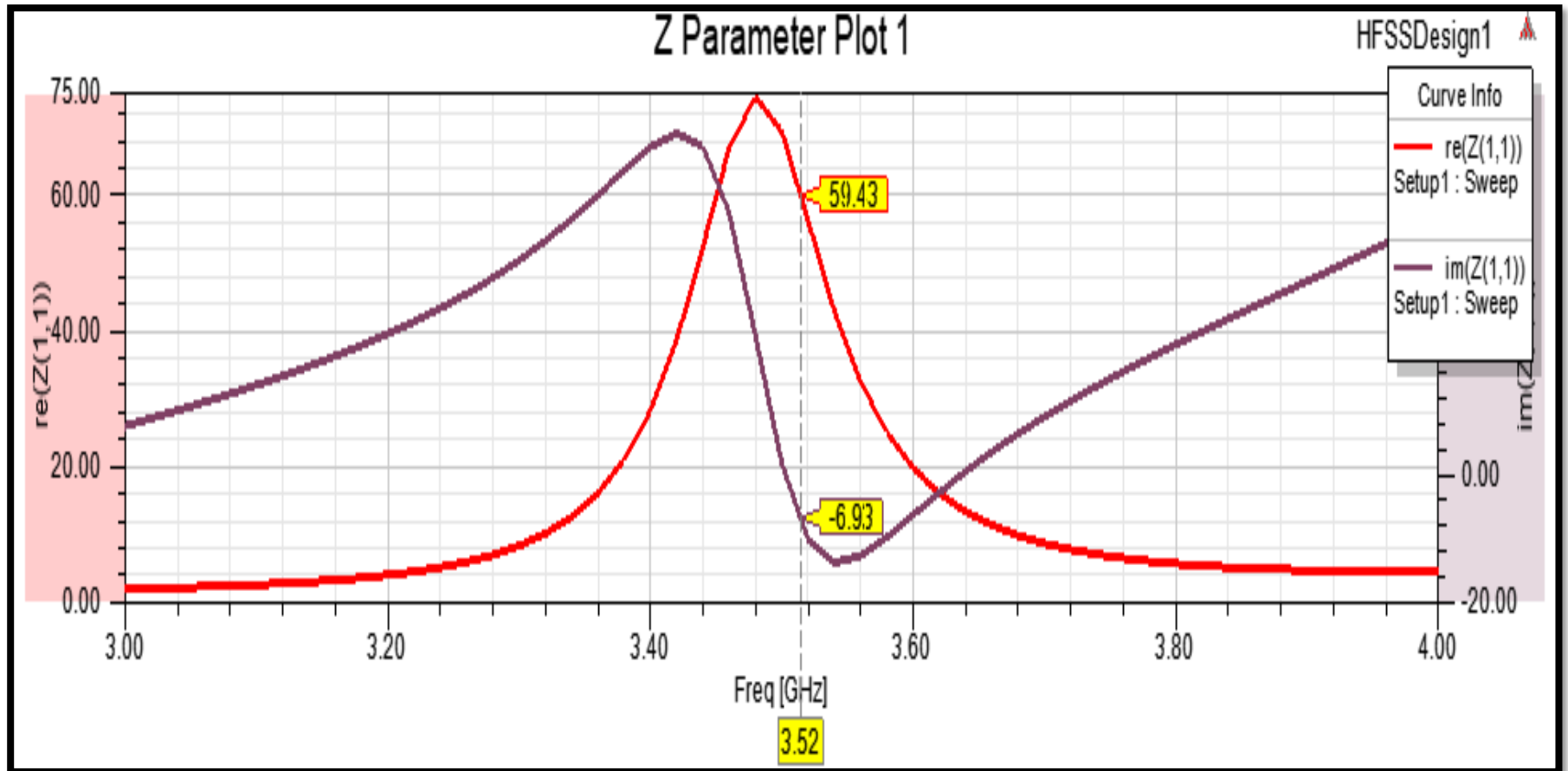
4.4.2.2 Resultados Antena rectangular 3.5 GHz sustrato FR4. Para el tipo de antena rectangular con frecuencia de operación 3.5 GHz, sustrato de fabricación FR4, constante dieléctrica de 4.4 y sustrato de fabricación oro se obtuvieron respectivamente 59.43Ω (resistencia) en su componente número real y para el componente imaginario $-6.93j$ (reactancia).

La impedancia característica mencionada anteriormente representa la relación entre la corriente y el voltaje que se genera en el puerto de entrada de la antena Microstrip, ahora, entre más cercano a 0 el valor de la reactancia de la antena será mejor el acople entre la fuente y la línea de transmisión de la antena Microstrip. Ver ilustración 56.

Como evidencia en los resultados obtenidos la impedancia respectiva de la antena Microstrip rectangular posee un componente reactivo de $-6.93j$ a una frecuencia de 3.52 GHz, lo que generara ondas estacionarias y esto a su vez perdidas de potencia.

Sin embargo, ANSYS HFSS mediante una herramienta llamada *Optimetrics* permite optimizar los parámetros físicos y eléctricos de la antena diseñada, para ello la herramienta realiza simulaciones en tiempo real variando las características geométricas de la antena tales como ancho y largo del parche radiador o de la línea de transmisión, para realizar este procedimiento se debe procurar no variar las características geométricas más del 2 %.

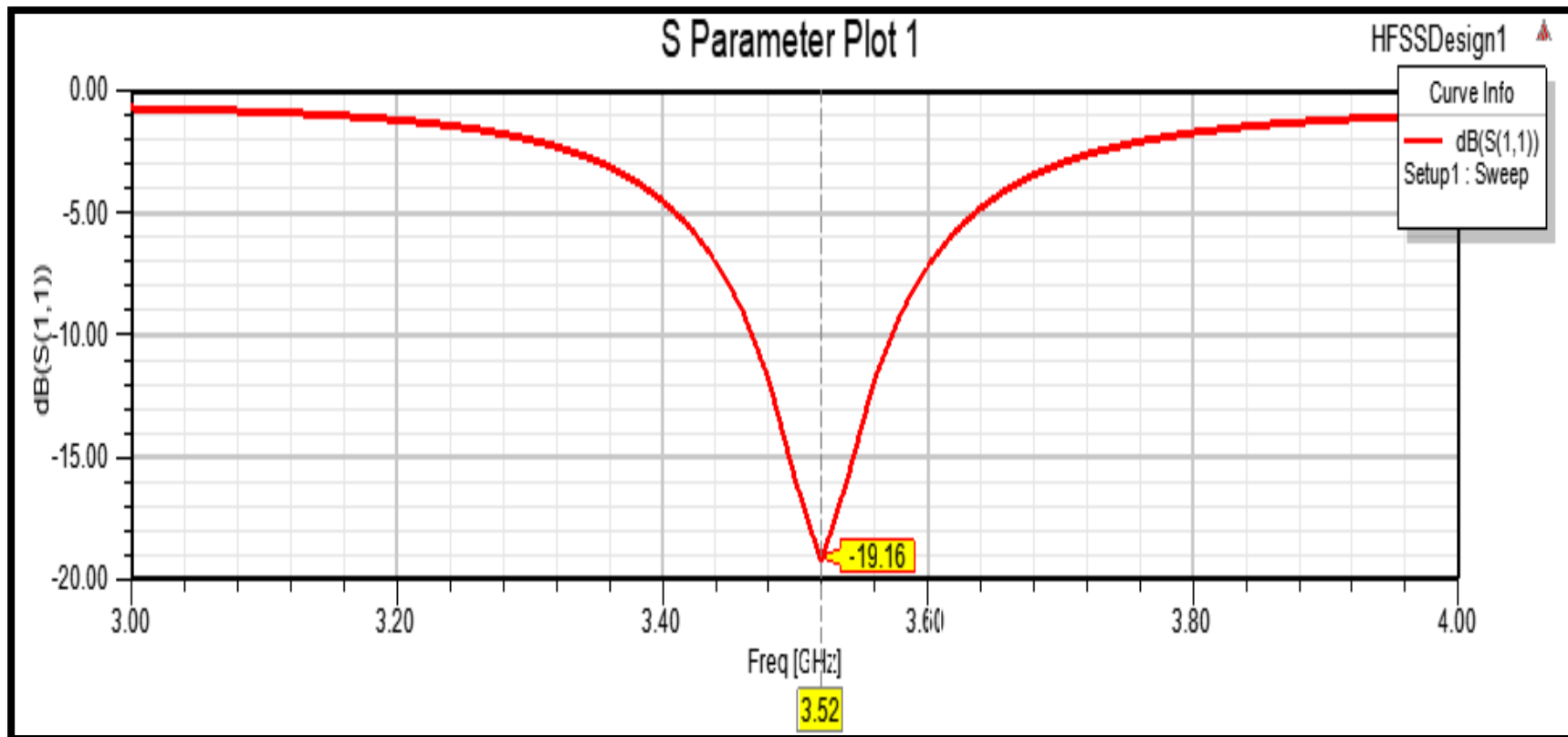
Ilustración 56. antena Microstrip rectangular acople impedancia.



Fuente. El Autor

Ahora en ilustración 57 se puede evidenciar el parámetro S_{11} de la antena Microstrip diseñada, para este tipo de antena se generó una resonancia en la frecuencia 3.52 GHz con una atenuación de -19.16dB, con este parámetro se pueden analizar el ancho de banda respectivo de la antena, para la antena respectiva el ancho será de 100 MHz. Este parámetro permite identificar y cuantificar el acampamiento entre la impedancia y reactancia de la fuente y la de la carga.

Ilustración 57. Parámetro S_{11}

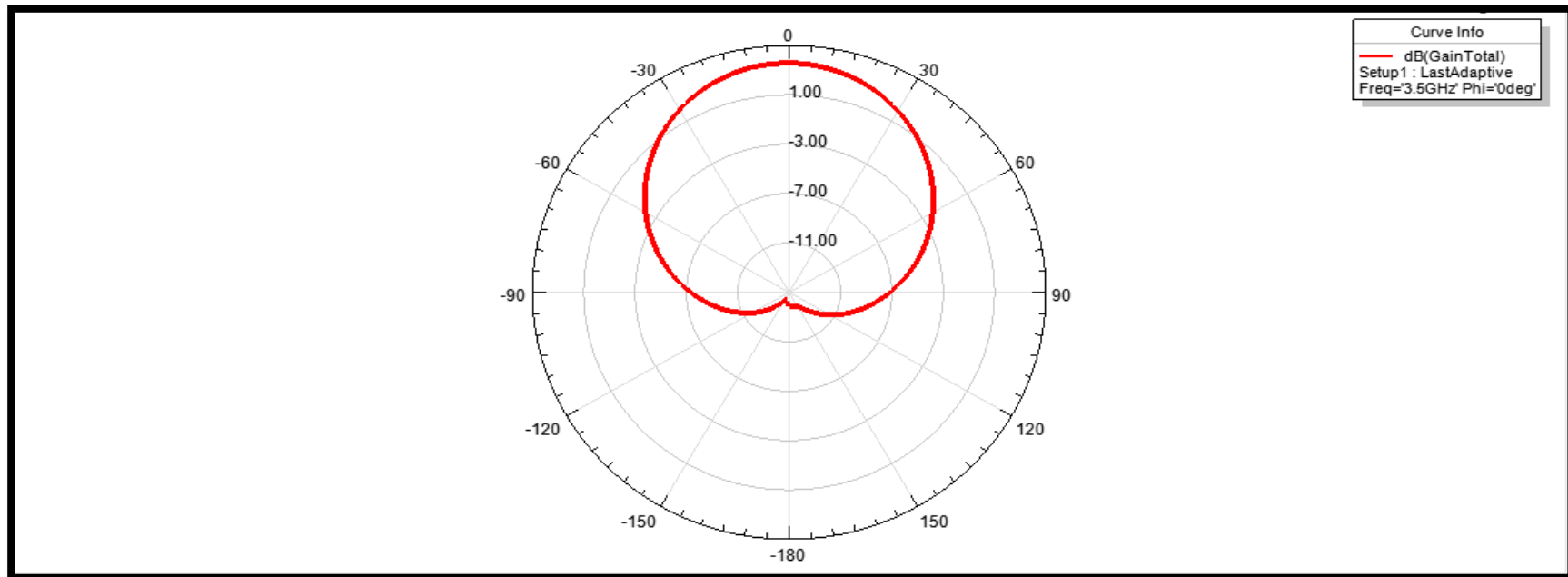


Fuente. El Autor

El patrón o diagrama de radiación generado mediante las herramientas del análisis en ANSYS HFSS permitió evidenciar la ganancia del tipo de antena Microstrip diseñado la cual indica que es un tipo de antena con un lóbulo principal con un valor de ancho de haz de 60° . Ver ilustración 58

Lo que nos indica que este tipo de antena es poco directiva ya que presenta un lóbulo principal el cual se encuentra presente desde -60° hasta 60° .

Ilustración 58. Patrón de radiación antena Microstrip rectangular

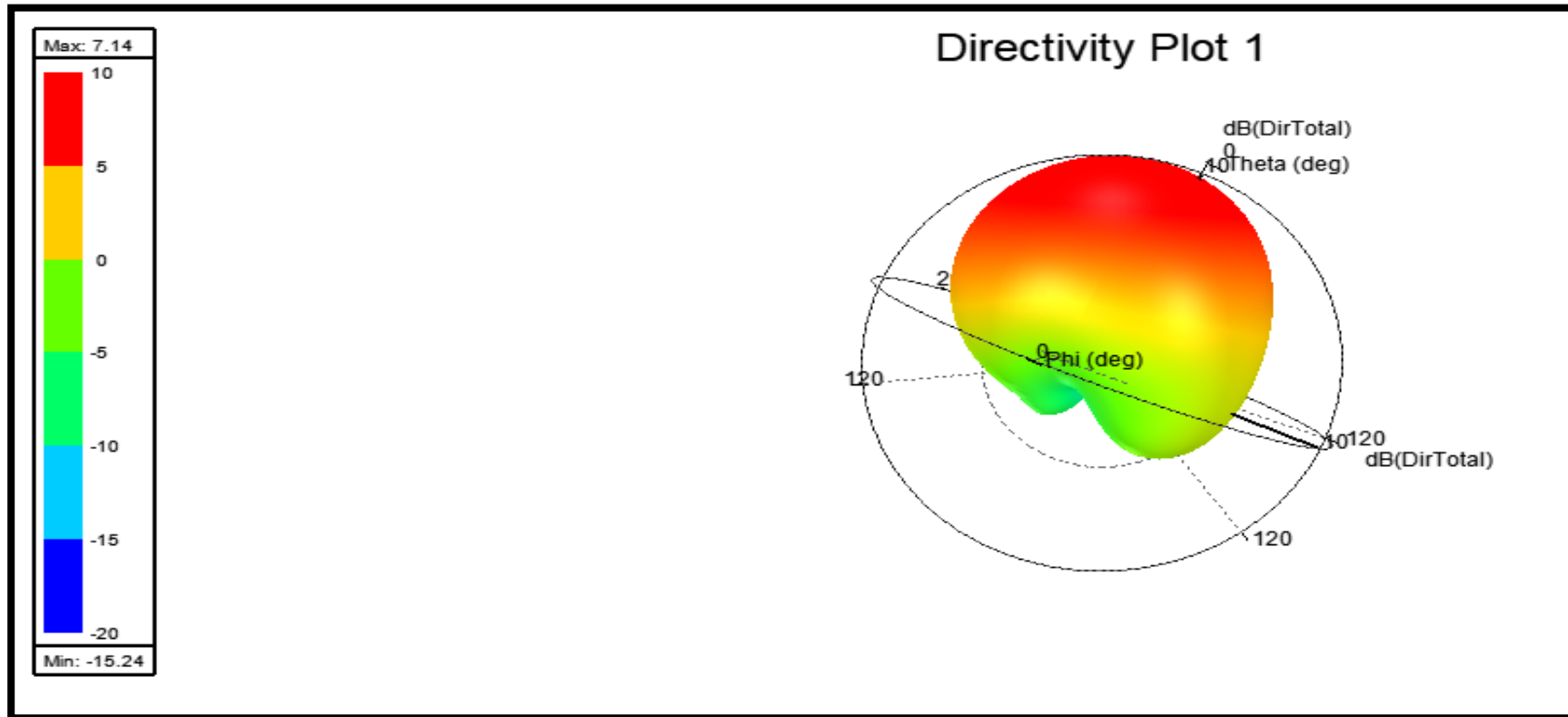


Fuente. El Autor

Como se evidencia, la directividad representa la densidad de potencia radiada en una dirección. Continuando con el análisis, se generó respectivamente la directividad de la antena propuesta. Ver ilustración 59. La misma ilustración

representa la relación entre una antena isotrópica con la ganancia de la antena Microstrip diseñada en donde se puede evidenciar la ganancia máxima de la antena Microstrip será de -7.14dB a un ángulo de 0°.

Ilustración 59. Directividad antena Microstrip Rectangular

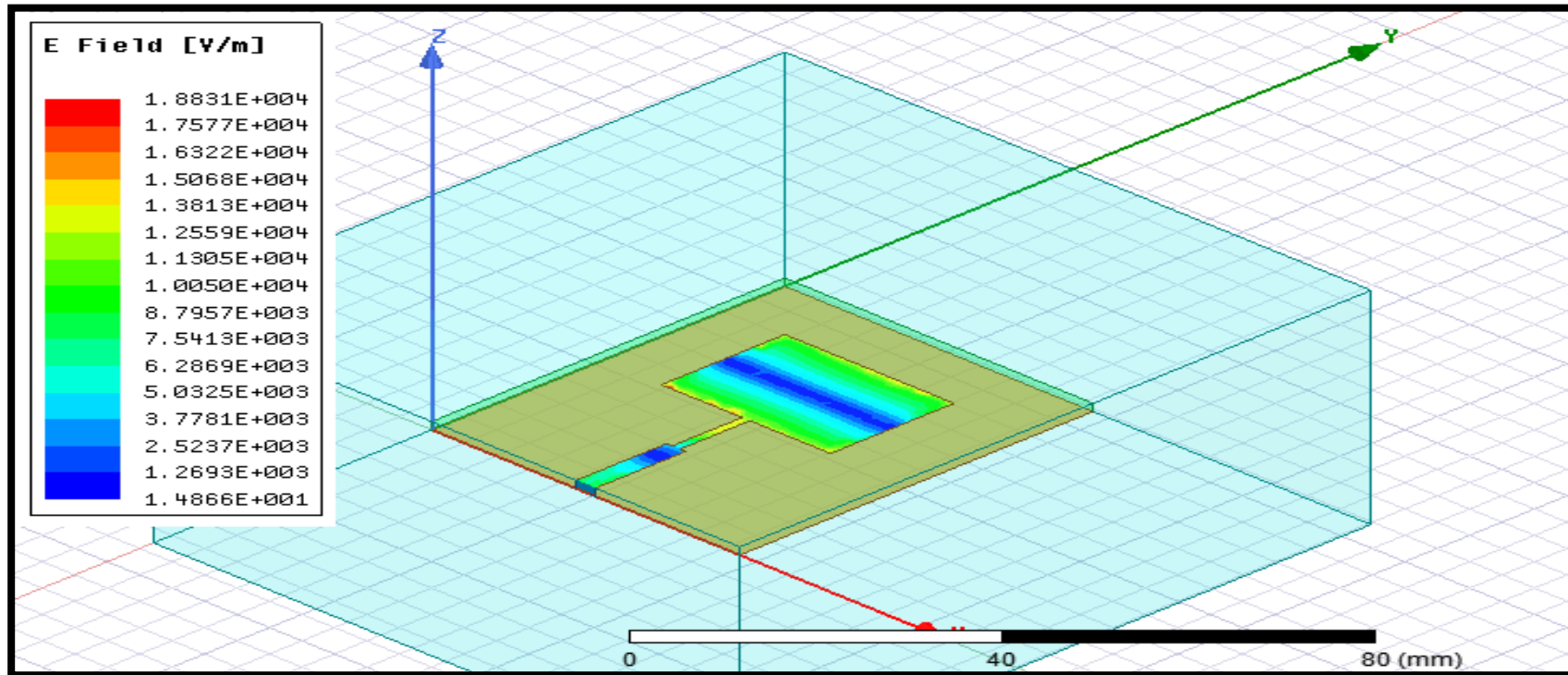


Fuente. El Autor

Posterior a ello se realiza la simulación del campo E y H respectivamente y se visualiza en las ilustraciones 60 y 61. En la misma ilustración se puede evidenciar el flujo del campo E sobre la antena Microstrip rectangular, en donde se puede

evidenciar la concentración máxima de campo E se genera en el rectángulo del elemento radiador. Adicional a ello se puede evidenciar en el abanico de colores el comportamiento del voltaje en determinadas áreas de la antenna Microstrip.

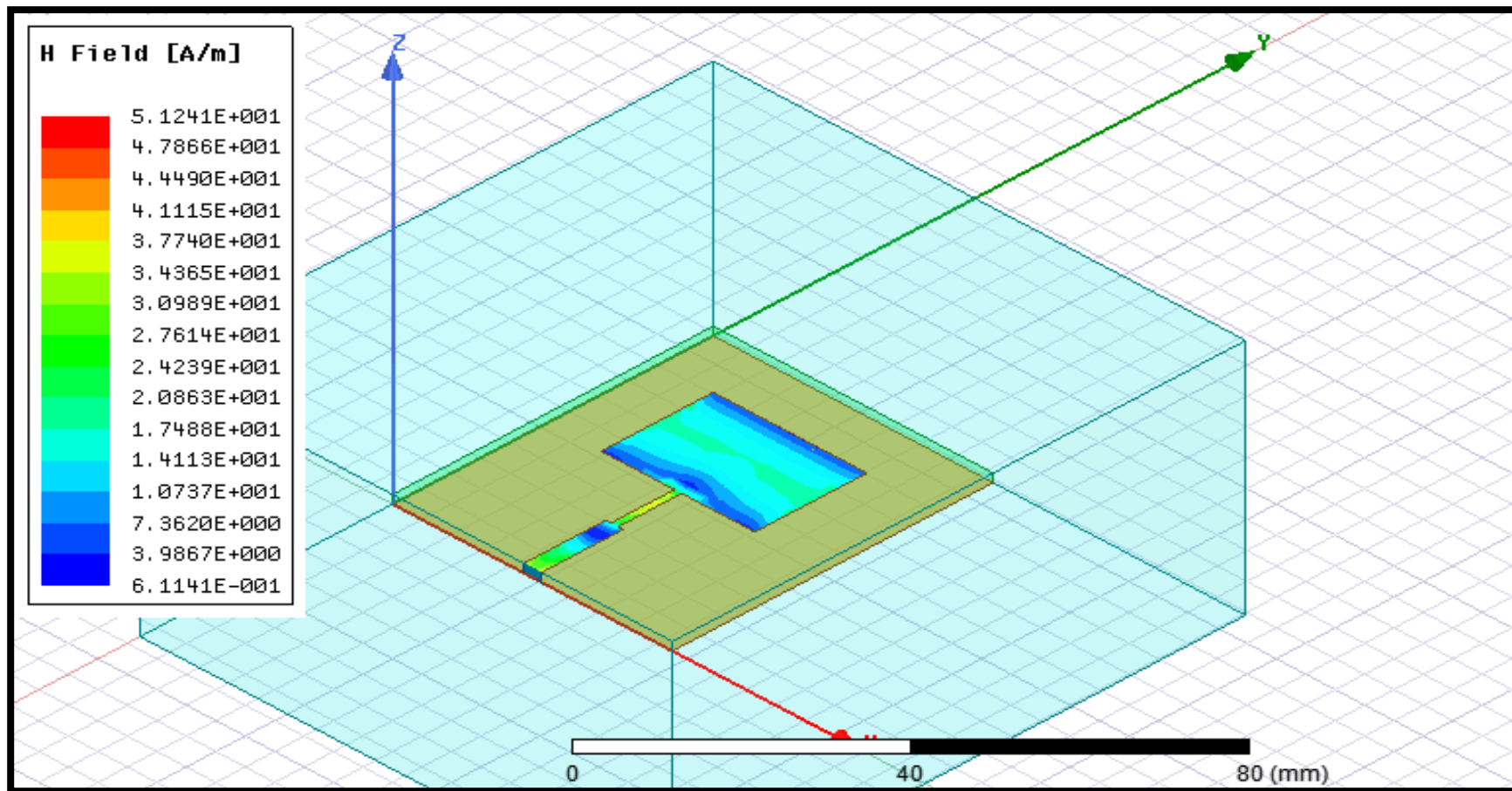
Ilustración 60. Simulación campo E antenna Microstrip



Fuente. El Autor

De igual forma para se realizó la simulación del campo H de la antenna propuesta y en ella se evidencia la distribución del campo H. La ilustración 61 describe la distribución de corriente que estará presente en el diseño de la antenna presentado.

Ilustración 61. Simulación campo H antena Microstrip

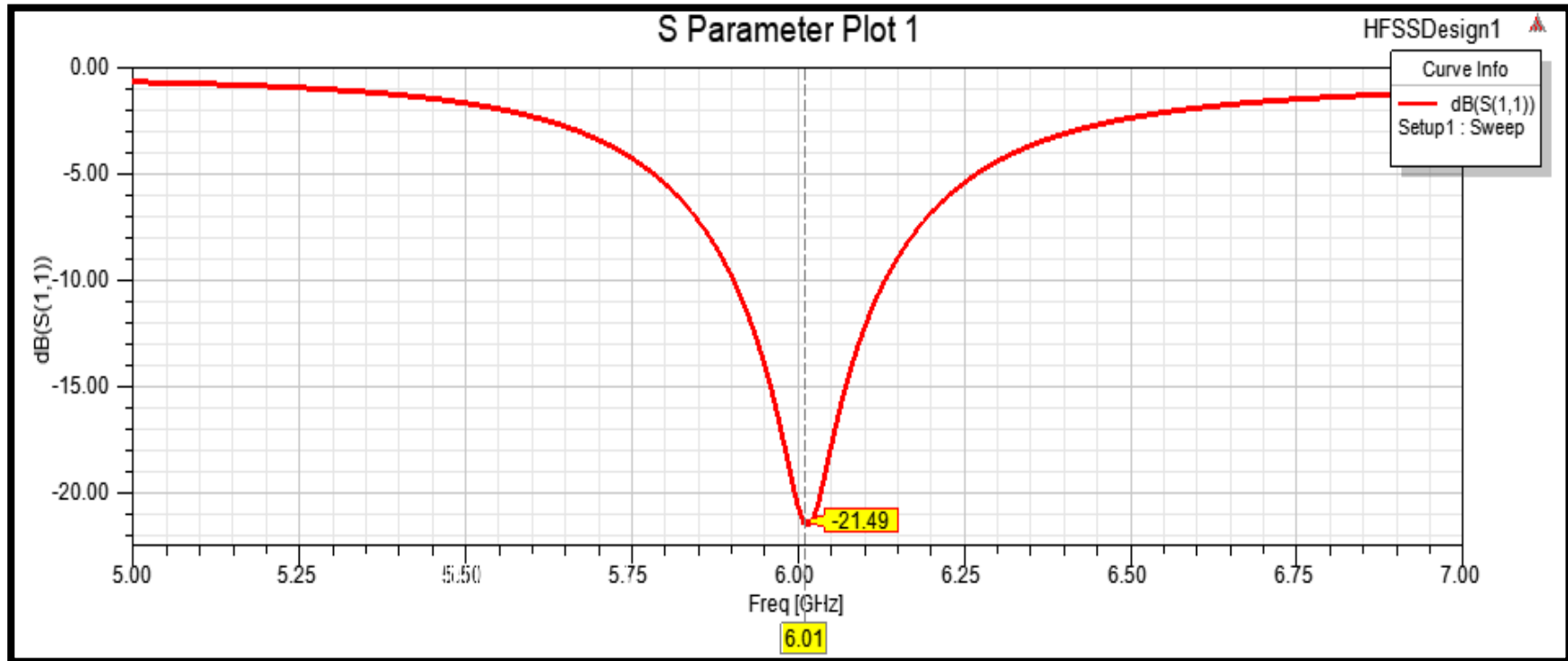


Fuente. El Autor

4.4.3.3 Resultados Antena circular 6 GHz sustrato FR4. El respectivo análisis de la antena Microstrip Circular permite evidenciar el parámetro S11 junto con la impedancia característica, patrón de radiación y directividad.

El parámetro de dispersión de la antena Microstrip diseñada para este tipo de radiador generó una resonancia en la frecuencia 6.01 GHz con una atenuación de -21.46dB, con esta ilustración se pueden analizar que el ancho de banda respectivo de la antena Microstrip será de 35 MHz. Esto de acuerdo con las pérdidas por retorno observadas en la misma ilustración considerando -10dB. Ver ilustración 62.

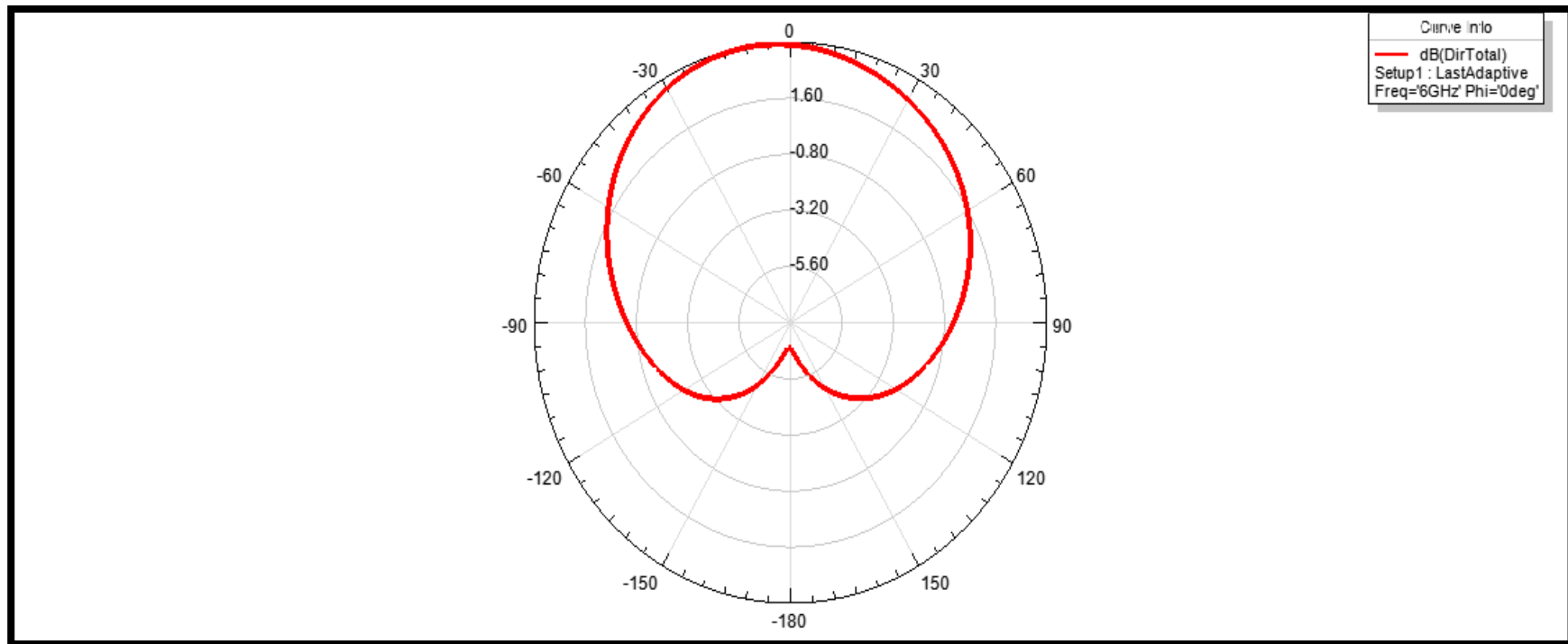
Ilustración 62. Parámetro S₁₁ antena Microstrip circular sustrato FR4



Fuente. El Autor

La ilustración 63 representa el patrón característico de las antenas Microstrip, como se mencionó en los capítulos anteriores este tipo de antena presenta una delgada capa del material conductor el cual será el parche radiador y por debajo de este se ubicará el sustrato dieléctrico, este sustrato permite que la radiación emitida por la antena se produzca hacia arriba del sustrato, generando un lóbulo principal y dos lóbulos secundarios o nulos. Lo que nos indica que este tipo de antena es poco directiva ya que presenta un lóbulo principal el cual se encuentra presente desde -90° hasta 90° .

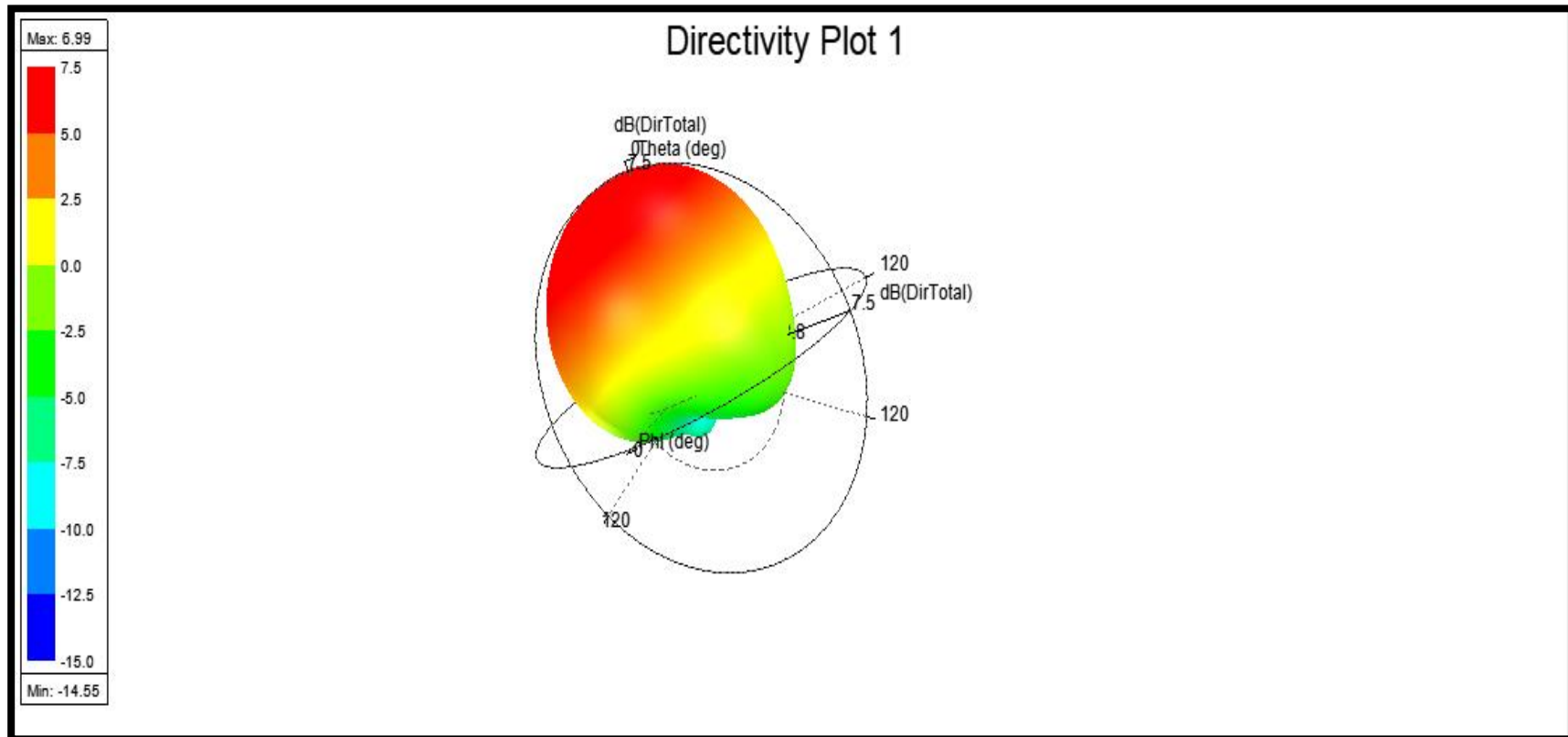
Ilustración 63. Patrón de radiación antena Circular



Fuente. El Autor

Respectivamente en la ilustración 64 se puede evidenciar la directividad de la antena propuesta, en donde se aprecia la potencia radiada y la dirección de la misma. La dirección de propagación de la antena de acuerdo a la ilustración será de 0° con un valor máximo de potencia radiado de 6.99 dB.

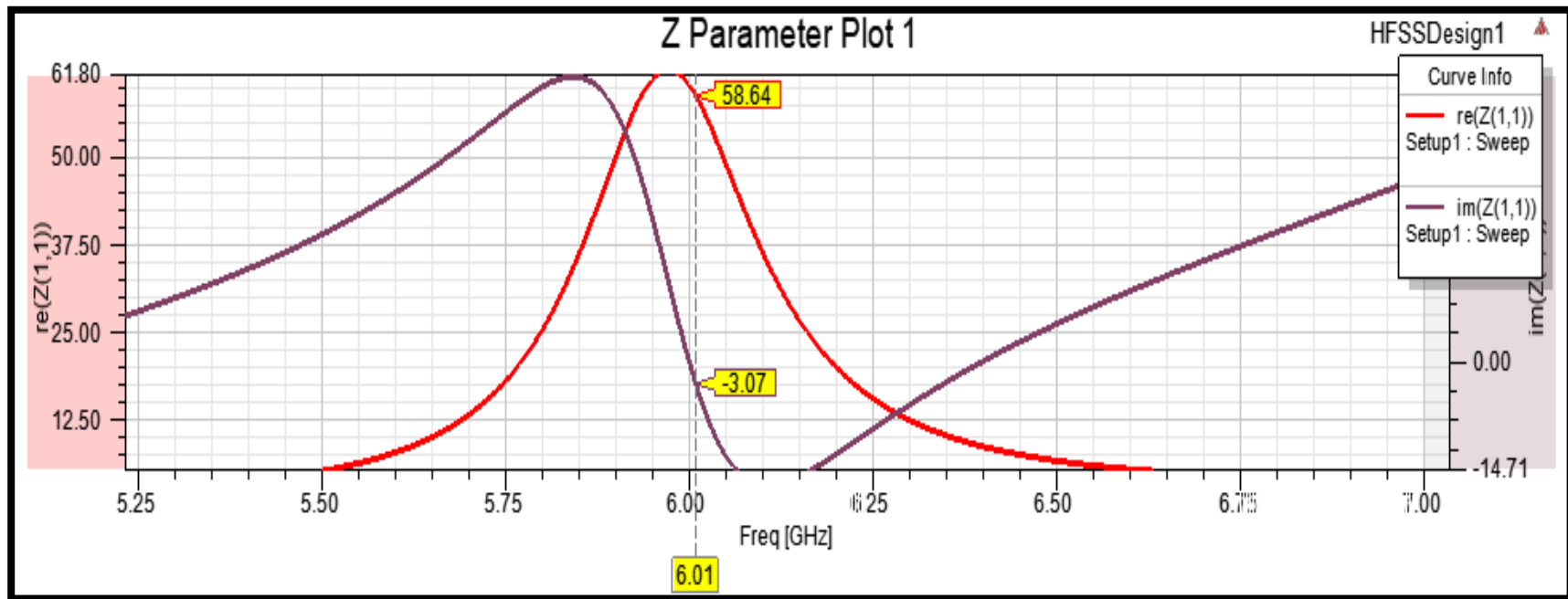
Ilustración 64. Directividad antena Rectangular



Fuente. El Autor

Para el tipo de antena circular con frecuencia de operación 6 GHz y sustrato de fabricación FR4 con constante dieléctrica de 4.4 se obtuvieron respectivamente 58.64 en su componente real y para el componente imaginario $-3.17j$. Ver ilustración 65. A pesar de tener un componente reactivo bajo como es el caso $-3.07j$, esto produce pérdidas de energía. Para mejorar los valores de la impedancia característica ANSYS HFSS permite realizar variación de las geométricas tales como largo y ancho del parche y línea de transmisión, variando estos valores se encontrarían valores de impedancia más cercanos al esperado.

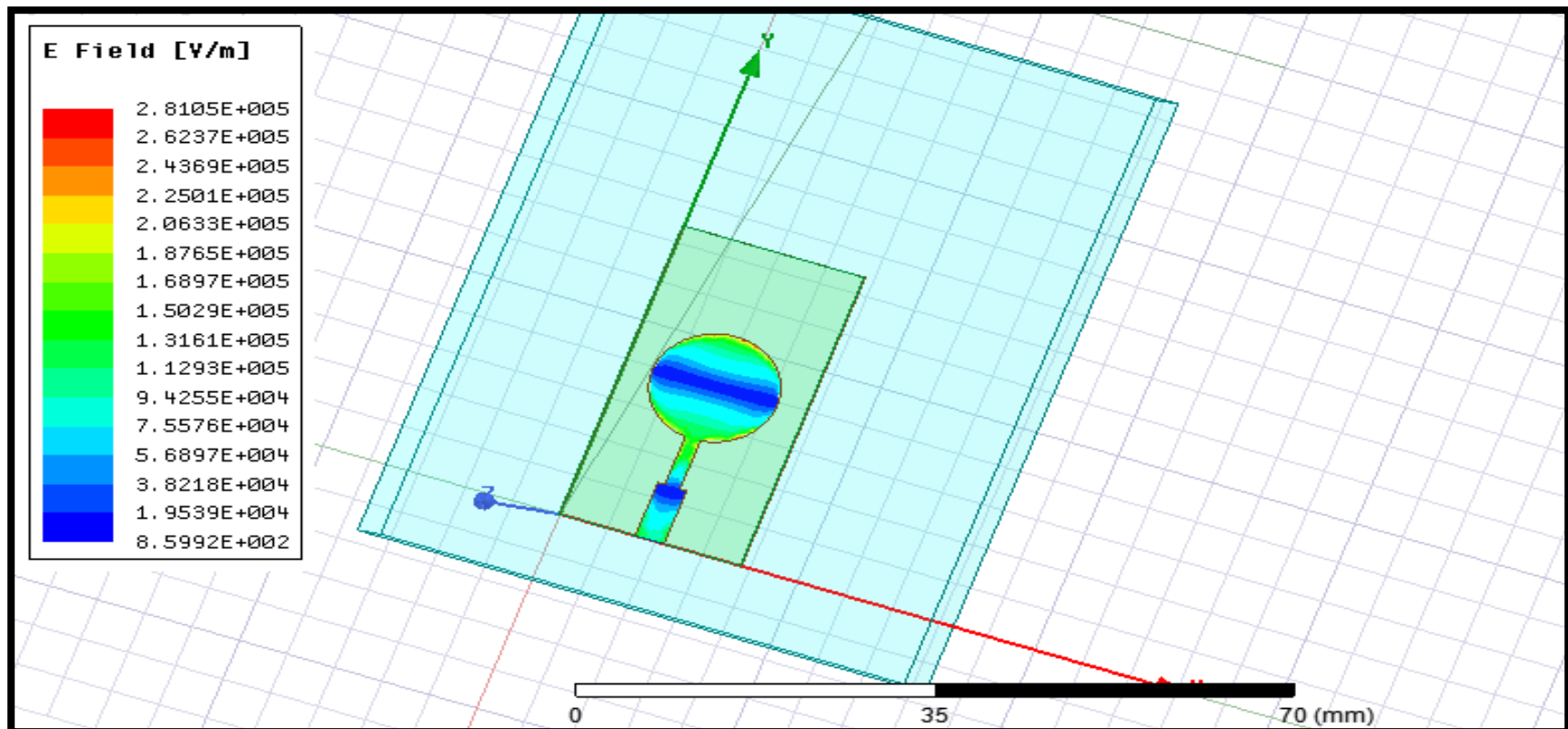
Ilustración 65. impedancia característica antena circular



Fuente. El Autor

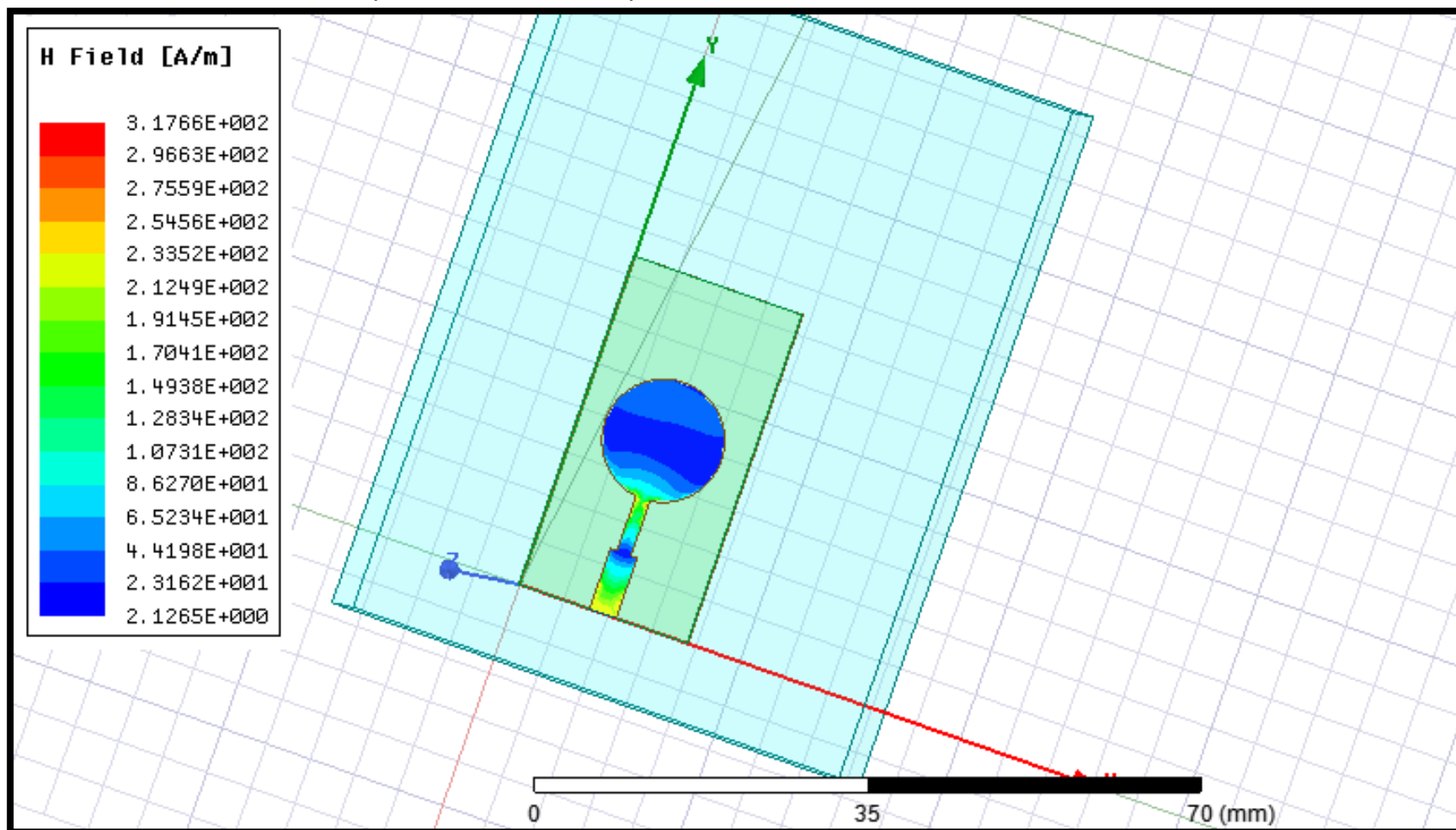
Por último, en las ilustraciones 66 y 67 se generaron respectivamente el campo E y H sobre la superficie del parche radiador, en donde por medio de una tabla de colores se pueden observar los rangos de V/m que se presentan para el tipo de antena Microstrip circular. Así como también se observan mediante colores la representación de la distribución del campo E y H, respectivamente.

Ilustración 66. Simulación campo E antena Microstrip Circular



Fuente. El Autor

Ilustración 67 . Simulación campo H antena Microstrip circular



Fuente. El Autor

Los resultados obtenidos anteriormente, presentaron las características generales de las antenas Microstrip rectangular y circular diseñadas, los parámetros generados tales como impedancia característica, patrón de radiación, directividad y flujo del campo E y H, permiten tener una perspectiva de la operación del tipo de antena, su acople frente a la fuente de alimentación, la frecuencia de resonancia, la relación entre una antena ideal y la dirección que tomaran las ondas electromagnéticas, y la distribución de energía de campo E y H para las superficies de las antenas. Sin embargo, como se evidencia en el cuadro 13, la impedancia característica la cual comprende un número real y un número complejo presento variación frente a los valores que se pretendían obtener, esta variación se generó debido a la frecuencia de resonancia del tipo de antena diseñada, adicional a ello la permitividad eléctrica y el tipo de material Rogers influyo en dicha variación. Por otro lado, como se observa en la columna (Parámetro dispersión S₁₁ dB) el resultado con el mismo sustrato tipo Rogers genero valores de 0 a -7.41dB, lo que a su vez influyo en la impedancia característica de la antepenúltima columna del cuadro 14.

A continuación, se presentan los valores finales que se generaron para cada uno de los diseños expuestos y propuestos, se relaciona los valores de impedancia característica, permitividad eléctrica, parámetro de dispersión y frecuencia calculada. Se puede analizar y seleccionar las antenas que presentaron mejores resultados en cuanto a impedancia característica, parámetro de dispersión S₁₁, respectivamente las antenas seleccionadas tienen geometría rectangular y circular las cuales operan a una frecuencia de 3.5 GHz y 6 GHz. Se pueden evidenciar los valores finales en el cuadro 14 remarcados con un rectángulo de color rojo.

Cuadro 14. Valores finales

Geometría	Frecuencia GHz	Frecuencia (GHz) Generada por ANSYS HFSS	Permitividad Eléctrica (ϵ_r)	Impedancia característica y valor imaginario $\Omega \mp j$	Parámetro dispersión S ₁₁ dB
Rectangular	3.5	3.4	3	95.8 - 49.5	-7.06
Rectangular	3.5	3.5	4.4	59.4 - 6.9	-19.16
Rectangular	4.5	4.4	3	77.7 - 51.	-7.41
Rectangular	4.5	4.2	4.4	71.7 - 8.1	-14.32
Rectangular	6.0	6.0	3	57.5 - 27.5	-7.13
Rectangular	6.0	6.1	4.4	57.5 - 27.5	-11.81
Circular	3.5	3.6	3	147.3 - 58.5	-5.11
Circular	3.5	3.5	4.4	78.1 - 21.8	-11.22
Circular	4.5	4.6	3	130.2 - 69.3	-5.20
Circular	4.5	4.5	4.4	74.6 - 29.2	-10.44
Circular	6.0	6.2	3	98.2 - 77.4	-5.48
Circular	6.0	6.0	4.4	58.6 - 3.0	-21.49

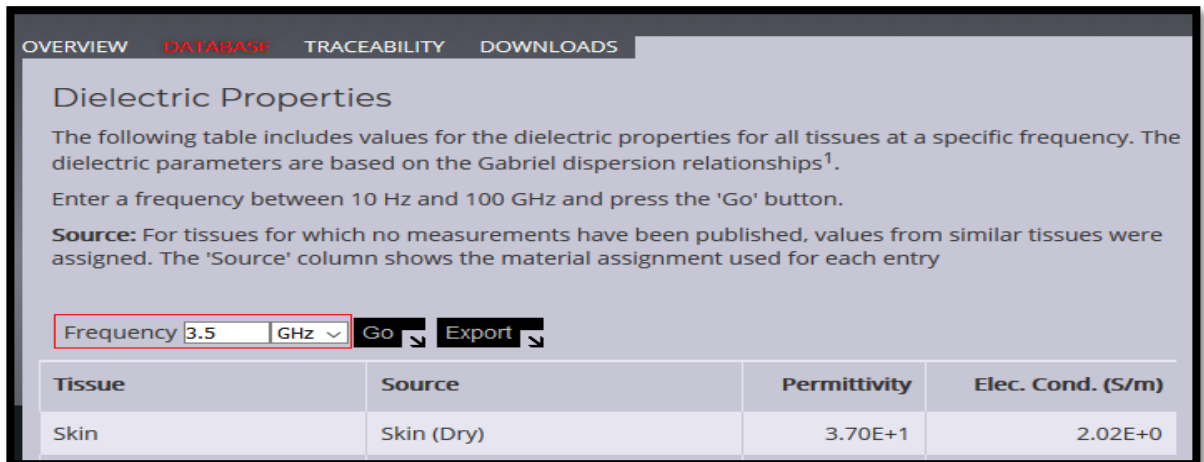
Fuente. El Autor

4.5. ANÁLISIS TASA DE ABSORCIÓN ESPECIFICA EN TEJIDOS HUMANOS TALES COMO EPIDERMIS Y DERMIS

Continuando con el desarrollo de los objetivos propuestos, se realizó el diseño de las diferentes capas de la piel, la cual comprende dermis y epidermis, las dimensiones de las capas fueron seleccionadas de acuerdo al Instituto Iberoamericano de cosmetología el cual menciona que el grosor de la epidermis se puede encontrar desde 0.4mm a 1.5mm, la dermis tiene un grosor de 4 mm, adicional a ello, la fundación para la investigación sobre las tecnologías de la información (“Foundation for Research on Information Technology”) indica⁶⁸ que la piel a una frecuencia de 3.5 GHz tiene una permitividad dieléctrica de 37, y para 6.0 GHz la permitividad será de 34.9, teniendo en cuenta lo anterior se procedió a diseñar y simular la piel, en donde esta comprende dermis y epidermis, el diseño se parametrizo teniendo en cuenta la permitividad dada la frecuencia de operación.

Para validar las propiedades dieléctricas del tejido de la piel (ver ilustración 68), se debe acceder a la URL citada y realizar el siguiente procedimiento, en el campo *Frequency* se debe digitar la frecuencia deseada, tal como se evidencia en la ilustración, posterior a ello se seleccionó el botón *Go* y por último realizar la búsqueda del tejido deseado, en este caso piel (Skin).

Ilustración 68. Propiedades dieléctricas piel



OVERVIEW DATABASE TRACEABILITY DOWNLOADS

Dielectric Properties

The following table includes values for the dielectric properties for all tissues at a specific frequency. The dielectric parameters are based on the Gabriel dispersion relationships¹.

Enter a frequency between 10 Hz and 100 GHz and press the 'Go' button.

Source: For tissues for which no measurements have been published, values from similar tissues were assigned. The 'Source' column shows the material assignment used for each entry

Frequency GHz

Tissue	Source	Permittivity	Elec. Cond. (S/m)
Skin	Skin (Dry)	3.70E+1	2.02E+0

Fuente. Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues Version 2.5.{En línea}. [citado el 29 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: (<https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>).

A continuación, se pueden validar las características principales tenidas en cuenta en diseño de la piel, en donde se evidencia la frecuencia de operación (GHz), permitividad (ϵ_r) y tamaño de la piel (cm^2). Ver cuadro 15.

⁶⁸ Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues Version 2.5.{En línea}. [citado el 29 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: (www.itis.ethz.ch/database).

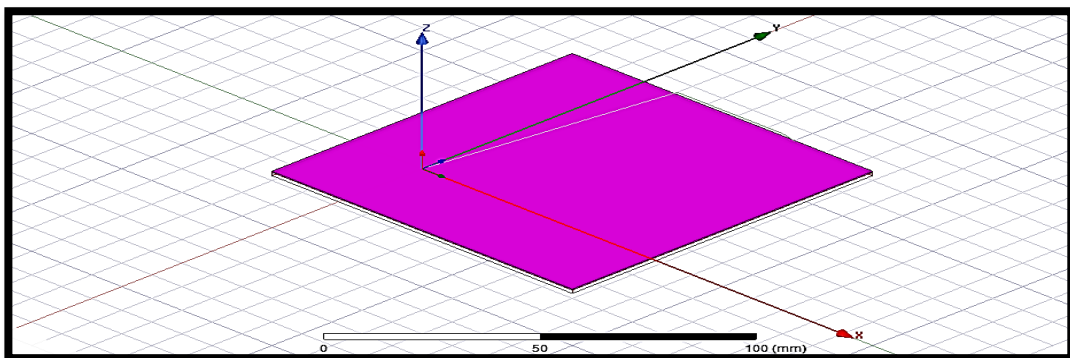
Cuadro 15. Características diseño piel

Frecuencia GHz	Permitividad ϵ_r	Tamaño cm^2
3.5	37.0	10
6.0	34.9	5

Fuente. El Autor

En las ilustraciones 69 y 70 se puede evidenciar el resultado final obtenido del diseño de las capas de la piel (dermis y epidermis), la parametrización respecto a la permitividad y frecuencia de operación correspondiente a la antena Microstrip rectangular.

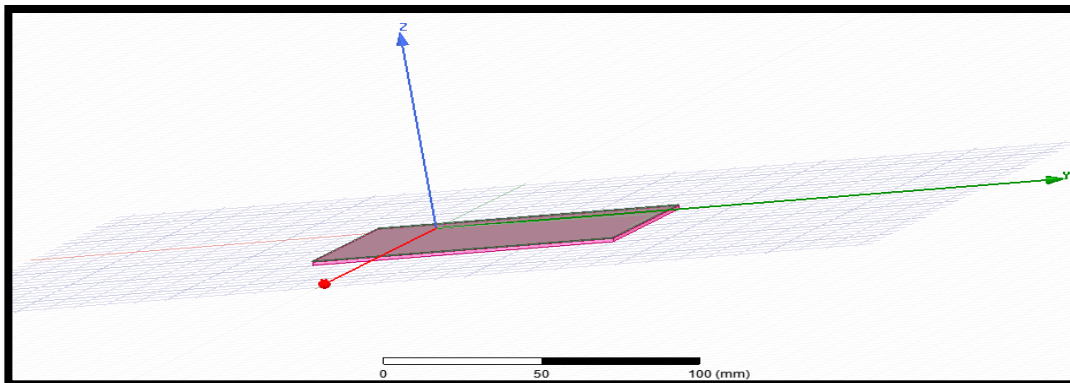
Ilustración 69. Dermis y epidermis vista 1



Fuente. El Autor

En la imagen 70 se puede observar desde otro ángulo las capas epidermis y dermis diseñadas.

Ilustración 70. Dermis y epidermis vista 2



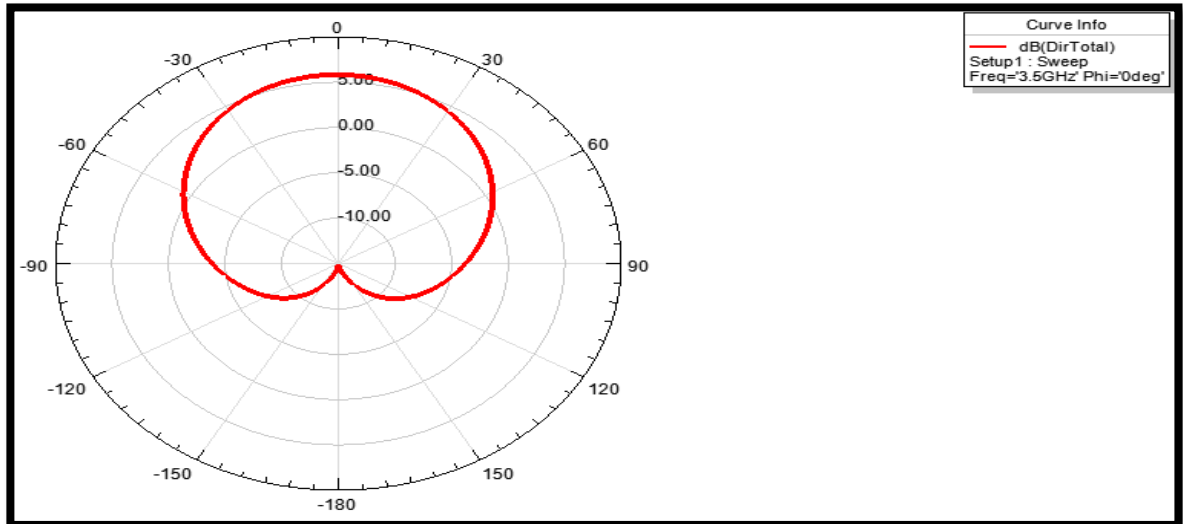
Fuente. El Autor

4.5.1 Medidas S.A.R. antenas Microstrip rectangular

El procedimiento que se detalla a continuación presenta la tasa de absorción específica obtenido en la antena Microstrip rectangular sobre las capas de la piel (epidermis y dermis) a una distancia de separación de 0.2 cm sobre las capas de la piel, inicialmente se puede evidenciar el patrón de radiación generado sobre el tejido humano diseñado.

En la ilustración 71, se puede evidenciar el patrón de radiación de la antena Microstrip rectangular con frecuencia de operación de 3.5 GHz generado sobre las capas de la piel, en donde se puede observar un lóbulo principal el cual presenta una ganancia máxima de 5dB en el ángulo 0°, adicional a ello se generaron 2 lóbulos direccionados en -120° y 120°, con este grafico representativo de las antenas Microstrip se analiza la poca directividad que se presentan para esta antena.

Ilustración 71. Patrón de radiación antena Microstrip Rectangular



Fuente. El Autor

En la ilustración 72, se puede evidenciar la tasa de absorción específica generada para las capas de la piel (epidermis y dermis), la antena Microstrip rectangular se ubica respectivamente con el sustrato de fabricación el cual presenta una permitividad eléctrica (ϵ_r) de 4.4 y una frecuencia de operación de 3.52 GHz, a su vez las capas de la piel presenta (ϵ_r) de 37.0, y un tamaño de 10 cm^2 .

La separación entre el sustrato FR4 y las capas de la piel es de 0.2 cm, el resultado generado permite analizar la cantidad de absorción que se obtendrá para el tejido humano. En donde el color rojo representara los valores máximos de absorción, el color verde la absorción media y el azul la absorción mínima que se presenta en las capas de la piel.

La antena Microstrip presenta tres secciones las cuales son línea de transmisión, adaptador lambda cuartos y el parche rectangular, los cuales serán nombrados sección 1, 2 y 3 respectivamente. Los valores máximos de absorción se presentaron en la unión de la sección 2 y 3 (adaptador de lambda cuartos y el parche rectangular), esto se interpreta como la sección en donde se produce la transferencia de energía entre la sección 2 a la 3. Así mismo se evidencia que la sección 3 presenta una absorción media y por último la sección 1 presenta la absorción mínima del tejido de la piel. Como se observa en la misma ilustración la tasa de absorción específica se presentó en las dos capas de la piel epidermis y dermis respectivamente. A continuación, se presentan los valores S.A.R. generados sin notación de científica. Ver cuadro 16.

Cuadro 16. Antena Rectangular S.A.R Epidermis y dermis

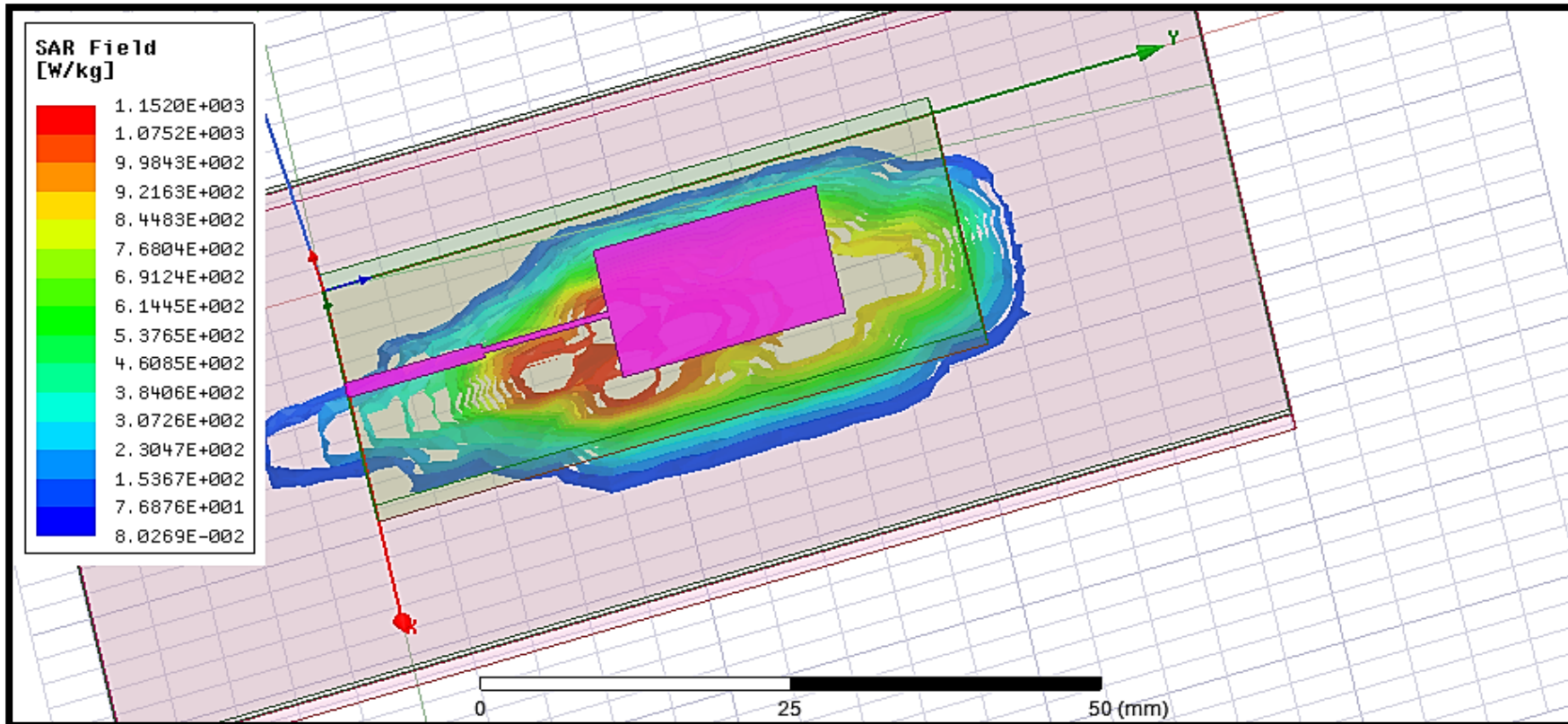
S.A.R. epidermis y dermis W/Kg	
	1,0042
	1,0021
	1,0471
	1,0454
	1,0436
	1,0416
	1,0394
	1,0369
	1,0342
	1,0311
	1,0272
	1,0227
	1,0168
	1,0086
	1,0206
	0,9591

Fuente. El Autor

Respectivamente para la Unión internacional de las telecomunicaciones el valor de S.A.R. máximo en extremidades es de W/Kg. De acuerdo con los datos evidenciados en el cuadro anterior y a las recomendaciones generadas por la comisión federal de comunicaciones en donde indican los valores de S.A.R. aceptables para el cuerpo humano, los cuales se encuentran en rangos de 0 a 1.6W/Kg, esto para Estados Unidos y 0 a 2 W/Kg para Europa.

Con lo anterior, se evidencia que la antena Microstrip se encuentra entre los rangos permitidos por la comisión federal de comunicaciones de Estados Unidos y la Unión internacional de telecomunicaciones.

Ilustración 72. Antena Microstrip Rectangular S.A.R. generado en capas de la piel epidermis y dermis.

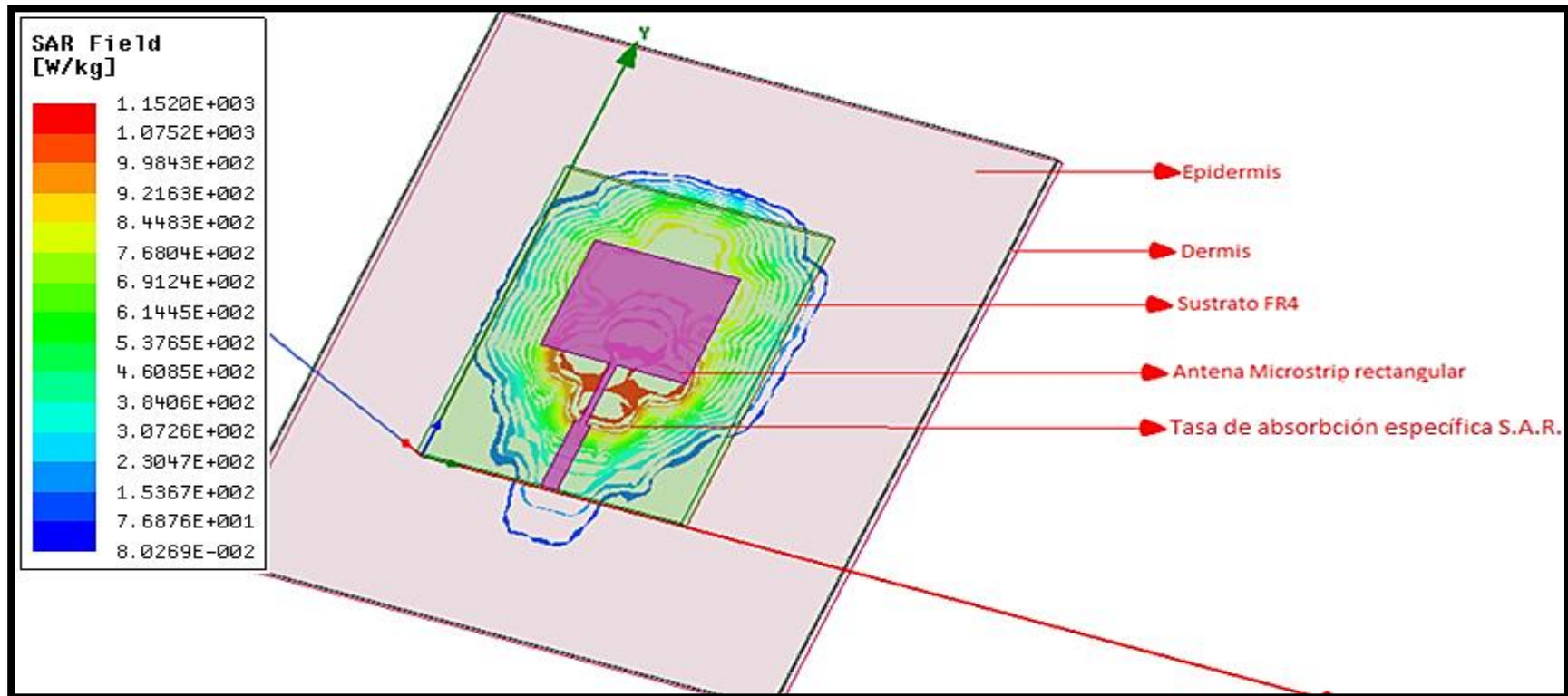


Fuente. El Autor

Los resultados obtenidos anteriormente evidencian la cantidad de radiación que será absorbida por los tejidos de la piel (epidermis y dermis), para la antena Microstrip rectangular la piel diseñada comprendió 10 cm^2 , la ubicación de la antena se realizó sobre 0.2 cm , con lo anterior el valor máximo absorbido por las capas de la piel fue de 1.0471 , el promedio del valor S.A.R fue 1.0237 .

En la ilustración 73 se puede observar los componentes que se tuvieron en cuenta para el diseño y simulación de la antena Microstrip rectangular sobre el tejido humano, en la ilustración mencionada se puede validar directamente las capas de la piel diseñadas, sustrato FR4, geometría del elemento radiador y por último la tasa de absorción específica S.A.R.

Ilustración 73. Antena Microstrip rectangular medición S.A.R. sobre capas de la piel (epidermis y dermis)

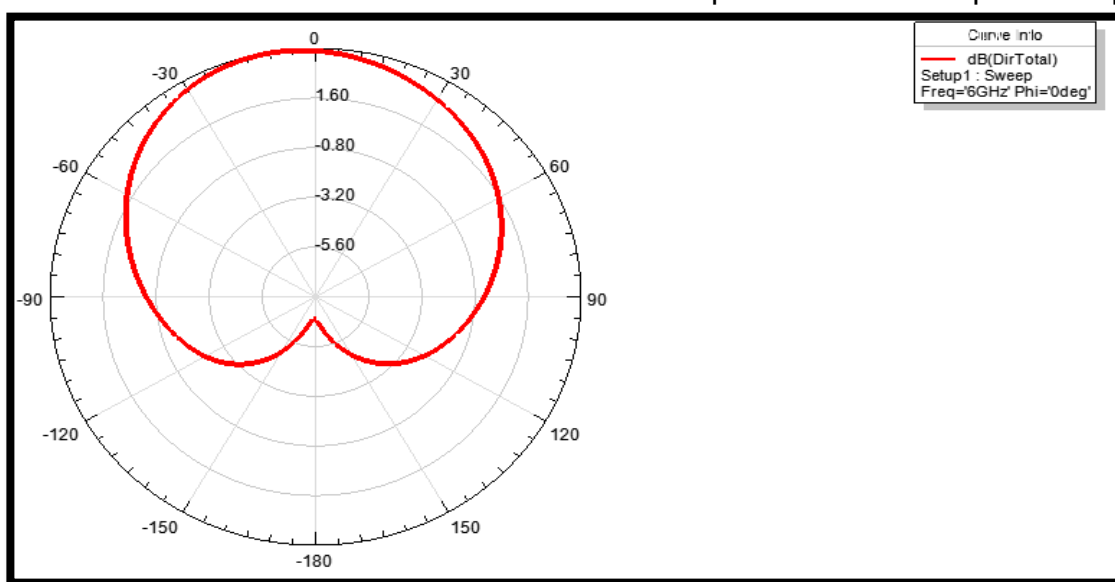


Fuente. El Autor

4.5.2 Medidas S.A.R. antena Microstrip circular

Continuando con el análisis respectivo, se utilizó el diseño de la epidermis y dermis mencionado en el capítulo anterior, posterior a ello se evaluó la tasa de radiación específica sobre las capas de la piel y patrón de radiación. Ver ilustración 74. El patrón de radiación generado presenta un lóbulo principal con una radiación máxima de 6.99 dB en un ángulo de 0°. De acuerdo con la ilustración se evidencia que es una antena poco directiva y con poca ganancia.

Ilustración 74. Patrón de radiación antena Microstrip circular sobre capas de la piel



Fuente. El Autor

En la ilustración 75, se puede evidenciar la tasa de absorción específica sobre el tejido de la piel el cual comprende las capas epidermis y dermis, las características de la antena Microstrip son: frecuencia de operación de 6.01 GHz, permitividad eléctrica del sustrato 4.4, (ϵ_r) de las capas de la piel 34.9 y tamaño del tejido humano de 5 cm^2 .

A continuación, se presentan los valores del S.A.R generados para el tejido de la piel, en donde el color rojo representara los valores máximos de absorción, el color verde la absorción media y el azul la absorción mínima que se presenta en las capas de la piel. Ver cuadro 17. Los valores que se describen en el cuadro 17 corresponden a los mismos valores generados por el simulados ANSYS HFSS a diferencia que los valores mostrados a continuación están expresados sin notación científica.

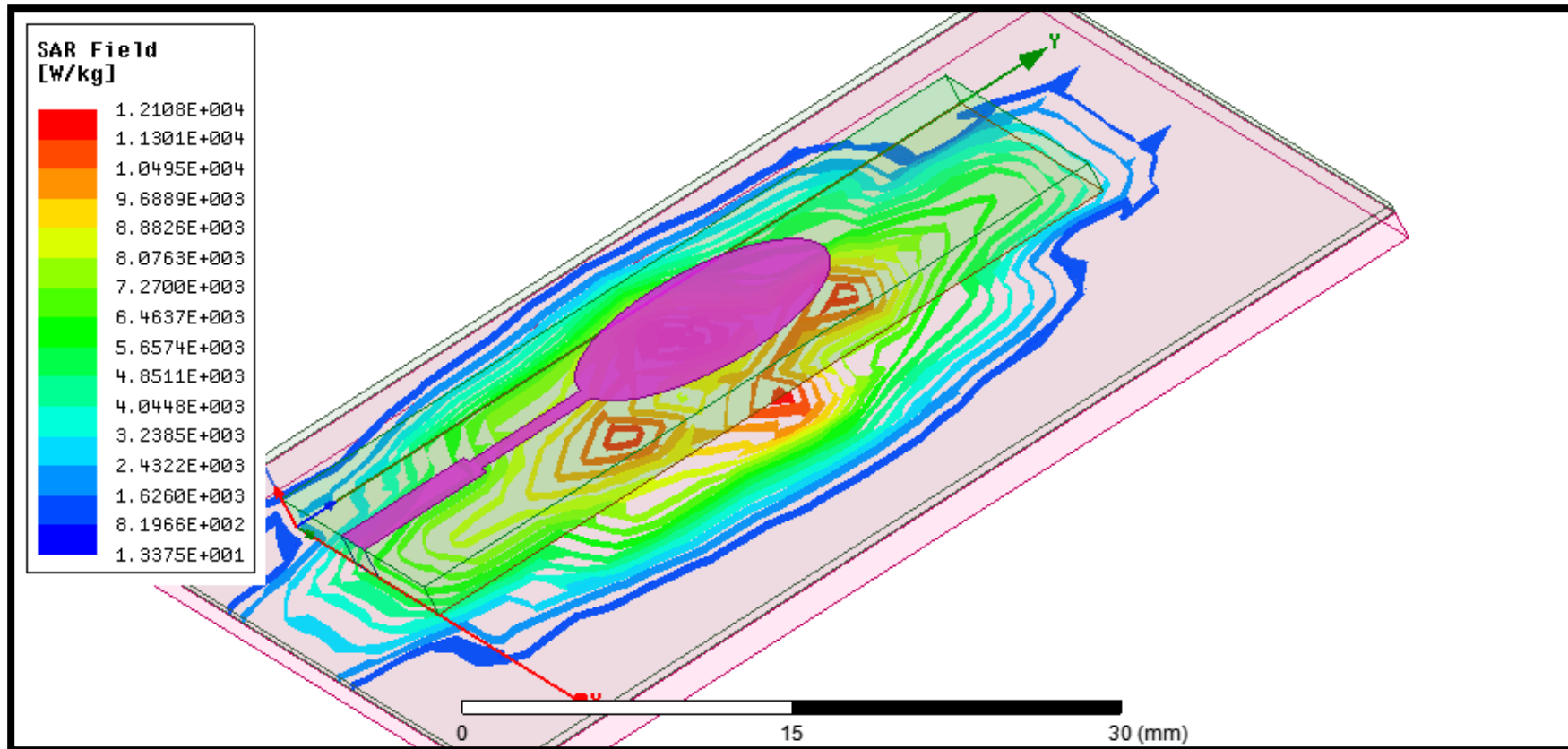
Cuadro 17. Antena Circular S.A.R Epidermis y dermis

S.A.R. epidermis y dermis W/Kg	
	1,0076
	1,0049
	1,0019
	1,0705
	1,0677
	1,0646
	1,0613
	1,0575
	1,0533
	1,0485
	1,0428
	1,0358
	1,0270
	1,0146
	1,0429
	1,0029

Fuente. El Autor

Como se ilustra en el cuadro anterior los valores se encuentran dentro del rango de aceptación para el uso de dispositivos electrónicos cerca al cuerpo humano.

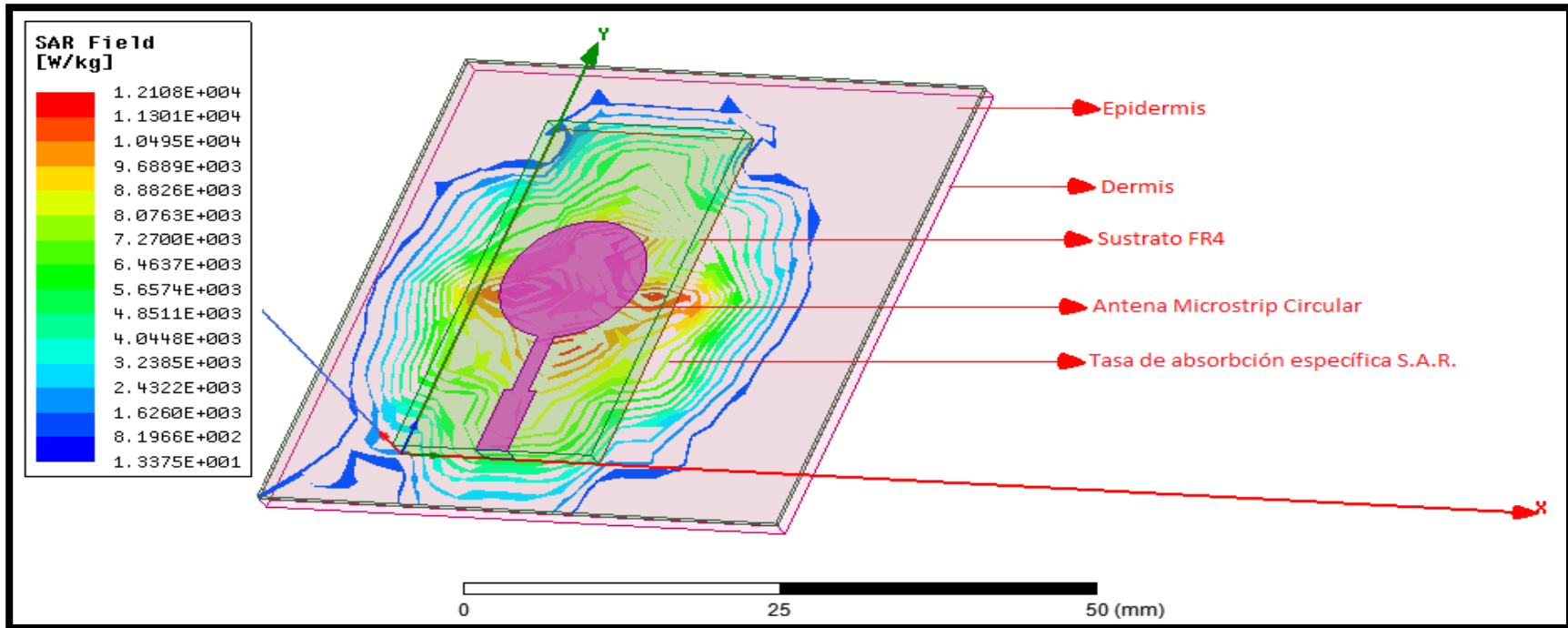
Ilustración 75. Antena Microstrip Circular S.A.R. generado en capas de la piel dermis y epidermis



Fuente. El Autor

El promedio del S.A.R generado fue 1,0377 para el tejido de la piel de tamaño de 5 cm^2 , para una antena Microstrip de frecuencia de operación de 6.01 GHz, lo que permite identificar una absorción mayor que el diseño de la antena Microstrip.

Ilustración 76. Antena Microstrip rectangular medición S.A.R. sobre capas de la piel (epidermis y dermis)



Fuente. El Autor

Las características principales de las antenas rectangular y circular fueron desarrolladas bajo las mismas condiciones que los parámetros anteriores. Ver anexo 5.

CONCLUSIONES

La consulta generada en las bases de datos EBSCO, ProQuest, Science Direct, Scopus e IEEE permitió corroborar y evidenciar en un lapso de 5 años (2015 al 2019) las tendencias de diseño de antenas con geometrías rectangular y circular, adicional a ello el autor Munir, A; presento el mayor número de publicaciones frente al tópico antenas Microstrip. Por último, se evidencio que los países con mayor número de publicaciones acerca de este tema se encuentran ubicados en el continente asiático tales como India, Malasia y China.

El cálculo de diseño realizado para las antenas Microstrip rectangular y circular con super altas frecuencias tales como (3.5, 4.5 y 6.0 GHz) y la permitividad eléctrica del material permitió analizar las variaciones de tamaño que se presentan en estas geometrías, donde las antenas rectangulares con mayor frecuencia (6 GHz) y mayor número de permitividad eléctrica(4.4) presentaron una reducción en el tamaño de la antena rectangular en las variables (W) un 86.08 % y la variable (L) con una reducción del 82.82% frente al mismo tipo de antena pero con una permitividad de 3, así mismo para las antenas Microstrip con geometría circular presento una reducción en el radio de la antena del 83.87%.

ANSYS HFSS permitió generar diseños de antena Microstrip rectangular y circular, mediante la simulación y el método de momentos (MoM), se generaron las características de rendimiento de las antenas tales como (impedancia característica, parámetros S11, patrón de radiación y directividad) con lo anterior se evidencio que este tipo de antenas Microstrip rectangular y circular presento una ganancia máxima de 7,14dB para el diseño rectangular y para la circular presento 6.99 dB, con lo anterior se evidencia que este tipo de antenas no son directivas.

Para la simulación el sustrato FR4 con ($\epsilon_r = 4.4$) presento valores de impedancia característica ($50\Omega \mp 0j$) más cercanos al calculado $59.4 \Omega - 6.9j$ y $58.6 \Omega - 3j$, sin embargo, para el sustrato Rogers con ($\epsilon_r = 3$) los resultados generados para la impedancia característica fueron de $57.5 \Omega - 27.5j$, lo que indica un desacople entre la fuente generadora y la línea de transmisión.

Las ilustraciones realizadas mediante el simulador ANSYS HFSS permitió generar y analizar la cantidad de S.A.R (tasa de absorción especifica) en tejidos humanos como la piel la cual comprende las capas epidermis 0.4 mm y la dermis 1.4mm de grosor respectivamente. Las antenas Microstrip rectangular y circular con frecuencias de operación de 3.52 GHz y 6.01 GHz fueron ubicadas sobre las capas de piel a 0.2 cm de distancia, para la geometría rectangular se generaron rangos de absorción especifica desde 0,9591 W/Kg hasta 1.0471 W/Kg y para la antena circular los rangos generados fueron desde 1.0029 W/Kg hasta 1.0705 W/Kg, dado lo anterior se evidencio un aumento en el promedio del S.A.R en la frecuencia de 6.01 GHz un 1,35%.

Los valores S.A.R mencionados anteriormente se encuentran dentro de los rangos recomendados por la comisión federal de comunicaciones de los Estados Unidos, donde indican que el valor máximo presente en dispositivos electrónicos debe ser de 1.6 W/Kg, adicional a ello la UIT indica que la absorción debe ser de 4W/Kg por lo anterior el diseño de las antenas presentado en el capítulo 3 de este trabajo se encontrarían dentro del valor aceptado por estas organizaciones.

RECOMENDACIONES FUTURAS

- En el desarrollo del objetivo 2 se observa que se tuvieron en cuenta frecuencias desde 3.5, 4.5 y 6 GHz, por lo cual se recomienda realizar el diseño y cálculo con geometrías diferentes a las expuestas en este trabajo tales como triangular y espiral, sustratos de fabricación que comprendan permitividades eléctricas mayores a las presentadas en este documento.
- Diseñar y simular las geometrías de antenas rectangular y circular en un software de simulación el cual permita importar archivos con extensiones tales como dwg y dxf, los cuales son generados en ambientes de modelado CAD.
- Con el objetivo de validar y comprobar los resultados obtenidos en la simulación, se deben fabricar y medir mediante un analizador vectorial de redes los dos diseños de antena Microstrip rectangular y circular diseñados y calculados en este documento.
- Se recomienda generar una nueva simulación de la absorción específica contemplando diferentes distancias entre la antena Microstrip rectangular y circular.
- Se recomienda presentar los resultados del último capítulo a un especialista (dermatólogo) el cual pueda corroborar y analizar los rangos de valores del S.A.R con el fin de identificar las posibles causas que podría generar el uso de las antenas Microstrip rectangular y circular sobre la piel.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia. {En línea} {22 de abril del 2019}. Disponible en: (<http://www.evaluamos.com/pdf/ConsultaPublica5GxANE.pdf>)

AGUIRRE, Aníbal, Norberto Dalmas Di Giovanni, and Tec Javier García Díaz. Radiación no ionizante de sistemas de telefonía celular móvil: la percepción de la población, la disparidad de los estándares y el monitoreo de gran escala (2016). {En línea}. Fecha {20 marzo 2019}. Disponible en: (http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/Informe_sobre_Radiacion_de_Telefonia_Movil_Celular.pdf)

ALTAIR, hyperworks. Antenna Design. {En línea}. {29 de marzo de 2019}. Disponible en internet: (https://www.terabyte.co.jp/Hyper/supprt_platform.pdf).

ARTERO, Torrente, Oscar. Arduino Curso práctico de formación. Primera edición. Madrid: Alfaomega, 2013, {En línea} {15 abril 2019} Disponible en (<https://books.google.com.co/books?isbn=8494072501>).

ÁLVAREZ HERRERA, Omar Ferney. Análisis comparativo de diversas técnicas de miniaturización de antenas parche en la banda PSC (1,9 GHz). Bogotá, 2014, 65-70p. Trabajo de Grado (Departamento Electrónica). Universidad Pontificia Javeriana. Facultad de ingeniería.

BALANIS, Constantine. Antenna theory, analysis and design. 3ra Edition. New Jersey: Wiley –Interscience, 2005, {En línea} {2 de marzo de 2019} Disponible en (<https://books.google.com.co/books?isbn=1118585739>).

BALSECA PAREDES, Lorena Elizabeth. Análisis y evaluación de receptor de alta frecuencia para su utilización en redes integradas de quinta generación (5G). Chimborazo. 2019, 4-16p. MS thesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

BETANCUR, Leonardo. Redes de área corporal. Una perspectiva al futuro desde la investigación. En: Revista sistemas y telemática. Vol.; 9. No 16 (Dec-Ene. 2011); p.12-16.

CORPORATION ROGERS, RO3003. {En línea}. {30 de noviembre de 2019}. Disponible en internet: (<https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivitysolutions/english/data-sheets/ro3000-laminate-data-sheet-ro3003----ro3006----ro3010----ro3035.pdf>).

DESCHAMPS, Georges A. "Microstrip microwave antennas." Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, oct.

1953. {En línea} Fecha {20 marzo 2019}. Disponible en: (<https://ci.nii.ac.jp/naid/20001628543/>)

ETXEONDO, Villar, and Víctor Javier. Diseño antena Microstrip de ranura y antena de parche con geometría fractal. 2012, p 16.

EVANS, Dave. Internet de las cosas. Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. {En línea}. {26 de febrero de 2019} disponible en: (https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf)

EVERLET, Álvaro, and PASTOR, Javier. "Introducción al Internet de las cosas." Construyendo un proyecto de IOT. {En línea}. {28 marzo de 2019} disponible en: (https://www.altairsmartworks.com/newFrontend/img-carriots/press_room/Construyendo_un_proyecto_de_IOT.pdf)

FERNÁNDEZ, Gustavo Escudero, and Ildelfonso Castro Angulo. "Exposición poblacional a campos electromagnéticos de radiofrecuencias en la localidad histórica y del Caribe Norte de Cartagena de Indias. En: Teknos revista científica Vol.; 4. No 2 (2008); p. 18-20.

Federal Communications Commission. Specific Absorption Rate (SAR) for Cellular Telephones. {En línea}. [citado el 29 de marzo de 2019] Disponible en internet (<https://www.fcc.gov/general/specific-absorption-rate-sar-cellular-telephones>).

GARCÍA, Lorenzo, Marcos, et al. Electrónica, RA-MA Editorial, 2014. ProQuest Ebook Central, {En línea} {7 abril 2019} Disponible en (<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliocaticasp/detail.action?docID=3229512>).

GORDÓN CORRALES, Andrea Lizeth. Diseño, simulación e implementación de una antena Microstrip Yagi para operar en la banda de 5.8 GHz. Quito, 2016., p 12-15. BS thesis.

HUIDORO, José. Antenas de telecomunicaciones. {En línea}. {24 de febrero de 2019}. Disponible en (https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf).

ITU-T K.52 - SERIES K: protection against interference, 2018, p. 2 disponible en (<https://www.itu.int/rec/t-rec-k.52-201801-i/en>)

JAUME, Anguera, and PÉREZ Antonio. "Teoría de Antenas." Guía de Estudio. La Salle Ingeniería i Arquitectura. Universitat Ramón Llull 2000, p.20-25.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES, Advance Design System. {En línea}. [29 de marzo de 2019] Disponible en (<https://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system>).

K. N. Paracha et al., "A Low Profile, Dual-band, Dual Polarized Antenna for Indoor/Outdoor wearable Application {En línea} Disponible en (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8632896>).

LEE, Kai Fong. A personal overview of the development of microstrip patch antennas. {En línea} Fecha {20 marzo 2019}. Disponible en: (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7696053/>)

LIN, James C. "The Curious Case of the IARC Working Group on Radio Frequency Electromagnetic Fields and Cell Phones [Health Effects]." E n: IEEE Microwave Magazine 12.6 (2011): p 32-35.

MUTASHAR, Saad, et al. "Analysis and optimization of spiral circular inductive coupling link for bio-implanted applications on air and within human tissue." {En línea}. {30 de junio de 2014} disponible en {<https://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/11522>}.

M. Y. ElSalamouny and R. M. Shubair, "Novel design of compact low-profile multi-band microstrip antennas for medical applications," {En línea}. {25 de marzo de 2019} disponible en (<https://ieeexplore.ieee.org/document/7366015>).

MANYIKA, James, et al. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. Vol. 180. San Francisco, CA: McKinsey Global Institute, 2013. {En línea} Disponible en (<https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/disruptive-technologies>).

M. Patel and J. Wang, "Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies". {En línea}. {29 de marzo de 2019} disponible en: (<https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.javeriana.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5416354>).

M. Pozar David. Microwave Engineering. 2da Edition. Nueva York. John Wiley & Sons, 1998, p. 160-165.

MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, Alfredo. Diseño de antenas transparentes para WIFI. Madrid, 2017. p 11-16. Trabajo de fin de grado (ingeniería en tecnologías de telecomunicación). Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de teoría de la señal y las telecomunicaciones.

NILSSON, James W., et al. Circuitos eléctricos. Addison-Wesley Iberoamericana, 1995. p 321-322.

NAVARRO, Ernesto Ávila. Diseño, modelado, fabricación y medida de antenas impresas para comunicaciones inalámbricas. Elche, 2008. p 11-20. Tesis Doctoral.

Universidad Miguel Hernández de Elche. Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales.

RAMOS PASCUAL, Francisco. Radiocomunicaciones. Barcelona: Marcombo, 2007. Accessed March 1, 2019. {En línea} Disponible en (<https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=3175449>).

RIGUTTI, Adriana. Atlas ilustrado de anatomía. Susaeta Ediciones, (2002): p 26-34.

SEABURY, David. An update on SAR standards and the basic requirements for SAR assessment. {En línea} Fecha {20 marzo 2019}. Disponible en: (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj6iKvUhs3IAhVmplkKHSTaDnQQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Femf.kca.kr%2Fcmnm%2Ffms%2FFileDown.do%3Bjsessionid%3DD9EC73FD50939BC9368086C0AC0EDBF5%3FatchFileId%3DOUTSIDE_12AAAAA%26fileSn%3D0&usg=AOvVaw2a2w_ITxR36YBgtSesgMT-)

UNION INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). Protección contra las interferencias. Jiménez, José María Rodríguez Martín, and Vicente González Posada. "Procedimiento de diseño y realización de antenas de parche en tecnología Microstrip." IAC 1 (2011).

VARGAS SOLANO, D. R. & Zamora Fernández, J. L. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Bogotá, 2017. p 63-70. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería de Electrónica y Telecomunicaciones.