

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP
PARA LA BANDA CELULAR LTE DE 700 MHZ**

Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, que
presenta el bachiller:

Hansel Joussef Martínez Odiaga

ASESOR: Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, julio del 2015

RESUMEN

El presente proyecto de tesis consiste en el diseño e implementación de una antena del tipo microstrip que opere en el rango de frecuencias de la banda de 700 MHz, asignada para telefonía móvil de tecnología LTE en el Perú, la cual tiene como rango de operación desde 698 MHz hasta 806 MHz.

El primer capítulo muestra los aspectos generales que intervienen en la problemática correspondiente a este trabajo de tesis; asimismo se hace un análisis de la importancia de la investigación en temas de tecnologías inalámbricas en relación a la coyuntura actual y aspecto social de las comunicaciones móviles.

En el segundo capítulo se presenta la teoría general de antenas y de manera específica la teoría concerniente a las antenas microstrip, donde se revisan los conceptos y características de este tipo de dispositivos y la documentación de investigación relacionada a las antenas planas en esta banda.

En el tercer capítulo se realiza el correspondiente diseño de la antena. Para ello se hace uso, principalmente del programa de simulación CST y como opciones complementarias los programas EMPro y ADS; seguidamente se muestra el proceso de fabricación de la antena.

En el cuarto capítulo se muestran las mediciones y los resultados obtenidos de ciertos parámetros que definen a una antena; en este caso, se realizan las correspondientes mediciones de coeficiente de reflexión, relación de onda estacionaria, ganancia, directividad y patrón de radiación, los cuales serán contrastados con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas y mostradas en el capítulo anterior.

Por último, se muestran las conclusiones del análisis de los resultados obtenidos, en comparación con aquellos que se espera conseguir.

FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE
 TELECOMUNICACIONES**

Título : Diseño e implementación de una antena microstrip para la banda celular LTE de 700 MHz
 Área : Tecnologías inalámbricas # 285
 Asesor : Manuel Augusto Yarlequé Medina
 Alumno : Hansel Joussef Martínez Odiaga
 Código : 20047106
 Fecha : 11 de junio de 2015


Descripción y Objetivos

Una antena microstrip (plana o impresa) es una estructura compuesta (dependiendo del diseño) por uno o más elementos de superficie metálica sobre un sustrato dieléctrico y un plano de tierra en la cara opuesta del dieléctrico. Este tipo de antenas exhibe varias ventajas, entre las que destacan su costo relativamente bajo, sus dimensiones pequeñas, su bajo peso y su fácil adaptación a otros dispositivos o sistemas de microondas. Su diseño se establece de forma que la estructura disipe la potencia en forma de radiación. Por ello para el diseño de una antena microstrip se debe tener en cuenta las diversas maneras que existen para lograr dicha radiación. También se debe tener cuidado en la elección del tipo de alimentación, ya que esto puede repercutir tanto en la eficiencia como en la complejidad de la estructura diseñada.

En este proyecto el diseño final será establecido mediante simulación haciendo uso de los software CST y EMPro, herramientas que permiten tener resultados preliminares a ser contrastados con los resultados reales de medición de la antena construida. Una vez obtenido el diseño funcional, se procederá a la fabricación de la antena la cual se realizará mediante el fotograbado sobre un sustrato dieléctrico laminado en cobre por ambas superficies.

Es importante destacar que la documentación sobre el desarrollo de este tipo de antenas en la banda celular LTE de 700 MHz (de 689 a 806 MHz) es muy escasa, motivo por el cual se pretende hacer la investigación y desarrollo en este tema; asimismo cabe mencionar que dicha banda se encuentra actualmente en proceso de licitación en nuestro país; lo que representa una posibilidad de implementación en zonas rurales, donde la tecnología celular LTE es inexistente.



 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 Especialidad de Ingeniería de las Telecomunicaciones


 Ing. GUMERCINO BARTRA GARDINI
 Coordinador



FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍAPONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Esto puede ser factible debido a las ventajas (mencionadas anteriormente) de esta clase de antenas.

Expuesto lo anterior, la presente tesis tiene como finalidad principal mostrar el correcto funcionamiento de una antena microstrip en la banda celular LTE de 700 MHz. Para cumplir con este objetivo se debe lograr el correcto acoplamiento de la antena en dicha banda, el cual se establecerá como adecuado haciendo el análisis del coeficiente de reflexión (debajo de -10 dB), además de lograr una directividad aproximada de 4 dBi y una ganancia de aproximadamente 3 dBi.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Especialidad de Ingeniería de las Telecomunicaciones

Ing. GUMERCINDO BARTRA GARDINI
Coordinador

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE
TELECOMUNICACIONES

Título : Diseño e implementación de una antena microstrip para la banda celular LTE de 700 MHz

Índice

Introducción

1. Aspectos generales
2. Marco teórico
3. Diseño, simulación y fabricación
4. Mediciones y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas

Maldonado

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Especialidad de Ingeniería de las Telecomunicaciones

Ing. GERMERCINDO BARTRA GARDINI
Coordinador

A

DEDICATORIA

A mis amados padres por su incondicional apoyo
a lo largo de este complicado camino
que me tocó recorrer.



AGRADECIMIENTOS

A mis padres mi eterno agradecimiento por hacer todo el esfuerzo que hasta el día de hoy por mí hacen.

A mis hermanas por brindarme el apoyo necesario en los momentos difíciles.

A mi asesor Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina por su invaluable aporte de conocimientos hacia mi persona.



ÍNDICE

ÍNDICE	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS	xii
CAPÍTULO 1.....	14
ASPECTOS GENERALES	14
1.1 Problemática.....	14
1.2 El valor social de la banda de 700 MHz	15
1.3 Coyuntura actual.....	17
1.4 Estado del arte.....	18
1.5 Objetivos.....	18
CAPÍTULO 2.....	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1 Definición.....	20
2.2 Parámetros de las antenas	20
2.2.1 Impedancia	21
2.2.2 Adaptación.....	21
2.2.3 Relación de onda estacionaria	23
2.2.4 Intensidad de radiación	23
2.2.5 Patrón de radiación.....	24
2.2.6 Ganancia	25
2.2.7 Directividad	25
2.2.8 Eficiencia	25
2.2.9 Ancho de banda.....	26
2.2.10 Ancho de haz de media potencia (HPBW)	26
2.3 Antenas Microstrip	26
2.3.1 Ventajas de las antenas microstrip.....	27
2.3.2 Desventajas de las antenas microstrip	27
2.3.3 Geometrías de las antenas microstrip.....	28
2.3.4 Métodos de alimentación	28
2.3.4.1 Alimentación por Microstrip	29
2.3.4.2 Alimentación directa con sonda coaxial	30
2.3.5 Sustratos.....	30
2.4 Antenas Quasi-Yagi.....	31

CAPÍTULO 3.....	32
DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN	32
3.1 Diseño de la antena.....	32
3.1.1 Diseño de la línea de alimentación	33
3.2 Simulaciones	34
3.2.1 Entorno Computacional.....	34
3.2.1.1 CST Studio (Computer Simulation Technology)	34
3.2.1.2 EMPro (Electromagnetic Professional)	34
3.2.1.3 ADS (Advanced Design System)	34
3.2.2 Simulación del monopolo	35
3.2.3 Simulación de la geometría tipo T	37
3.2.4 Simulación del elemento reflector	38
3.2.5 Simulación del elemento director	40
3.2.6 Resultados de simulación finales	45
3.2.6.1 Coeficiente de reflexión	45
3.2.6.2 Relación de onda estacionaria (VSWR).....	46
3.2.6.3 Ganancia.....	46
3.2.6.4 Directividad.....	47
3.2.6.5 Patrones de radiación.....	47
3.3 Fabricación de la antena.....	50
CAPÍTULO 4.....	53
MEDICIONES Y RESULTADOS.....	53
4.1 Medición del coeficiente de reflexión	53
4.2 Relación de onda estacionaria (VSWR).....	56
4.3 Ganancia	57
4.3.1 Método de dos antenas.....	57
4.4 Patrones de radiación	62
4.5 Directividad	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Circuito equivalente de línea de transmisión de la antena en modo transmisor.....	21
Figura 2.2: Plano-E del patrón de radiación de una antena corneta pequeña	24
Figura 2.3: Geometrías básicas usadas en antenas microstrip	28
Figura 2.4: Alimentación por línea microstrip	29
Figura 2.5: Alimentación por línea microstrip	30
Figura 3.1: S11 vs frecuencia, resultado de simulación de la antena monopolo	35
Figura 3.2: Vista frontal y posterior de la antena final	35
Figura 3.3: S11 obtenidos como resultado de la variación de las dimensiones de la antena monopolo	36
Figura 3.4: Mejor acoplamiento logrado con el monopolo	36
Figura 3.5: Comprobación de múltiple acoplamiento de la forma tipo T.	37
Figura 3.6: Configuración tipo T	37
Figura 3.7: S11 obtenidos realizando las variaciones en la geometría tipo T	38
Figura 3.8: Antena de configuración tipo T con elemento reflector, separados una distancia d_1 (mm).	39
Figura 3.9: S11 obtenidos para los diferentes valores de separación d_1	39
Figura 3.10: Patrón de radiación resultante de la presencia del elemento reflector.	40
Figura 3.11: Vista posterior de la antena con el nuevo elemento director	40
Figura 3.12: S11 obtenidos como resultado de agregar el director	41
Figura 3.13: Patrón de radiación generado con el director incorporado	41
Figura 3.14: S11 con el director incorporado usando el método FEM	42
Figura 3.15: Patrón de radiación generado con el director y usando FEM	42
Figura 3.16: Vista frontal y posterior de la antena final	44
Figura 3.17: Vista general de los elementos que componen la antena	44
Figura 3.18: S11 de la antena final usando FDTD	45
Figura 3.19: S11 de la antena final usando FEM	45
Figura 3.20: VSWR de la antena final usando FDTD	46
Figura 3.21: VSWR de la antena final usando FEM	46
Figura 3.22: Ganancia de la antena final usando FDTD.....	47
Figura 3.23: Directividad de la antena final usando FDTD	47
Figura 3.24: Diagramas de radiación en azimut y elevación para: (a) 700 MHz, (b) 725 MHz, (c) 750 MHz, (d) 775 MHz y (e) 800 MHz	49
Figura 3.25: Patrón de radiación de Azimut en 3D para 750 MHz.....	49
Figura 3.26: Patrón de radiación de elevación en 3D para 750 MHz.....	50
Figura 3.18: Fibra de vidrio fotosensible (FR4).	51
Figura 3.19: (a) máquina insoladora, (b) máquina de revelado y decapado.	51
Figura 3.20: Vista frontal y posterior de la antena procesada por completo	52
Figura 3.21: Vista frontal y posterior del diseño final de la antena construida	52
Figura 4.1: Analizador de redes de la marca Agilent, modelo 8722ET	54
Figura 4.2: Medición del S11 de la antena usando el analizador de redes.....	54
Figura 4.3: Pérdida de retorno medido del diseño final	55
Figura 4.4: Comparación de pérdidas de retorno de medición y simulaciones	55
Figura 4.5: VSWR calculado a partir del coeficiente de reflexión de la medición	56
Figura 4.6: Comparación de VSWR de la medición y simulaciones	57

Figura 4.7: Distribución de antenas para el cálculo de ganancia, (a) 2 antenas, (b) 3 antenas, (c) 4 antenas.....57

Figura 4.8: Esquema del método de dos antenas para el cálculo de ganancia58

Figura 4.9: Medición de potencia a la entrada de la antena (pérdidas por cables coaxiales)58

Figura 4.10: Medición de ganancia usando el método de dos antenas60

Figura 4.11: Valores de ganancias medidas61

Figura 4.12: Comparación de ganancias de medición y de simulaciones en la banda de 700 MHz61

Figura 4.13: Montaje realizado para la medición del patrón de radiación en azimut62

Figura 4.14: Comparación de patrones de radiación en azimut, de medición (izquierda) y simulación (derecha) para: (a) 700 MHz, (b) 725 MHz, (c) 750 MHz, (d) 775 MHz y (e) 800 MHz.....65



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Bandas de operación de telefonía móvil 4G (LTE)	17
Tabla 1.2: Tabla de asignación de frecuencias en la banda de 700 MHz.....	18
Tabla 3.1: Variación de dimensiones (en mm) del plano de tierra y monopolo.....	36
Tabla 3.2: Variación de dimensiones (en mm) de la geometría tipo T.....	38
Tabla 3.3: Variación de dimensiones (en mm) de la forma tipo T con reflector.	39
Tabla 3.4: Dimensiones correspondientes a los anchos y largos de los elementos de la antena.....	43
Tabla 4.1: Acoplamiento y ancho de banda obtenidos en medición y simulación....	56
Tabla 4.2: Resultados de los valores necesarios para el cálculo de ganancias en el rango de operación de la antena	60
Tabla 4.3: Resultados del análisis del ancho de haz de media potencia (HPBW) ...	66



INTRODUCCIÓN

En años recientes, el surgimiento de tecnologías digitales ha permitido mejoras significativas en cuanto a calidad, pero también en el uso óptimo de los recursos que permiten su funcionamiento; las telecomunicaciones no son ajenas a estos beneficios, en los que destacan principalmente el uso más eficiente del espectro electromagnético en todas las áreas. De particular importancia ha sido la digitalización de la televisión, que como efecto positivo presenta un menor uso de ancho de banda; de aquí surge la posibilidad de reutilizar el ancho de banda sobrante.

Una reasignación del espectro electromagnético abre paso a los servicios de comunicaciones móviles, cuyo constante crecimiento demanda una mayor capacidad en cuanto al ancho de banda. De manera puntual, con la llegada de la tecnología LTE, se hace necesario darle los recursos que requiere para su funcionamiento, esto además de cara a los próximos años en los que dicha tecnología será el punto de convergencia de las comunicaciones móviles.

Actualmente en nuestro país la tecnología LTE está desplegada en las bandas de frecuencia correspondientes a 1900 MHz (América Móvil) y 1700/2100 MHz (Telefónica Móviles – Entel Perú). Además de éstas se pretende el despliegue de una red de 4G (LTE) en la banda de 700 MHz. Por lo que se requiere de dispositivos que trabajen en el rango de frecuencias correspondiente desde los 698 MHz hasta 806 MHz. De lo anterior se plantea como posibilidad el uso de antenas planas por las ventajas que presentan; bajo peso, volumen pequeño, facilidad de integración y bajo costo, tales ventajas hacen que esta clase de antenas se tornen ideales en aplicaciones inalámbricas en zonas rurales. Todo esto pensando en la futura expansión a nivel de cobertura (hacia zonas rurales) que puede llegar a tener LTE.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES

En este primer capítulo se establecen los diferentes puntos que definen e intervienen en la problemática que este trabajo de tesis intenta resolver, para ello se analiza la coyuntura actual de las comunicaciones móviles en el Perú, la importancia de la banda de 700 MHz desde una perspectiva social, y un breve análisis del estado del arte de las antenas microstrip que operan en la banda que corresponde a este proyecto.

1.1 Problemática

Año tras año los reportes estadísticos sobre líneas móviles en el Perú muestran un considerable crecimiento, esta tendencia se incrementa aún más cuando se considera el ingreso de nuevas operadoras móviles al país. Según las cifras del reporte estadístico más reciente (2013) realizado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, cerca de 30 millones de líneas móviles estaban disponibles [9]; otro reporte más actualizado de Osiptel [10], dice que a finales del año 2014 se tenían 30 millones 861 mil líneas operativas y que de ellas, más de 1.3 millones operan con tecnología 4G (LTE – Long Term Evolution). Esto en principio da que pensar que el uso de esta última tecnología será aún mayor, dados los beneficios que ofrece. De esto se deduce que se requerirá mayores anchos de banda, lo que implica para las operadoras contar con bandas de frecuencias más grandes, tal cual lo ha mencionado la UIT, en su reporte ITU - R M.2078 [6], en donde indica que

para el año 2020 el despliegue de tecnologías IMT requerirá entre 1.28 GHz a 1.72 GHz de espectro radioeléctrico dependiendo del área de demanda [6].

Entonces, mediante el surgimiento de tecnologías más avanzadas que requieren a su vez menos anchos de banda, en otras áreas de las telecomunicaciones, se establece la posibilidad de reasignar los espacios sobrantes del espectro radioeléctrico de forma que se aproveche más eficientemente; es aquí cuando surgen nuevas posibilidades de crecimiento para los servicios móviles.

Tal es el caso de la banda de 700 MHz, cuya aparición para los servicios móviles deriva de la digitalización de la televisión, la cual abarcaba la banda de UHF desde los 470 MHz a 806 MHz, antes usada también por la televisión analógica. Posteriormente con la reducción de anchos de banda necesarios en dicha tecnología digital, se da lo que se conoce como el dividendo digital, que no es más que el sobrante del segmento superior del espectro radioeléctrico en la banda de UHF; esto es, de 698 MHz a 806 MHz, que fue definido en la CMR (Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones) del 2007 como propicia para ser usada en América (Región 2) [6].

La banda de 700 MHz permite el despliegue de tecnologías avanzadas, por lo que ha sido considerada para ser usada por la tecnología LTE dadas las ventajas que presenta; entre ellas, un mayor cubrimiento de área por estación base, debido a las características propias de las bajas frecuencias, así también esto reduce los costos de infraestructura de redes a desplegar.

Al ser dicha banda nueva en relación con la tecnología 4G, se entiende de ello que ciertos dispositivos funcionales en esta banda son escasos. Surge entonces como primer problema de índole técnico, la falta de dispositivos que operen correctamente en el rango requerido. Esto abre un espacio de investigación correspondiente a los dispositivos y tecnologías inalámbricas; tal es el caso de las antenas que como bien es sabido son elementos fundamentales e indispensables en las comunicaciones inalámbricas.

1.2 El valor social de la banda de 700 MHz

Es necesario además, estimar cuán importante es esta banda de cara a las repercusiones positivas que pueda tener en la sociedad peruana.

Ciertamente es conocida la problemática social y económica que presentan las zonas rurales en el país; no obstante, independientemente de lo que se puede

hacer para dar solución desde el punto de vista netamente económico, se hará aquí un breve análisis que pretende mostrar los beneficios que trae consigo la banda ancha móvil, que a su vez se pueden traducir consecuente en oportunidades de mejora económica para ese sector de la población.

En años recientes, el espectro radioeléctrico se ha vuelto un recurso primordial para el desarrollo de los servicios de telecomunicaciones, básicamente debido a las mejoras tecnológicas que permiten un aprovechamiento eficiente de cada espacio del espectro radioeléctrico. A partir de esto, el espectro radioeléctrico posibilita el brindar una gran variedad de servicios, muchos de los cuales eran posibles antes solo a través de medios alámbricos. Esto permite minimizar costos en el despliegue de redes, asimismo permiten lograr un mayor alcance de cobertura, lo que deriva en una masificación de los servicios de telecomunicaciones.

Un punto relevante relacionado al espectro radioeléctrico es que, su limitación y escasez como recurso esencial para brindar servicios móviles, se ha convertido en un mecanismo para promover la competencia, a través del ingreso de nuevos operadores como el caso de Viettel Perú, que contribuyen a la desmonopolización y expansión del mercado.

La banda en cuestión idónea por las ventajas de alcance y costo mencionadas en la problemática, permiten la expansión a zonas no cubiertas (en principio zonas rurales) por la banda ancha inalámbrica. La utilización de este espacio del espectro permitirá a los residentes en áreas sin acceso a banda ancha acceder a mejores recursos educativos, de salud, servicios financieros y expansión de comercio en nuevos mercados. Tolo esto puede resultar, por obvias razones, en mejoras que conlleven al desarrollo global de las zonas rurales, a través de servicios de alta velocidad que permitan la interrelación entre la sociedad civil y el gobierno. Este escenario de uso del espectro en el rango de 700 MHz, a través de la banda ancha móvil representa un medio para la provisión de servicios más eficientes, que aumenten el bienestar general de la población [13].

De lo antes expuesto, es importante destacar que las oportunidades de desarrollo a través de las telecomunicaciones son significativas, es por ello que es de suma importancia la realización de estudios e investigación en todas las áreas que contribuyan al mejoramiento del alcance que pueden tener los servicios de telecomunicaciones.

1.3 Coyuntura actual

Actualmente existen tres operadores de telefonía móvil que tienen desplegadas redes de tecnología LTE en nuestro país (tabla 1.1), según el reporte más reciente de Osiptel [10], a finales del 2014 Claro Anunció 600 mil accesos a 4G, Movistar 500 mil y Entel 200 mil.

Tabla 1.1: Bandas de operación de telefonía móvil 4G (LTE)

Operador	Banda de Frecuencia (MHz)
Telefónica móviles	1700/2100 (Banda 4)
América móvil	1900 (Banda 2)
Entel Perú	1700/2100 (Banda 4)

En el Perú, la banda de 700 MHz (a ser dada en concesión por 20 años) se encuentra actualmente en proceso de licitación y se prevé que para antes de fin de año el proceso finalice.

El proceso de licitación tuvo comienzo el 12 de junio de 2014 con la resolución ministerial siguiente:

- “Mediante Resolución Ministerial N° 337-2014-MTC/03 de 12.06.2014, el MTC: Dispuso la realización del concurso Público para otorgar en concesión única para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones y asignar los bloques de la banda de 698 – 806 MHz.”

Seguida por la resolución viceministerial del 9 de noviembre del 2014, en la que se definen los tres bloques de frecuencias a licitar (tabla 1.2):

- “Mediante Resolución Viceministerial N° 661-2014-MTC/03 publicada recientemente en el Diario Oficial el Peruano del 09.11.2014, se aprobó la canalización de la Banda 698 – 806 MHz a nivel Nacional, en los términos siguientes:”

Tabla 1.2: Tabla de asignación de frecuencias en la banda de 700 MHz

Bloque	Rango de Frecuencia (MHz)		Total (MHz)	Área de asignación
	Ida	Retorno		
A	703 -718	758 -773	15 + 15	A nivel nacional
B	718 -733	773 -788	15 + 15	A nivel nacional
C	733 - 748	788 -803	15 + 15	A nivel nacional

1.4 Estado del arte

Si bien existen infinidad de trabajos de investigación sobre antenas tipo microstrip, para un gran rango de frecuencias, con distintas características y tipos de diseño.

Se ha determinado que existen muy pocos trabajos dedicados a la operación de antenas en la banda de los 700 MHz, esto en principio porque esta banda ha sido, como se mencionó en el primer punto de este capítulo, determinada como idónea para ser usada en América, y dado que recientemente se está pretendiendo hacer uso de dicha banda, la información de los trabajos de investigación es muy escasa.

No obstante, de la documentación encontrada se intentó poner a prueba replicando mediante simulaciones, dos de los diseños descritos en tales trabajos [11], sin conseguir proximidad a los resultados que en ellos se describían [14].

Además es necesario precisar que ciertas antenas microstrip que trabajan en la banda de DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) alcanzaban a cubrir la banda de los 700 MHz o parte de ella [4].

1.5 Objetivos

La presente tesis tiene como fin principal mostrar el correcto funcionamiento de una antena del tipo microstrip en la banda celular LTE de 700 MHz. Para cumplir con este objetivo se debe caracterizar la antena mediante la obtención de resultados de los parámetros que definen a esta clase de antenas, de manera que se demuestre de manera real un comportamiento acorde a este tipo de dispositivos. Para lograr

dicho fin, se procede a establecer de manera específica los resultados que se esperan alcanzar.

Como objetivo principal se define el rango de operación en el cual operará la antena. Se propone el funcionamiento para toda la banda que comprende los 700 MHz (698 – 806 MHz), esto se comprobará mediante el correcto acoplamiento de la antena en el correspondiente rango de frecuencias, el cual se establecerá como adecuado haciendo el análisis del coeficiente de reflexión; se considerará un correcto acoplamiento en frecuencia cuando la pérdida de retorno este por debajo de -10 dB.

Como objetivos específicos se considerará la obtención de características particulares, las cuales definirán a la antena de manera explícita; además del correcto acoplamiento de la antena en la banda en cuestión, se procederá a realizar el análisis del coeficiente de onda estacionaria (VSWR), que debe proporcionar un valor lo más cercano posible a uno, también es necesario obtener un valor de ganancia adecuado a este tipo de antenas, dicho valor se ha establecido en 3 dBi puesto que la documentación previamente revisada no ofrece resultados considerables para este parámetro, finalmente se requiere lograr una antena lo más directiva posible; nuevamente de las referencias documentales leídas se considera razonable proponer una directividad aproximada de 4 dBi. Relacionado a este último punto también está el análisis necesario del patrón de radiación, el cual será diagramado considerando 5 muestras a lo largo de toda la banda de frecuencias.

Todo lo antes dicho se estableció teniendo en cuenta las características propias de estas antenas y a su vez tratando de hacer el aprovechamiento máximo de las ventajas que presentan. Vale aclarar que la documentación a la que se hace mención, es la encontrada principalmente en la librería digital de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definen los conceptos y parámetros propios de las antenas, además se revisa la teoría propia de estas y de las antenas tipo microstrip, así mismo se revisa brevemente la teoría de las antenas Quasi-Yagi.

2.1 Definición

Una antena es un dispositivo cuya principal función es radiar y recibir ondas electromagnéticas. Se podría decir que una antena hace las veces de un acoplador de la línea de transmisión con el espacio libre y viceversa. Del lado del transmisor, una antena convierte la energía eléctrica que viaja por una línea de transmisión en ondas electromagnéticas que se emiten al espacio, mientras que en el extremo receptor, una antena convierte las ondas electromagnéticas en el espacio en energía eléctrica hacia la línea de transmisión.

2.2 Parámetros de las antenas

Las antenas tienen ciertas características particulares propias de esta clase de dispositivos, las cuales se deben analizar de cara al tipo de diseño que se espera o desea conseguir. Las antenas están constituidas por elementos metálicos (conductores) que pueden tener formas diversas según los requerimientos de las aplicaciones en las cuales se van a usar, dichas características de las antenas se describen a continuación.

2.2.1 Impedancia

La impedancia de entrada de una antena se define como la relación existente entre la tensión y corriente en sus terminales, la cual presenta una parte real $R_a(\omega)$ y una parte imaginaria $X_a(\omega)$, ambas dependientes de la frecuencia [1].

$$Z_a = R_a(\omega) + jX_a(\omega) \tag{2.1}$$

De donde se puede descomponer $R_a(\omega) = R_r + R_L$, donde R_r es la resistencia de radiación de la antena y R_L es la resistencia debido a las pérdidas óhmicas de dicha antena. Esto permite hacer una distinción entre potencia radiada por la antena y potencia disipada en forma de calor tal como sigue las siguientes ecuaciones [1]:

$$P_r = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_r \tag{2.2}$$

$$P_L = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_L \tag{2.3}$$

De las ecuaciones anteriores I_0 es la corriente que entra a la antena. Si a cierta frecuencia el valor de la reactancia $X_a(\omega)$ es nulo, la antena es resonante.

2.2.2 Adaptación

Habitualmente las antenas se conectan a través de una línea de transmisión o directamente a los transmisores y receptores. Esto se representa de forma equivalente tal como se muestra en la figura 2.1.

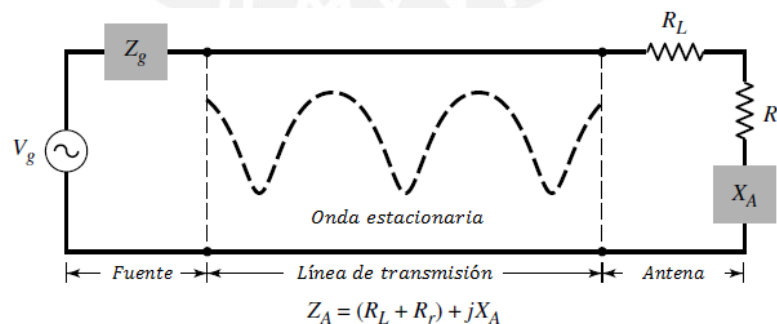


Figura 2.1: Circuito equivalente de línea de transmisión de la antena en modo transmisor [1]

En la red de dos puertos mostrada (figura 2.1) Se define el parámetro S_{11} como la relación entre la onda reflejada respecto a la onda incidente [1].

$$S_{11} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2.4)$$

Donde Z_0 la impedancia característica de la línea de transmisión que se conecta a la antena y Z_A es la impedancia de entrada de la antena. Tal parámetro, denominado como coeficiente de reflexión, nos da una referencia de la medida de potencia transferida hacia la antena [1].

La figura 2.1 muestra una línea de transmisión de impedancia característica Z_0 conectada a una fuente de tensión de valor $Z_g = R_g + jX_g$ y a una impedancia de carga $Z_A = R_A + jX_A$. Entonces la potencia desde la fuente es:

$$P_{in} = \frac{1}{2} |I|^2 R_{in} = \frac{1}{2} \left| \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \right|^2 R_{in} \quad (2.5)$$

Dada la potencia de entrada (2.5), se puede determinar la máxima transferencia de potencia, que ocurrirá cuando $Z_g = Z_{in}^*$ esto es, se cumplirá que: $R_g = R_{in}$ y $X_g = -X_{in}$.

Si se cumplen estas condiciones se habla de la existencia de una adaptación conjugada. El coeficiente de reflexión no es nulo en este caso, sin embargo se producirá una máxima transferencia de potencia a la carga. Cabe resaltar que existe diferencia entre adaptación (donde no existe onda reflejada) y adaptación conjugada (donde se transmite la máxima potencia a la carga), sin embargo ambas se dan cuando Z_0 y Z_g son valores reales [1].

Para este caso la potencia de entrada será:

$$P_{in} = \frac{1}{2} \left| \frac{V_g}{R_g + R_{in}} \right|^2 R_{in} = \frac{1}{2} \left| \frac{V_g}{2R_g} \right|^2 \quad (2.6)$$

Es muy importante siempre considerar la máxima transmisión de potencia que se entrega a la antena (carga), es decir, lograr una adaptación conjugada según lo establecido en (2.6). Cuando no se produce adaptación alguna, la potencia que se entrega será P_t .

Se establece como una condición límite, el conseguir que se entregue como mínimo el 90% de la potencia máxima a la carga; de aquí el coeficiente de reflexión a la

frecuencia de operación de la antena, debe tener un valor por debajo de los -10 dB en base a la siguiente ecuación [1]:

$$P_t = P_{max}(1 - |S_{11}|^2) \quad (2.7)$$

2.2.3 Relación de onda estacionaria

Se define la relación de onda estacionaria SWR (Standing Wave Ratio) como la relación existente entre el mínimo y el máximo de la onda estacionaria de tensión o corriente formada a la salida del generador según la figura 2.1. En el caso específico de la relación de tensión, se suelen usar las siglas VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) [1].

La SWR da una referencia de la potencia que se transmite hacia la carga, o la reflexión que se produce (por mala adaptación) en la misma. Un valor de VSWR = 1 nos dice que la antena tiene una adaptación perfecta, es decir, $S_{11} = 0$. Para el caso de $|S_{11}| < -10 \text{ dB}$ se tiene una VSWR < 2.

La relación de onda estacionaria está ligada de forma directa con la adaptación, esto se comprueba a través de:

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (2.8)$$

2.2.4 Intensidad de radiación

Se define la intensidad de radiación como “la potencia radiada de la antena por unidad de ángulo sólido”. La intensidad de radiación es un parámetro del campo lejano y se obtiene del producto de la densidad de radiación con el cuadrado de la distancia. Esto se representa matemáticamente de la siguiente manera [1]:

$$U = r^2 P_{rad} \quad (2.9)$$

Donde U y P_{rad} representan la intensidad y densidad de radiación respectivamente.

$$U = \text{intensidad de radiación} \left[\frac{P}{\text{unidad de ángulo sólido}} \right]$$

$$P_{rad} = \text{densidad de radiación} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

De la integración de la intensidad de radiación (2.9), sobre el total de ángulo sólido de 4π , se obtiene la potencia total:

$$P_{rad} = \oint \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.10)$$

Donde $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ es el ángulo sólido.

2.2.5 Patrón de radiación

Es la representación gráfica de las características de radiación que presenta una antena, que puede ser descrita en función de la dirección (coordenadas de azimut y elevación). Lo común es representar la densidad de potencia radiada (figura 2.2) [2], aunque también se suele encontrar diagramas de polarización o de fase. Según el diagrama de radiación, se puede realizar una clasificación general de los tipos de antena y además se puede definir la directividad de la misma (antena isotrópica, antena omnidireccional, antena bidireccional, directiva, etc.).

Los parámetros importantes en un diagrama de radiación son:

- Dirección de apuntamiento: Es la de máxima radiación. Directividad y Ganancia.
- Lóbulo principal: Es el margen angular en torno a la dirección de la máxima radiación.
- Lóbulos secundarios: Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.

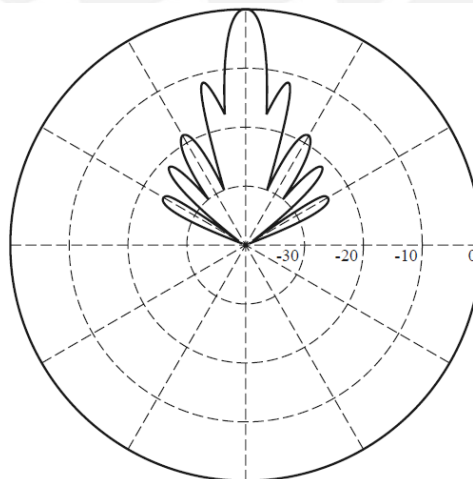


Figura 2.2: Plano-E del patrón de radiación de una antena corneta pequeña [2]

2.2.6 Ganancia

Una de las medidas más útiles que describe el funcionamiento de una antena es la ganancia. Aunque está estrechamente relacionada con la directividad, es una medida que tiene en cuenta la eficiencia de la antena y sus capacidades direccionales. Entonces la ganancia de una antena (en una dirección dada) se define como “la relación de la intensidad, en una dirección dada, y la intensidad de la radiación que se obtendría si la potencia a la entrada de la antena se irradiara por una antena isotrópica. La intensidad de la radiación correspondiente a la potencia isotrópica radiada es igual a la potencia entregada a la antena dividida por 4π .”[1] Esto puede ser expresado mediante la ecuación 2.11.

$$G = 4\pi \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Potencia total de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.11)$$

2.2.7 Directividad

Se define la directividad de una antena como la relación existente entre la intensidad de radiación en cada dirección a una distancia dada y la intensidad de radiación que radiaría a esa misma distancia y con una misma potencia, una antena isotrópica. La directividad máxima puede ser calculada usando la ecuación 2.12 o las aproximaciones de Kraus (2.13) o Tai-Pereira (2.14) [1].

$$D_{max} = R_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.12)$$

$$D_0 \approx \frac{4\pi}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} = \frac{41.253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.13)$$

$$D_0 \approx \frac{32\ln 2}{\Theta_{1r}^2 + \Theta_{2r}^2} = \frac{22.181}{\Theta_{1r}^2 + \Theta_{2r}^2} = \frac{71.815}{\Theta_{1d}^2 + \Theta_{2d}^2} \quad (2.14)$$

2.2.8 Eficiencia

Se define la eficiencia como la relación de potencia radiada y potencia entregada a la antena, está puede ser también definida a partir de la relación entre ganancia y directividad [1].

$$e_a = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{G}{D} \quad (2.15)$$

2.2.9 Ancho de banda

Se define el ancho de banda de una antena como “el rango de frecuencias en el cual el rendimiento de la antena, respecto a algunas características, se ajusta a un estándar especificado.” El ancho de banda puede ser considerado como el rango de frecuencias, a cada lado de la frecuencia central (frecuencia de resonancia), donde las características de la antena (tales como impedancia de entrada, nivel de lóbulo lateral, ganancia, dirección del haz, eficiencia de radiación, polarización, etc.) están dentro de un valor aceptable respecto al de la frecuencia central. Para antenas de banda ancha, se expresa el ancho de banda como la relación de las frecuencias superiores e inferior de operación aceptable [1].

2.2.10 Ancho de haz de media potencia (HPBW)

Se define como el margen angular entre las dos direcciones en las cuales la intensidad de radiación de una antena se reduce a la mitad de la intensidad máxima (haz principal). Según sea la aplicación y tipo de antena, en caso se requiera una antena altamente directiva, este valor debe ser lo más bajo posible, puesto que esto asegura la capacidad de la antena de distinguir entre radiaciones adyacentes [1].

2.3 Antenas Microstrip

Una antena microstrip (plana o impresa) es una estructura compuesta (dependiendo del diseño) por uno o más elementos de superficie metálica sobre un sustrato dieléctrico y un plano de tierra en la cara opuesta de dicho dieléctrico, presenta por su tamaño y complejidad de construcción múltiples ventajas. Su diseño se adecua de forma tal que la estructura disipe la potencia en forma de radiación.

En el diseño de una antena microstrip se debe tener en cuenta que existen múltiples formas de hacerlo, así también se debe tener cuidado en la elección del tipo de alimentación a usarse en la antena, puesto que, esto puede significar un incremento en la eficiencia pero a su vez también puede ser causa de un diseño más complejo, por tal razón se debe encontrar un equilibrio. Una vez determinada la forma, se analiza tomando como criterio la complejidad, los costos, como es el caso del modelo de línea de transmisión y el de cavidades, etc.

Las antenas planas están formadas por un agrupamiento plano de radiadores microstrip y un circuito que distribuye la señal entre los radiadores, se fabrican utilizando técnicas de fotograbado sobre un sustrato dieléctrico laminado en cobre por ambas superficies [1].

2.3.1 Ventajas de las antenas microstrip

Una de las principales ventajas de las antenas microstrip es el perfil reducido que presenta, factor que ciertamente las hace muy interesantes para ser implementadas como antenas integradas, por ejemplo en teléfonos móviles.

Como se sabe, la eficiencia de radiación de una antena repercute directamente en el consumo de energía. Un ejemplo de ello es, una antena poco eficiente integrada en un teléfono móvil, que lo obliga a transmitir con mayor potencia para establecer una correcta comunicación, lo cual ocasiona un mayor consumo de energía de la batería. Entonces las antenas microstrip miniaturizadas, son relevantes en los teléfonos móviles por el reducido espacio que ocupan [1].

Otras ventajas que presentan este tipo de antenas son:

- Fabricación sencilla y barata.
- Combinables con circuitos integrados de microondas.
- Se pueden diseñar para trabajar a diversas frecuencias.
- Se pueden lograr distintas polarizaciones.
- Son Robustas.
- Su tecnología plana favorece la reducción de tamaño y peso final en su integración con el resto del sistema.

2.3.2 Desventajas de las antenas microstrip

Como antena plana comúnmente se utilizan como antenas tipo parche microstrip. Sin embargo, el diseño de las antenas parche presenta algunas limitaciones como una banda de operación restringida y una reducción de la eficiencia de radiación debido a las pérdidas por ondas de superficie, que es ciertamente importante en función de los parámetros de diseño.

En recepción, una baja eficiencia de radiación de antena repercute en una pérdida de señal. El diseño a medida, supone la superación de diseños comerciales para un gran público, en la mayoría de los casos con un funcionamiento poco óptimo [1].

Las desventajas generales son:

- Baja eficiencia.
- Ancho de banda reducido.
- Limitada potencia.
- Pobre pureza de polarización.

- Banda estrecha
- La radiación de las líneas cercanas pueden modificar los parámetros de la antena.

2.3.3 Geometrías de las antenas microstrip

Las antenas microstrip también se suelen conocer como antenas de parche. Los elementos radiantes y las líneas de alimentación están por lo general fotográfadas sobre el sustrato dieléctrico. El parche radiante puede ser de forma cuadrada, rectangular, tira fina (dipolo), circular, elíptica, triangular, o cualquier otro tipo de configuración, tal como se observa en la figura 2.3; esas formas son las más comunes debido a la facilidad de análisis y fabricación, y sus atractivas características de radiación. Además se pueden conseguir polarizaciones lineales y circulares, ya sea con elementos individuales o arreglos de este tipo de antenas microstrip [1].

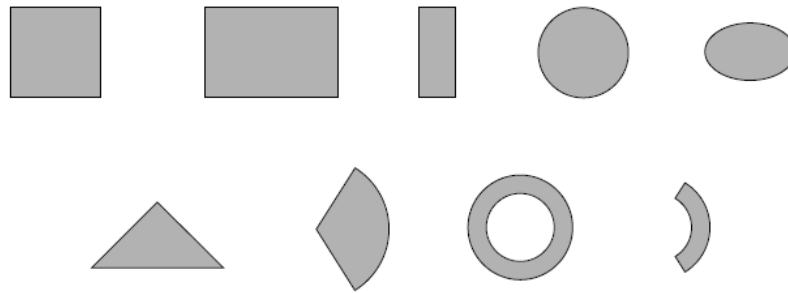


Figura 2.3: Geometrías básicas usadas en antenas microstrip [1]

2.3.4 Métodos de alimentación

Un punto muy importante a considerar diseñar una antena, es la forma en que se alimentará ésta, debido a que sin una estructura eficiente de alimentación, las antenas de microstrip no funcionarán correctamente, independientemente de la precisión realizada para diseñar el elemento radiante.

Existen diversos métodos de alimentación para una antena microstrip de forma que radie la potencia de la manera más eficientemente posible en las frecuencias deseadas, mediante el adecuado acoplamiento de impedancias. No obstante que existen muchos métodos para alimentar a las antenas, éstos se pueden dividir en tres principales categorías: alimentación directa, alimentación por proximidad y alimentación por apertura [1].

2.3.4.1 Alimentación por Microstrip

Consiste en alimentar al elemento radiador conectándole de forma directa una línea microstrip (diseñada a partir de ecuaciones que se corresponden para tener la impedancia característica deseada). Este es el método más simple de realizar, no obstante es el que puede presentar una peor eficiencia en relación con el ancho de banda y el acoplamiento. Existen principalmente dos maneras de alimentar una antena por medio de microstrip, conectando la línea de microstrip directamente en un borde de la antena y alimentando la línea microstrip por medio de inserciones en la antena. Este método se muestra en la figura 2.4.

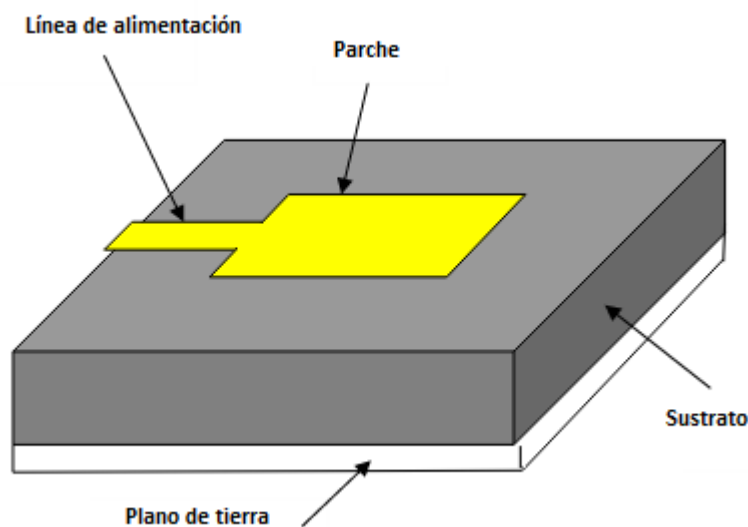


Figura 2.4: Alimentación por línea microstrip

FUENTE: Elaboración propia

Las dimensiones de la línea microstrip pueden ser calculadas a partir de las siguientes ecuaciones [2]:

$$\frac{W}{d} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{Para } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{Para } W/d > 2 \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

Donde,

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0}$$

2.3.4.2 Alimentación directa por sonda coaxial

Consiste en hacer que el pin de un cable coaxial alimente directamente al elemento radiador, mientras que la parte negativa se conecte a la tierra de la antena de microstrip. La impedancia en este método es dependiente de la posición de la sonda respecto a la posición del radiador, de tal manera que al ponerla de forma correcta generará un mejor acoplamiento. Es un método muy común de alimentación para antenas microstrip, no obstante, presenta un grado de complejidad y dificultad, ya que el pin conductor del cable coaxial debe perforar el sustrato y estar soldado a la antena para su correcta operación, la figura 2.5 muestra el método de alimentación descrito.

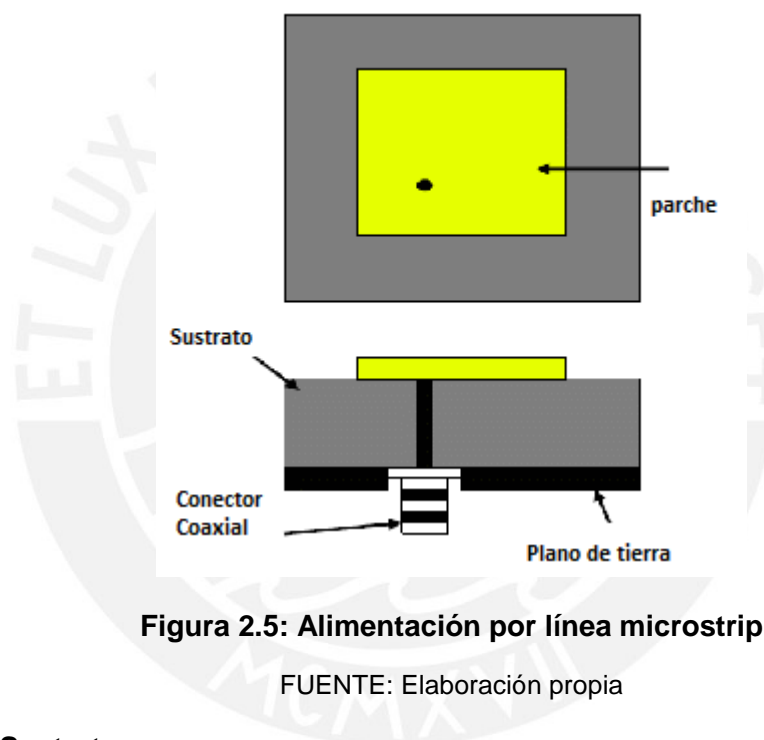


Figura 2.5: Alimentación por línea microstrip

FUENTE: Elaboración propia

2.3.5 Sustratos

Existen gran variedad de materiales dieléctricos disponibles para ser usados como sustratos en las antenas microstrip. Entre los principales parámetros que definen a este tipo de materiales se tiene a la constante dieléctrica que para las bandas de frecuencia de RF o microondas abarcan $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ [1], además está la tangente de pérdidas dieléctricas que comprende $0.0001 \leq \tan \delta \leq 0.06$, y finalmente se tiene al costo como un factor también importante a la hora de la elección de este tipo de materiales.

Debido a su bajo costo, fácil fabricación y buena adhesión a la superficie, son los plásticos los que se suelen usar comúnmente en RF y microondas, a pesar de que tienen grandes coeficientes de expansión térmica, propiedades dieléctricas bajas,

estabilidad dimensional pobre y una conductividad térmica muy pobre en comparación con otros materiales como cerámica y zafiro.

Otro punto importante a considerar al momento de elegir el material a usar, es el efecto de la constante dieléctrica sobre las características de radiación de la antena. Una constante dieléctrica elevada generalmente se traduce en una baja eficiencia de radiación, lo que implica la reducción considerable de sus dimensiones pero a su vez una limitación de la potencia a transmitir [1].

2.4 Antenas Quasi-Yagi

La antena Quasi-Yagi deriva de la antena Yagi-Uda, la cual es básicamente un arreglo de dipolos en paralelo, que se compone en esencia de un elemento alimentador, mientras que los otros elementos actúan como parásitos (directores y reflector) [1]. No obstante dadas ciertas longitudes de onda, este tipo de antenas no es de lo más óptima en relación a la tecnología microstrip, de aquí surge el diseño de antenas Quasi-Yagi (nombrada así debido a su semejanza con la antena Yagi) [8]. En general una antena Quasi-Yagi impresa consta de cuatro partes: reflectores, conductor, directores y la estructura de alimentación.

A diferencia de otros tipos de antenas parche, en la antena Quasi-Yagi se usa el plano reflector de forma truncada, esto para ayudar a redirigir la potencia en cierta dirección, ayudando en el propósito de directividad de los elementos reflector y director, lo que permite obtener una mayor ganancia. Cabe resaltar que el número de elementos directores puede influir en el ancho de banda de operación de la antena [5].

CAPÍTULO 3

DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN

En este capítulo se describe la forma y los métodos a partir de los cuales se obtiene el diseño funcional de la antena. Haciendo uso de software de simulación se realiza la comprobación del funcionamiento del dispositivo. Por último se detalla el método usado en el presente proyecto para la fabricación de este tipo de antenas.

3.1 Diseño de la antena

En principio el diseño a ser alcanzado tiene como referencia a las antenas Quasi-Yagi que tiene como componentes, una línea de alimentación, una o más secciones reflectoras y uno o más elementos directores [5].

Se considerara como material a usar para el diseño de la antena la fibra de vidrio (FR4), esto debido a que es uno de los materiales más usados en este tipo de antenas, además porque tiene un costo más bajo que otros posibles materiales tipo: Roger RO4003C, Rogers RF-60, Baquelita, etc. y así también debido a que es más fácil de obtener en el mercado nacional. Las características que presenta este material se listan a continuación.

- Permitividad relativa del sustrato: $\epsilon_r = 4.3$
- Espesor del sustrato (FR4): $h = 1.5 \text{ mm}$
- Espesor del metalizado de cobre: $T = 20 \text{ um}$
- Tangente de pérdida de la fibra de vidrio: $\tan\delta = 0.003$

Como punto de partida se considera una antena monopolo, la cual básicamente es un tramo de línea de transmisión de $\lambda/4$ con un plano de tierra. Se realiza el análisis correspondiente de la antena monopolo mediante simulaciones de manera que esta sea la línea de transmisión a través de la que se alimente a la antena en el diseño final, posteriormente se añaden los elementos que se mencionaron de una antena Quasi-Yagi [5]. A continuación se presentan los cálculos y simulaciones mediante las cuales se va formando la estructura con las características deseadas, esto es, en principio lograr el correcto acoplamiento (el rango de frecuencias debe estar por debajo de -10 dB) en la banda de 700 MHz.

3.1.1 Diseño de la línea de alimentación

Para el cálculo del ancho de la línea de alimentación se utiliza la ecuación 2.16 [2], la cual nos permite hallar el ancho necesario de forma tal que este nos asegure un acoplamiento a 50Ω a la frecuencia de operación de 750 MHz (frecuencia central aproximada de toda la banda).

$$\frac{W}{d} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad \text{Para } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad \text{Para } W/d > 2 \end{array} \right\}$$

Dónde:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0}$$

Se obtiene un ancho de 2.88 mm, para el sustrato (FR4) con las características mencionadas anteriormente.

Además se obtiene como longitud de onda en espacio libre de [2]:

$$\lambda_0/4 = c/4f_c = 100 \text{ mm}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = 192.89 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda_g}{4} = 48.22 \text{ mm}$$

Entonces, en principio el monopolio debería tener un ancho de 2.88 mm y de largo 100 mm, sin embargo se considerará un plano a tierra truncado, es decir que no comprende todo el ancho y largo del sustrato en cuestión, esto se analizará mediante los resultados de las simulaciones en el siguiente punto.

3.2 Simulaciones

Las simulaciones computacionales permiten obtener resultados de manera relativamente rápida y confiable para el diseño y desarrollo de dispositivos electrónicos.

3.2.1 Entorno Computacional

Para la obtención de resultados preliminares se hace indispensable el uso de software de simulación computacional. En este trabajo de tesis se ha decidido usar como principal referencia el software CST 2015, y como software de uso complementario EMPro y ADS de la compañía Agilent.

3.2.1.1 CST Studio (Computer Simulation Technology)

CST Studio Suite es una plataforma de simulación usada por ingenieros e investigadores que trabajan en todo el espectro electromagnético para modelar sistemas y diseñar dispositivos electrónicos. Usa como métodos computacionales de solución FDTD (método de diferencias finitas en el dominio de tiempo) y FEM (Método de Elementos Finitos), dichos métodos abarcan una amplia gama de frecuencias y formas geométricas en 3D.

3.2.1.2 EMPro (Electromagnetic Professional)

Es un software de simulación de diseño electromagnético, usado para circuitos integrados, antenas y arreglos con geometrías diversas, los cuales pueden usar diferentes tipos de alimentación. Además permite facilidad para crear de manera rápida en tres dimensiones, las cuales pueden ser analizadas tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia, usando para ello métodos computacionales tipo FEM y FDTD.

3.2.1.3 ADS (Advanced Design System)

Es una plataforma de simulación para el diseño y desarrollo de dispositivos electrónicos de radio frecuencia, microondas, etc., al igual que los otros 2 software permite diseñar antenas, de tipo planas. Además de contar con el método computacional FEM, tiene el método de momentos (MOM).

3.2.2 Simulación del monopolo

Un primer intento de simulación (usando FDTD) con las medidas calculadas para el ancho y largo de la línea, considerando un sustrato de 150 mm de largo por 90 mm de ancho y un plano reflector del mismo ancho que el sustrato y largo igual a la mitad del largo del monopolo, dio como resultado el gráfico mostrado en la figura 3.1. Donde se observa que existe un acoplamiento a la frecuencia de 1.12 GHz.

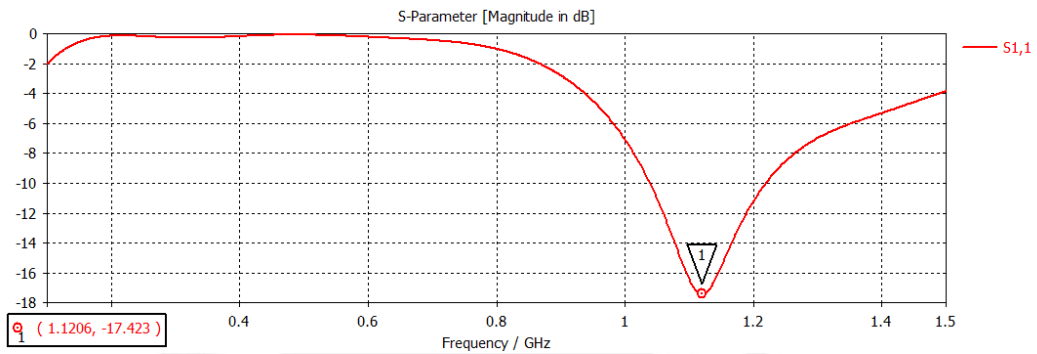


Figura 3.1: S11 vs frecuencia, resultado de simulación de la antena monopolo

FUENTE: Elaboración propia

Entonces se procede a alcanzar la frecuencia de acoplamiento deseada, manteniendo el ancho de la línea fijo (para conservar el acoplamiento a 50Ω). Se realizan las variaciones de las longitudes de la línea y del plano de tierra, así como el ancho de este último, esto de acuerdo a la tabla 3.1, donde L es la longitud del monopolo [7], l_1 es la longitud del plano de tierra y w_1 es la diferencia media del ancho del sustrato y el ancho del plano de tierra [12] (establecido de esta manera para procesos de optimización siguientes), tal como se muestra en la figura 3.2.

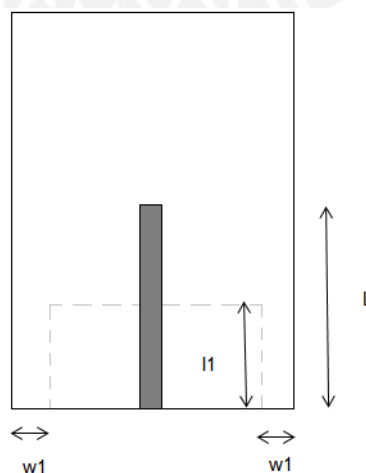


Figura 3.2: Vista frontal y posterior de la antena final

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 3.1: Variación de dimensiones (en mm) del plano de tierra y monopolo.

3D Run ID	Status	Parameters				1D Results\S-Parameters
		L	l1	w1	S1,1	
1	Calculated	140	10	0	1DC	
2	Calculated	110	10	0	1DC	
3	Calculated	110	15	0	1DC	
4	Calculated	110	20	0	1DC	
5	Calculated	110	20	10	1DC	
6	Calculated	120	20	10	1DC	
7	Calculated	120	20	0	1DC	
8	Calculated	120	15	0	1DC	
9	Calculated	120	10	0	1DC	

Se muestran los resultados obtenidos (figura 3.3) según el número de simulación correspondiente a las medidas variadas en la tabla 3.1.

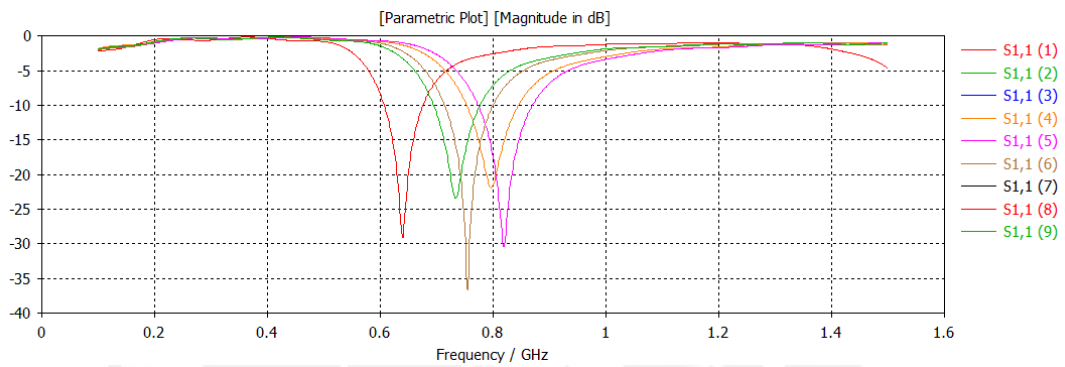


Figura 3.3: S1,1 obtenidos como resultado de la variación de las dimensiones de la antena monopolo

FUENTE: Elaboración propia

El mejor acoplamiento se da en la gráfica de S1,1 (6), correspondiente a la frecuencia de 755.2 MHz con un S1,1 de -36.648 dB (figura 3.4).

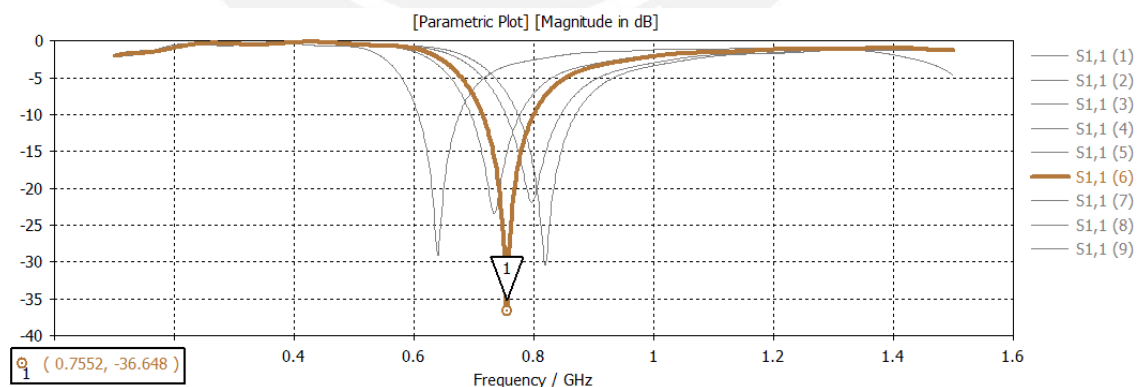


Figura 3.4: Mejor acoplamiento logrado con el monopolo

FUENTE: Elaboración propia

Es apropiado mencionar que el patrón de radiación obtenido es el correspondiente a un monopolo, es decir, omnidireccional.

En base a la revisión de la documentación de antenas monopolares, se notó el uso frecuente de la forma en T en las antenas microstrip (una especie de antena parche) donde se describe que esta forma tiene como característica, una resonancia multibanda, esto se comprueba en las simulaciones de forma reiterada con diferentes medidas de la forma en T, una muestra de ello se observa en la figura 3.5. Dicha característica de resonancia puede usarse para conseguir más fácilmente el acoplamiento en la banda deseada, además esta configuración ayuda a reducir la longitud inicial del monopolo. Nuevamente al igual que el monopolo simple, este tipo de forma radia la potencia de forma omnidireccional [11].

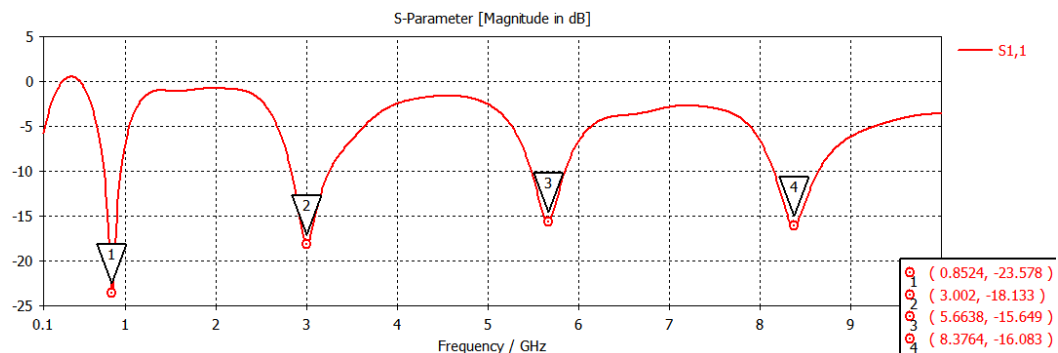


Figura 3.5: Comprobación de múltiple acoplamiento de la forma tipo T.

FUENTE: Elaboración propia

3.2.3 Simulación de la geometría tipo T

Se procede a analizar el acoplamiento que brindará la geometría T [15], a partir de la variación de las dimensiones L, LI y WI, según corresponden a la figura 3.6.

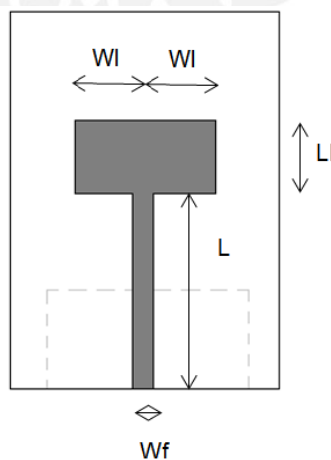


Figura 3.6: Configuración tipo T.

FUENTE: Elaboración propia

La siguiente tabla (3.2) contiene las medidas usadas para evaluar los resultados obtenidos en las simulaciones (figura 3.7).

Tabla 3.2: Variación de dimensiones (en mm) de la geometría tipo T.

3D Run ID	Status	Parameters			1D Results\S-Parameters											
		L	Wf	Wl	S1,1											
1	Calculated	120	2.9	20	1DC											
2	Calculated	80	2.9	20	1DC											
3	Calculated	70	2.9	20	1DC											
4	Calculated	65	20	1DC	5	Calculated	65	2.8	20	1DC	6	Calculated	65	2.8	30	1DC
5	Calculated	65	2.8	20	1DC											
6	Calculated	65	2.8	30	1DC											

En este caso se observa la consecución del acoplamiento a la frecuencia deseada, pero con un nivel de pérdida de retorno más cercano a los -10 dB.

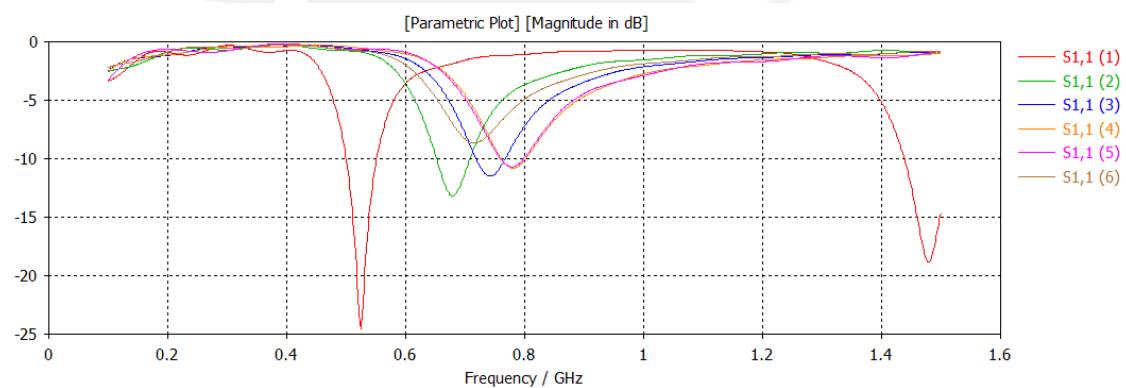


Figura 3.7: S11 obtenidos realizando las variaciones en la geometría tipo T

FUENTE: Elaboración propia

3.2.4 Simulación del elemento reflector

A continuación se considera añadir un elemento reflector como en las antenas Quasi-Yagi [5]. Nuevamente se realizó el análisis de las simulaciones obtenidas con este nuevo elemento; que tiene como finalidad en principio, redirigir la potencia radiada hacia una dirección específica. Dicho esto, se establece el nuevo elemento reflector con el mismo ancho del monopolo, esto para mantener el acoplamiento de 50Ω de la línea de entrada. Se realizó la separación (d_1) correspondiente entre el monopolo y el reflector. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.1

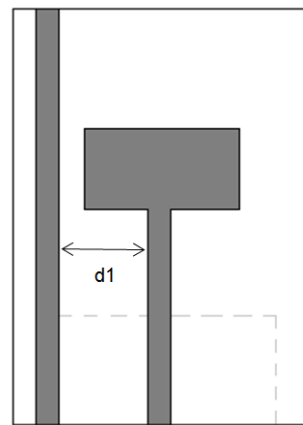


Figura 3.8: Antena de configuración tipo T con elemento reflector, separados una distancia d_1 (mm).

FUENTE: Elaboración propia

En la tabla 3.3 se muestran los valores de d_1 (mm) considerados en las simulaciones realizadas.

Tabla 3.3: Variación de dimensiones (en mm) de la forma tipo T con reflector.

3D Run ID	Status	Parameters	1D Results\S-Parameters
		d_1	S1,1
1	Calculated	0	1DC
2	Calculated	10	1DC
3	Calculated	15	1DC
4	Calculated	20	1DC
5	Calculated	25	1DC

Los resultados obtenidos de las separaciones del elemento reflector y la antena tipo T, son los observados en la figura 3.9.

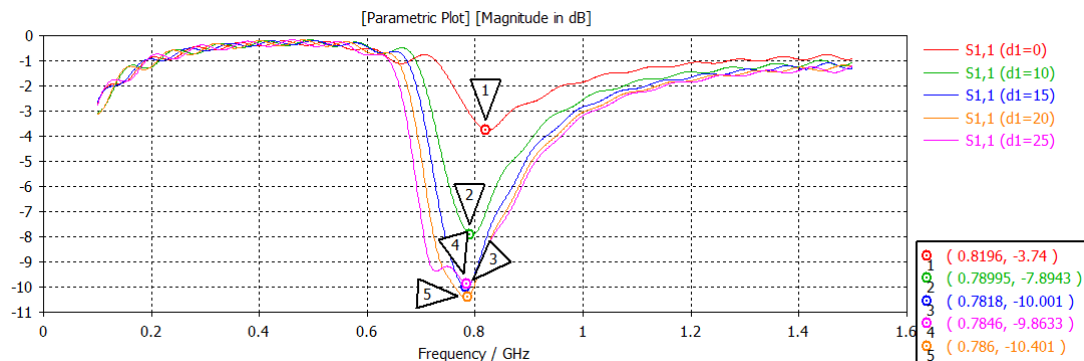


Figura 3.9: S11 obtenidos para los diferentes valores de separación d_1

FUENTE: Elaboración propia

El patrón de radiación para la simulación 5 de la figura 3.9, obtenido como resultado de agregar el elemento reflector, se muestra a en figura 3.10 donde se observa 3.13 dB en el máximo del lóbulo principal y -3 en el lóbulo secundario.

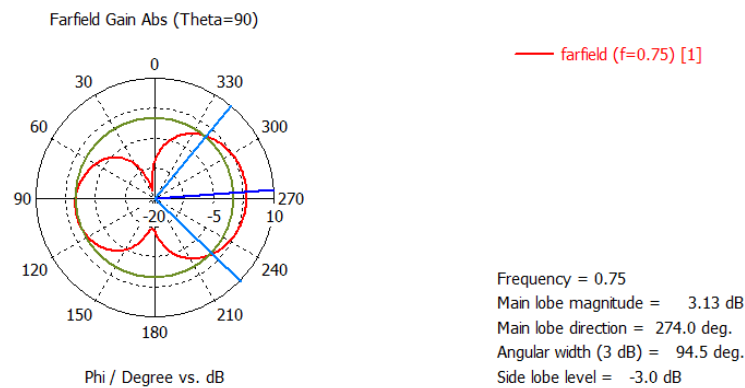


Figura 3.10: Patrón de radiación resultante de la presencia del elemento reflector

FUENTE: Elaboración propia

3.2.5 Simulación del elemento director

Como siguiente paso se busca añadir un elemento director, se probó añadiéndolo delante de la línea de alimentación, es decir en paralelo con el monopolo y el reflector sin conseguir resultado positivo alguno, por el contrario se perjudicaron los resultados hasta el momento obtenidos, por ello nuevamente mediante múltiples pruebas se determinó que el elemento director debía ubicarse en contra posición al plano de tierra inicial (figura 3.11).

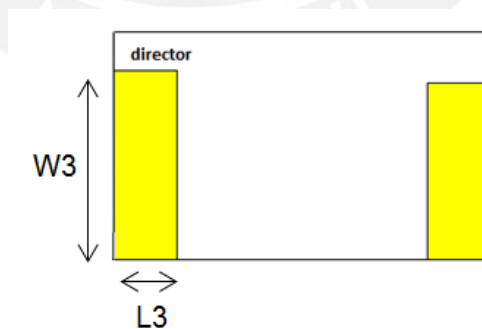


Figura 3.11: Vista posterior de la antena con el nuevo elemento director

FUENTE: Elaboración propia

La gráfica que se muestra en la figura 3.12 corresponde al acoplamiento con el elemento director agregado, en ella se puede notar que existe un mejor

acoplamiento y un ancho de banda mayor a diferencia de las gráficas anteriores. Para este caso el mejor acoplamiento, como resultado de modificar las dimensiones del elemento director, hasta llegar a $W3$ igual a 74 mm y $L3$ igual a 25 mm, se obtuvo la gráfica azul de S_{11} (3), con un ancho de banda que va desde 641.02 MHz hasta 842,87 MHz, es decir 201.85 MHz.

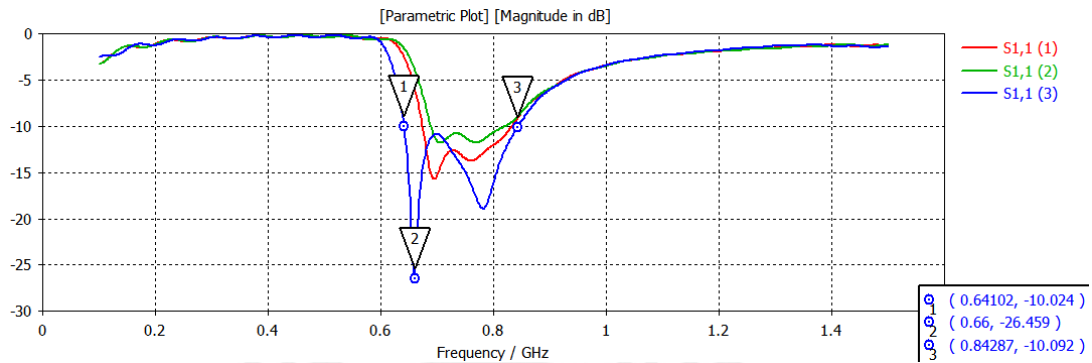


Figura 3.12: S_{11} obtenidos como resultado de agregar el director

FUENTE: Elaboración propia

Consecuentemente el director realizó el trabajo esperado, direccionando mejor la potencia, tal y como se ve en el patrón de radiación de la figura 3.13, donde el lóbulo principal tiene el máximo para 4.13 dB y el lóbulo posterior -7.1 dB.

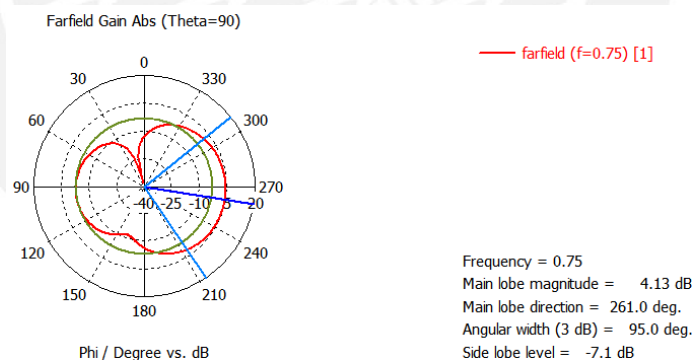


Figura 3.13: Patrón de radiación generado con el director incorporado

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente se debe tener en claro que las simulaciones realizadas fueron hechas usando el método computacional FDTD, esto debido a la relativa rapidez con que realiza los cálculos, en comparación con FEM. Entonces para tener una solución más confiable se deben generar las simulaciones con los diferentes métodos computacionales disponibles en CST. Luego, la gráfica 3.14 muestra el resultado de S_{11} usando FEM. En donde se debe observar que la frecuencia inicial es 694.49

MHz, esto no es del todo bueno puesto que en las pruebas reales este valor puede llegar a superar al valor inicial de la banda (698 MHz).

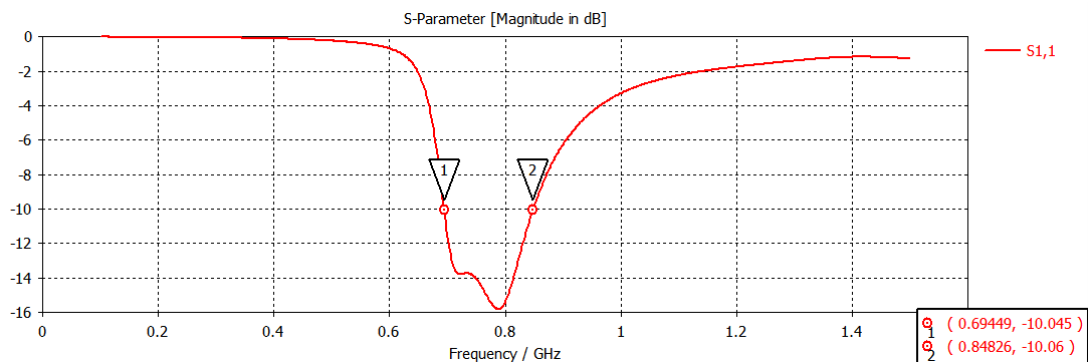


Figura 3.14: S11 con el director incorporado usando el método FEM

FUENTE: Elaboración propia

El correspondiente patrón de radiación usando el método FEM se muestra en la figura 3.15.

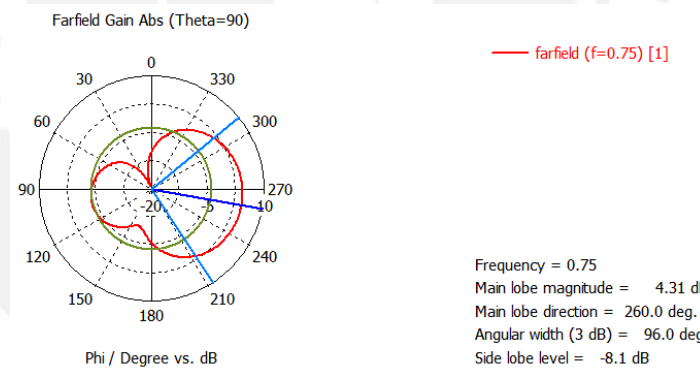


Figura 3.15: Patrón de radiación generado con el director y usando FEM

FUENTE: Elaboración propia

En este punto es importante mencionar que durante las múltiples pruebas realizadas en la medición real del S11, no se lograba el ancho de banda necesario para que la antena opere en todo el rango de frecuencias requerido. Aproximadamente se lograban anchos de banda cercanos a los 50 MHz, casi la mitad de los 108 MHz que comprende a la banda de 700 MHz (ANEXO 4).

Para lograr los 108 MHz requeridos, se recurrió a [1] donde mediante gráficas hechas a partir de experimentación, indican que el espesor contribuye a lograr un

mayor ancho de banda. Definida está como una posible solución al problema surgido, se procedió a duplicar el espesor, de 1.5 a 3 mm.

Finalmente se hace uso de la herramienta de optimización del CST, para buscar que mejorar los resultados obtenidos hasta el momento, para esto el programa realiza un análisis computacional, bajo los parámetros que se le establecen como valores a lograr (goals), en este caso se especificó mejorar el acoplamiento de la antena (por debajo de -10 dB); mediante este procedimiento se obtuvieron los valores finales de la tabla 3.4, donde se muestran las medidas correspondientes a los anchos y largos de los elementos que componen la antena resultante: línea de alimentación, plano de tierra reflector, plano director, etc. según se ha establecido en las figuras 3.16 y 3.17. Todo esto considerando el nuevo valor de espesor (3 mm).

Tabla 3.4: Dimensiones correspondientes a los anchos y largos de los elementos de la antena

<i>Parámetro</i>	<i>Medida (mm)</i>
Ws	90
W1	2.8
W2	18.6
W3	74.2
W4	65
Ls	150
L1	65
L2	20
L3	25
L4	30
D1	38.2

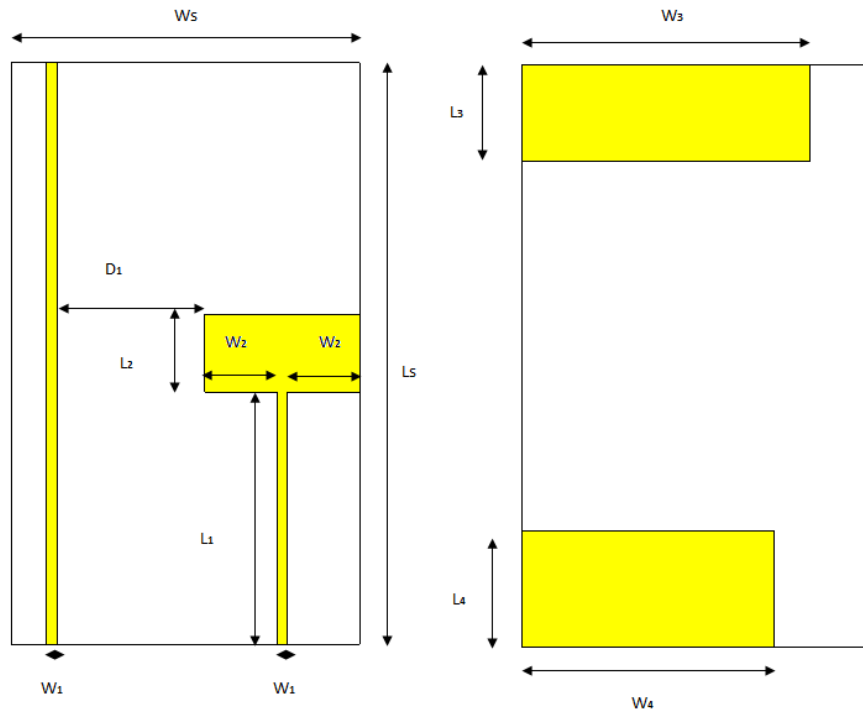


Figura 3.16: Vista frontal y posterior de la antena final

FUENTE: Elaboración propia

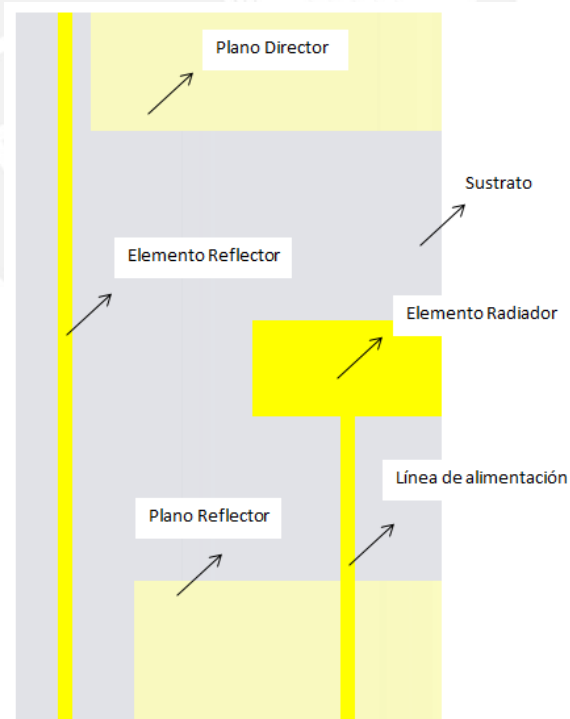


Figura 3.17: Vista general de los elementos que componen la antena

FUENTE: Elaboración propia

3.2.6 Resultados de simulación finales

Por último se muestran los resultados obtenidos de la simulación del diseño final de la antena, resultados que serán contrastados con los obtenidos en el capítulo siguiente.

3.2.6.1 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión obtenido muestra el correcto acoplamiento de la antena (por debajo de -10 dB), desde 678.45 MHz hasta 857.68 MHz. Teniendo como valor de mejor acoplamiento -13.13 dB a 787.75 MHz. Este resultado se obtiene mediante la simulación FDTD (figura 3.18). Mientras que usando FEM se obtiene la gráfica 3.19 donde se observa un rango de frecuencias que va desde 692.68 MHz hasta 818.18 MHz y como mejor acoplamiento, -11.66 dB a 614.25 MHz. No obstante el bajo nivel de acoplamiento, se considera este el diseño final.

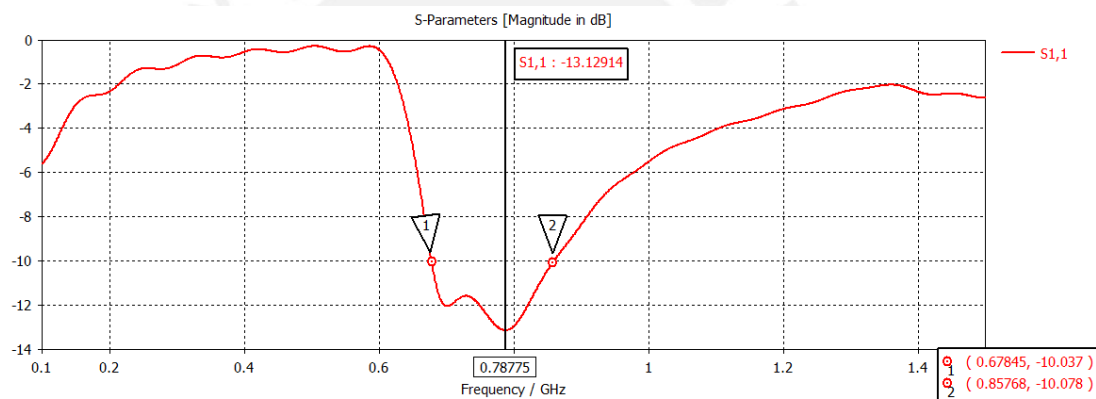


Figura 3.18: S11 de la antena final usando FDTD

FUENTE: Elaboración propia

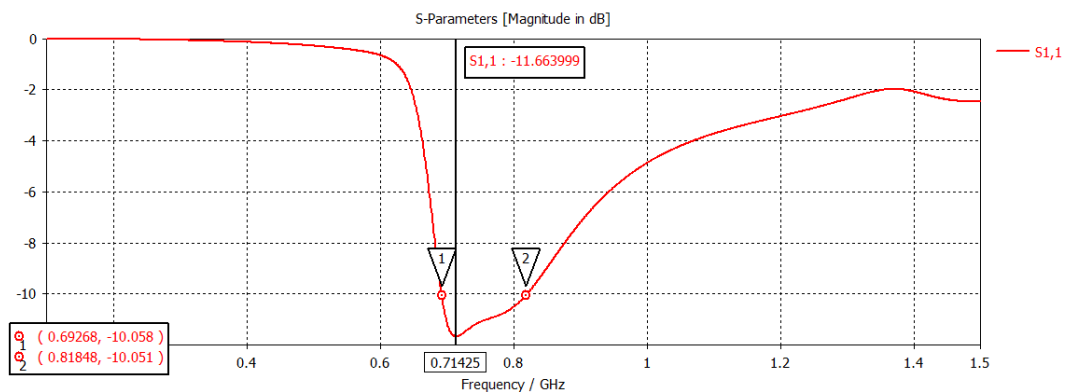


Figura 3.19: S11 de la antena final usando FEM

FUENTE: Elaboración propia

3.2.6.2 Relación de onda estacionaria (VSWR)

Tal como se observa en las figuras 3.20 y 3.21; correspondientes a las simulaciones realizadas con FDTD y FEM respectivamente, el valor de VSRW se acerca a 1, siendo este valor el ideal.

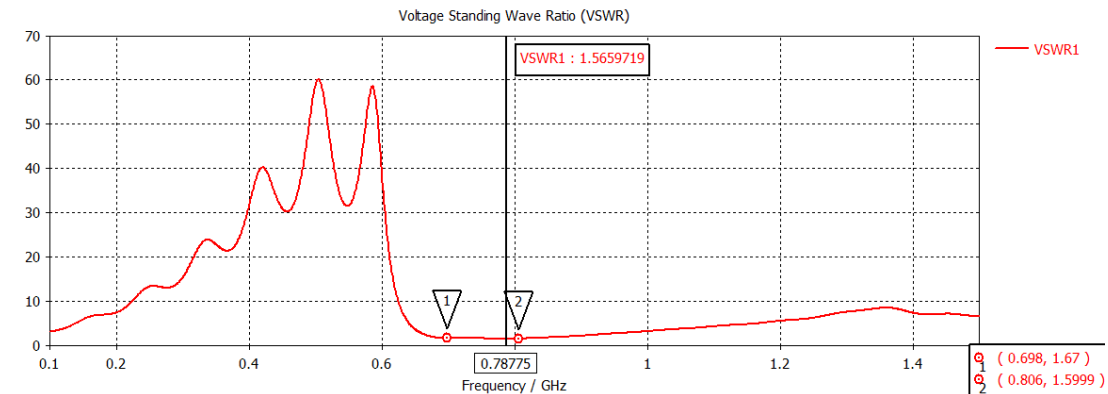


Figura 3.20: VSWR de la antena final usando FDTD

FUENTE: Elaboración propia

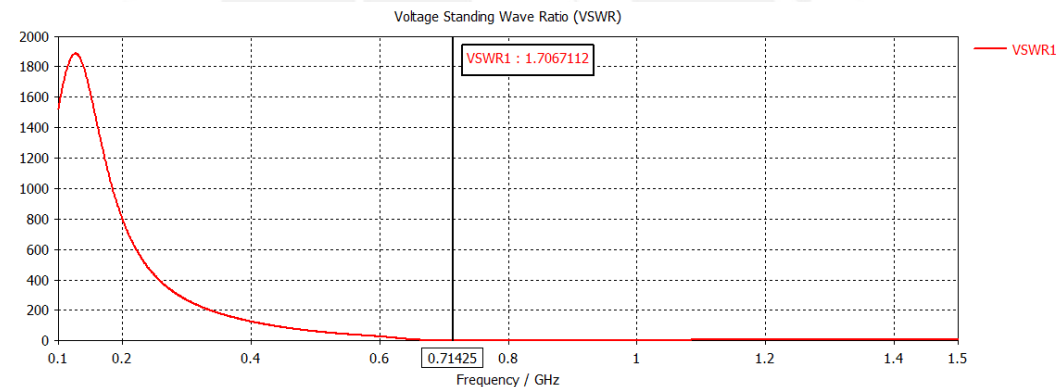


Figura 3.21: VSWR de la antena final usando FEM

FUENTE: Elaboración propia

3.2.6.3 Ganancia

La ganancia obtenida en la banda está entre 4.9 y 3.7 dB según la figura 3.22; valores que superan el resultado promedio propuesto como objetivo a alcanzar.

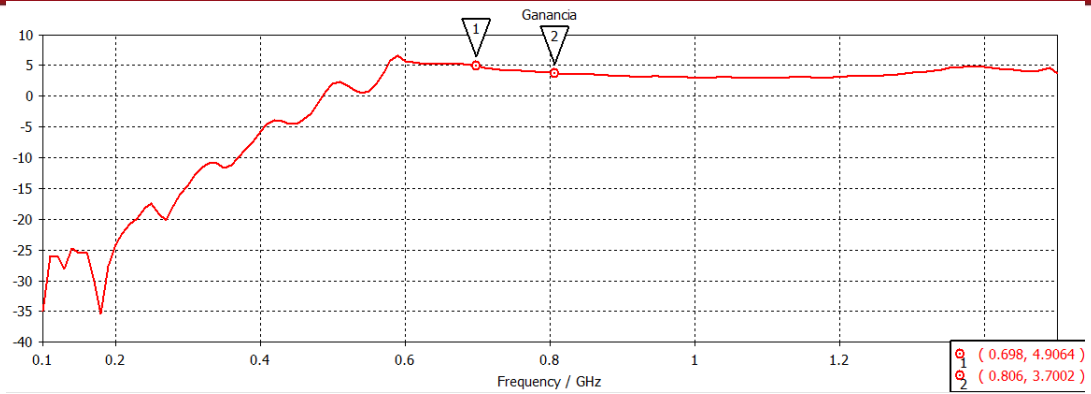


Figura 3.22: Ganancia de la antena final usando FDTD

FUENTE: Elaboración propia

3.2.6.4 Directividad

La directividad obtenida en la banda está entre 4.29 y 3.36 dBi, según la figura 3.23.

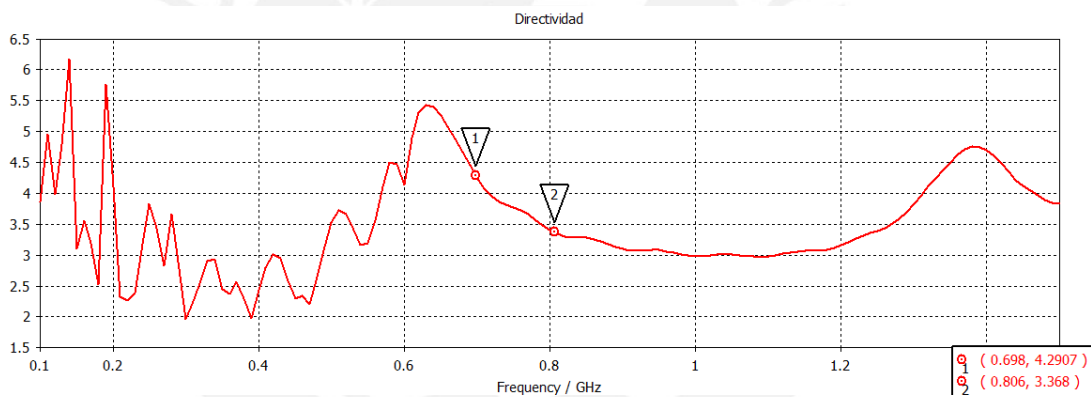
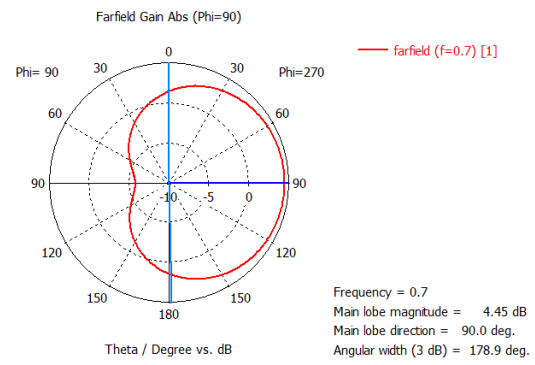
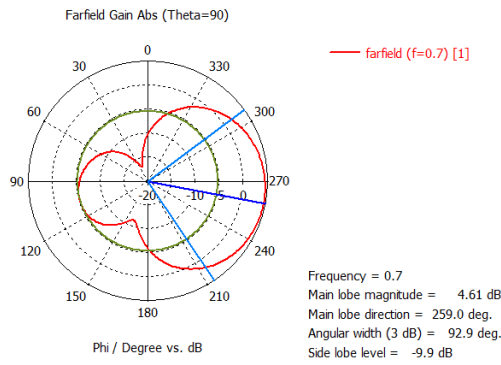


Figura 3.23: Directividad de la antena final usando FDTD

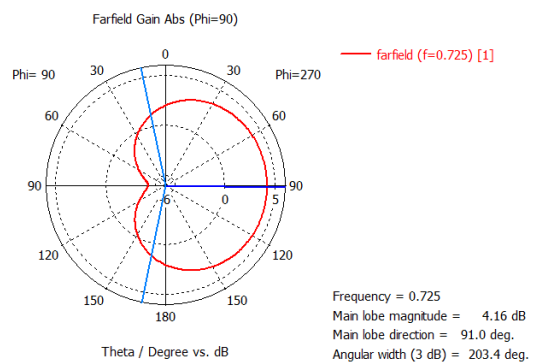
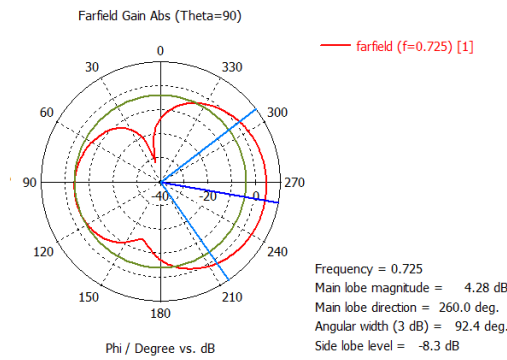
FUENTE: Elaboración propia

3.2.6.5 Patrones de radiación

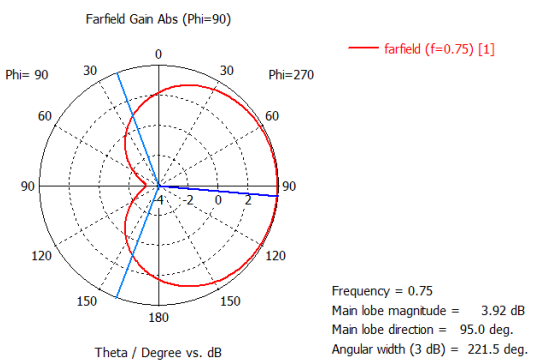
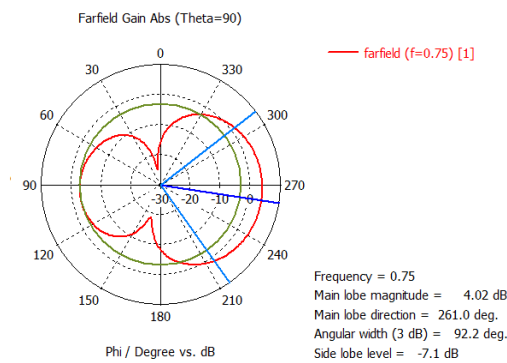
Los diagramas de radiación en azimut y elevación, correspondientes a 5 muestras en la banda (700, 725, 750, 775 y 800 MHz) se muestran en las figuras 7.24 (a, b, c, d y e).



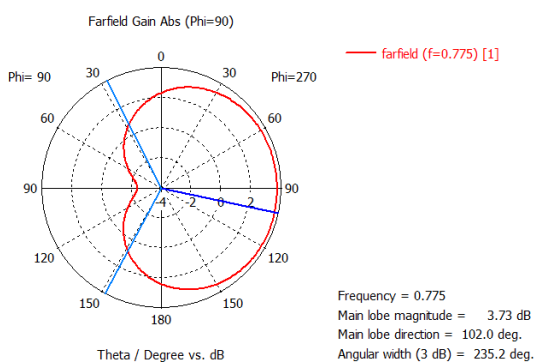
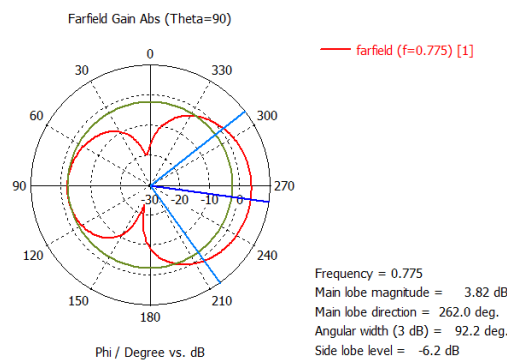
(a) 700 MHz



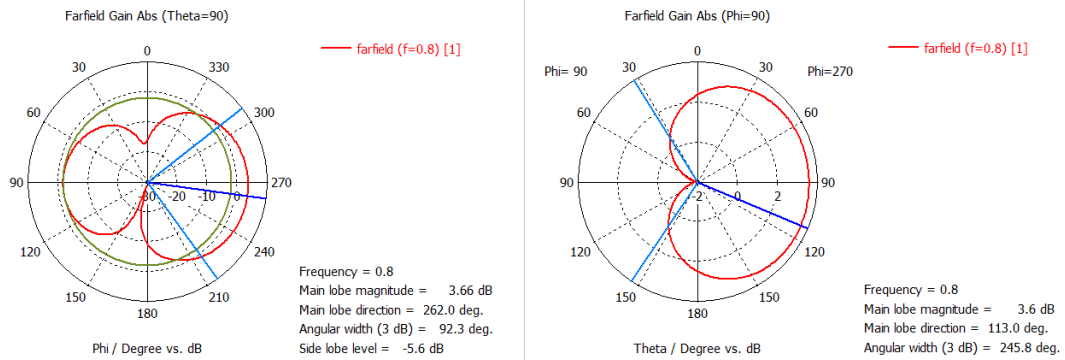
(b) 725 MHz



(c) 750 MHz



(d) 775 MHz



(e) 800 MHz

Figura 3.24: Diagramas de radiación en azimut y elevación para: (a) 700 MHz, (b) 725 MHz, (c) 750 MHz, (d) 775 MHz y (e) 800 MHz

FUENTE: Elaboración propia

Los patrones de radiación en 3D para azimut y elevación se presentan en las figuras 3.25 y 3.26 respectivamente.

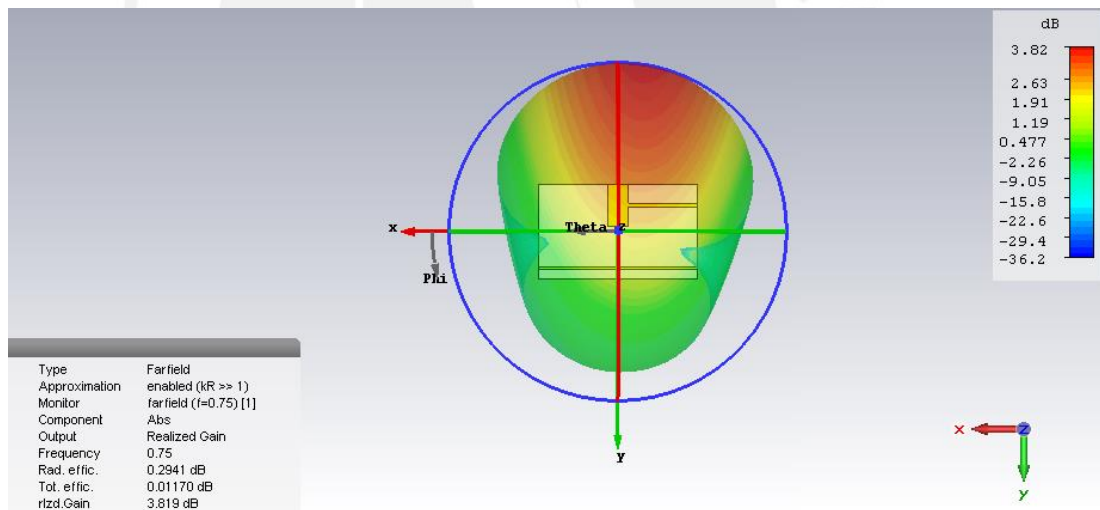


Figura 3.25: Patrón de radiación de Azimut en 3D para 750 MHz

FUENTE: Elaboración propia

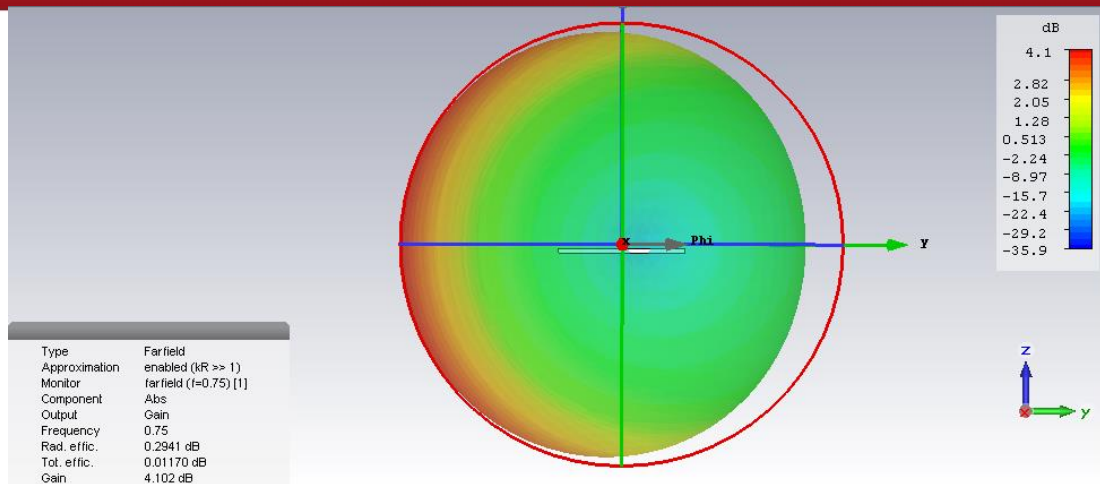


Figura 3.26: Patrón de radiación de elevación en 3D para 750 MHz

FUENTE: Elaboración propia

Los correspondientes resultados de las simulaciones pueden ser visualizados en los anexos correspondientes a cada programa usado (ANEXOS 1, 2 y 3).

3.3 Fabricación de la antena

Una vez establecido, mediante simulación, el diseño final de la antena, se procede a su fabricación.

Tal como se indicó anteriormente el sustrato a usar es fibra de vidrio (FR4). Existe un tipo de fibra de vidrio fotosensible (figura 3.18), la cual facilitará la impresión del diseño sobre este material. Haciendo uso de las herramientas que brinda el programa AutoCAD (ANEXO 5), se le da a los elementos que corresponderán al cobre el color negro, esto debido a que como se mencionó la fibra es sensible a la luz, entonces dicho color impedirá el paso de la misma; luego se realiza la impresión en papel canson. A continuación se procede a imprimir el diseño sobre la fibra que tiene las dimensiones de largo y ancho de la antena, 150 mm y 90 mm respectivamente, para ello se retira la recubierta plástica que protege a la fibra, evitando en lo posible le dé directamente la luz; se coloca cuidadosamente el papel canson con el diseño impreso sobre la máquina insoladora (marca Mega electronics, modelo LV202E) y sobre este la fibra con el lado al cual se le retiro la cubierta plástica. Seguidamente se cierra la máquina insoladora (figura 3.19-a) y se establecen tres minutos para el proceso de impresión. De igual manera se siguen los mismos pasos para la otra cara de la antena. Luego se procede a realizar el revelado, el cual consiste en eliminar el barniz fotosensible en las partes en que no

se requiere, quedando al descubierto el cobre que será atacado por el ácido corrosivo en el proceso siguiente, para ello se sumerge la antena por el lapso de dos minutos aproximadamente, en la máquina de procesamiento de revelado y decapado (marca Mega electronics, modelo PA310) que contiene el líquido revelador (figura 3.19-b).

Por último se realiza el decapado, que consiste en corroer el cobre sobrante. Esto se logra sumergiendo la antena revelada en una solución ácida de persulfato de sodio. Una vez terminado el decapado, se elimina con acetona la resina sobrante, que aún recubre el cobre de la antena fabricada (figura 3.20).



Figura 3.18: Fibra de vidrio fotosensible (FR4).

FUENTE: Elaboración propia



Figura 3.19: (a) máquina insoladora, (b) máquina de revelado y decapado.

FUENTE: Elaboración propia

En el caso de la fibra no fotosensible, se realiza la impresión del diseño usando el método de serigrafía, el cual consiste en cubrir el cobre deseado con un esmalte protector, resistente al ácido corrosivo usado en el proceso de decapado.

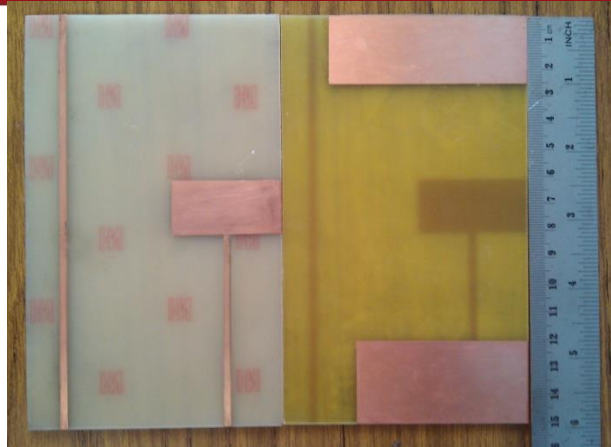


Figura 3.20: Vista frontal y posterior de la antena procesada por completo

FUENTE: Elaboración propia

Una vez obtenidas ambas caras de la antena, se procede a pegar las superficies libres de cobre, usando para este propósito pegamento instantáneo (cianoacrilato - Triz), tratando de usar la mínima cantidad posible, de preferencia solo en los bordes, puesto que dicho pegamento puede alterar la permitividad final de la estructura. Como último paso se suelda un conector SMA, teniendo cuidado en el proceso de soldadura, ya que un exceso del estaño empleado, una mala colocación del conector, un calentamiento excesivo del mismo o una superficie rugosa en la soldadura, pueden repercutir negativamente en el funcionamiento de la antena; el resultado final de la fabricación es el mostrado en la figura 3.21.

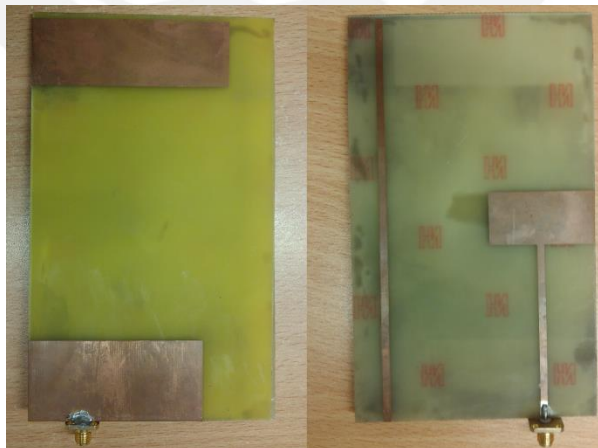


Figura 3.21: Vista frontal y posterior del diseño final de la antena construida

FUENTE: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

MEDICIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se caracteriza la antena a través de la medición de los parámetros que la definen; en este proyecto se realiza la medición del coeficiente de reflexión (parámetro S_{11}), relación de onda estacionaria (VSWR), ganancia, patrón de radiación y directividad, a su vez que se hace el correspondiente análisis en comparación con los resultados obtenidos mediante simulación en el capítulo 3.

4.1 Medición del coeficiente de reflexión

Para obtener el coeficiente de reflexión de la antena se usó el analizador de redes (VNA - Vector Network Analyzer), de la marca Agilent, modelo 8722ET (figura 4.1), cuyo rango de frecuencias abarca desde los 50 MHz hasta los 40 GHz. Este dispositivo proporciona una relación de potencias en el punto de medición final requerido, eliminando así las pérdidas que introducen los cables y conectores, en este caso en particular al tener la antena un solo puerto de entrada, se efectúa la calibración SOL (Short-Open-Load) a la entrada del conector SMA donde se conectará dicha antena.

Una vez calibrado el VNA, se procede a conectar la antena y posicionarla de manera tal que esté lo más alejada posible de los elementos metálicos existentes en las cercanías, esto para evitar posibles reflexiones que afecten la medición (figura 4.2).



Figura 4.1: Analizador de redes de la marca Agilent, modelo 8722ET

FUENTE: Elaboración propia

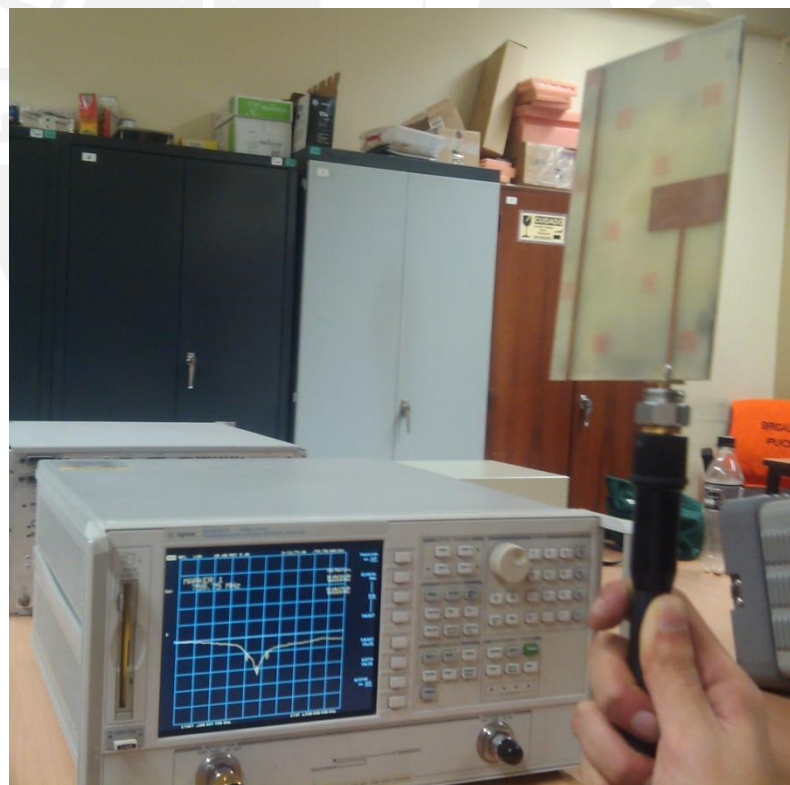


Figura 4.2: Medición del S11 de la antena usando el analizador de redes

FUENTE: Elaboración propia

El resultado de la medición del S_{11} (Coeficiente de Reflexión) de la antena se muestra en la figura 4.3, en donde se observa el correcto acoplamiento de la antena (menor a -10 dB) para la banda de frecuencias requerida.

El punto de mejor acoplamiento se da en la frecuencia de 775.5 MHz a -24.059 dB, y el ancho de banda resultante se obtiene de la diferencia de los valores límites de frecuencia entre 882.25 y 681.875 MHz, es decir 200.375 MHz; en la figura 4.4 se hace el contraste del coeficiente de reflexión de la medición y de las simulaciones realizadas. Finalmente la tabla 4.1 muestra la comparación de la medición frente a la simulación (FDTD), cuyos valores son los más cercanos a los medidos.

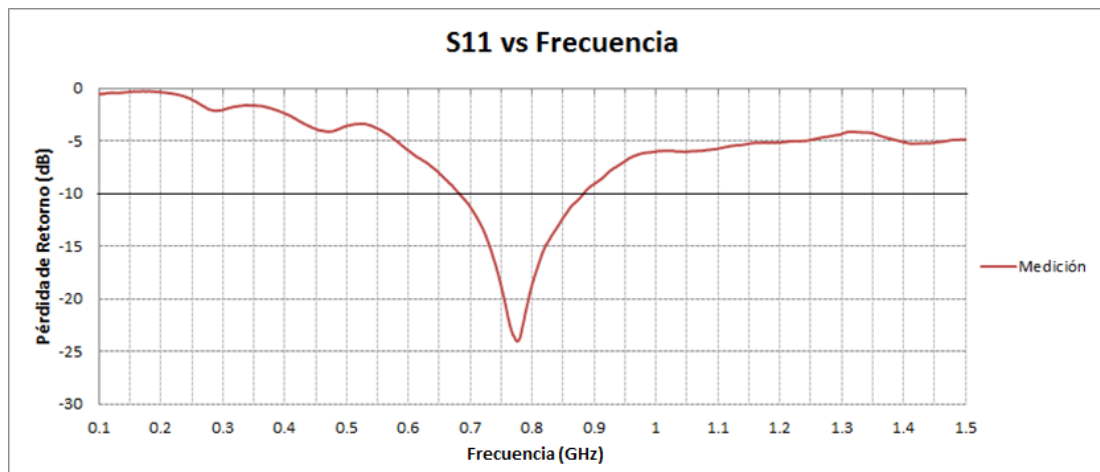


Figura 4.3: Pérdida de retorno medido del diseño final

FUENTE: Elaboración propia

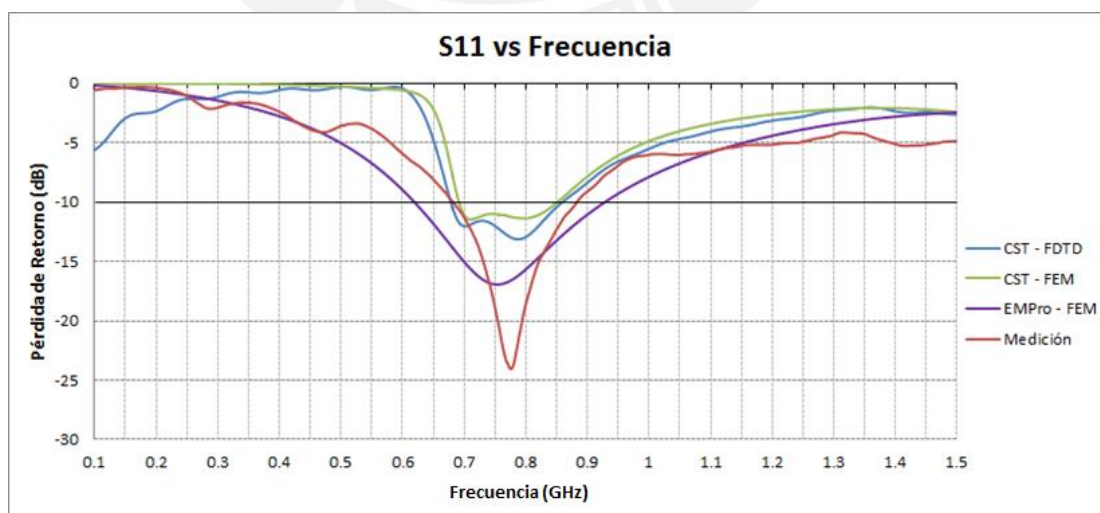


Figura 4.4: Comparación de pérdidas de retorno de medición y simulaciones

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 4.1: Acoplamiento y ancho de banda obtenidos en medición y simulación

	Medición		Simulación - FDTD	
	Frecuencia (MHz)	Pérdida de retorno (dB)	Frecuencia (MHz)	Pérdida de retorno (dB)
f1	681.875	-10.008	678.375	-10.024
fc	775.5	-24.059	787.75	-13.129
f2	882.25	-10.045	858.624	-10.037
BW (Ancho de Banda) MHz	200.375		180.249	

4.2 Relación de onda estacionaria (VSWR)

Dado que la VSWR está directamente relacionada con el coeficiente de reflexión (tal y como se muestra en el segundo capítulo), para la obtención de la misma, nos remitimos a las matemáticas que intervienen en ella; esto es, con los valores de pérdida de retorno se halla el coeficiente de reflexión, para luego hacer uso de la ecuación 2.41, de la cual se obtiene como resultado final el mostrado en la figura 4.5.

Asimismo en la figura 4.6 se muestran las curvas del VSWR de la medición real en contraste con las obtenidas mediante simulación (FEM y FDTD), en el rango de frecuencias de interés de este proyecto. En ella se observa que la curva se mantiene entre uno y dos (1.344 en promedio), siendo el ideal de adaptación cuando VSWR es igual a uno, y alcanza el valor más bajo y cercano a 1 en la frecuencia de 775.5 MHz, valor en el que se obtiene también el mejor acoplamiento.

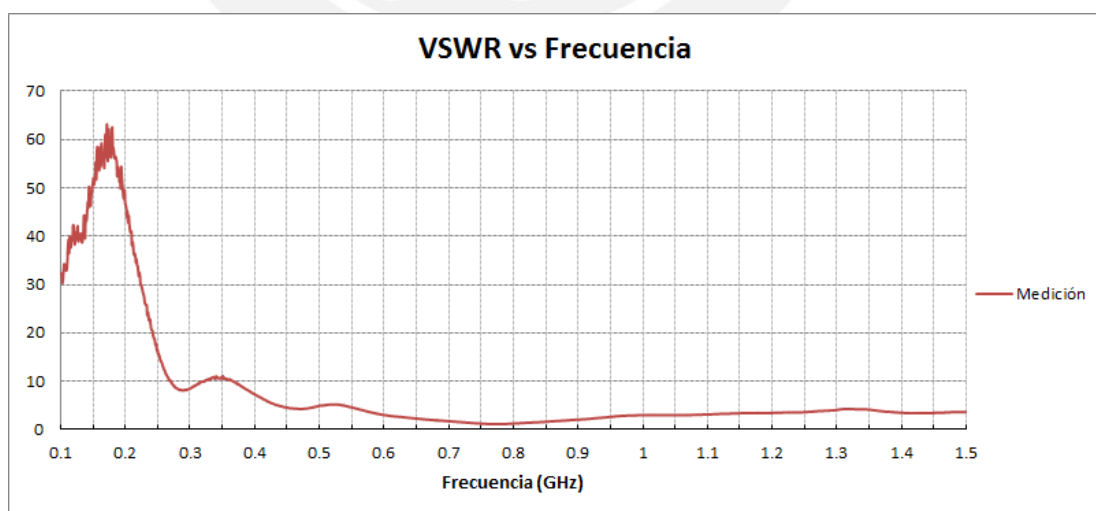


Figura 4.5: VSWR calculado a partir del coeficiente de reflexión de la medición

FUENTE: Elaboración propia

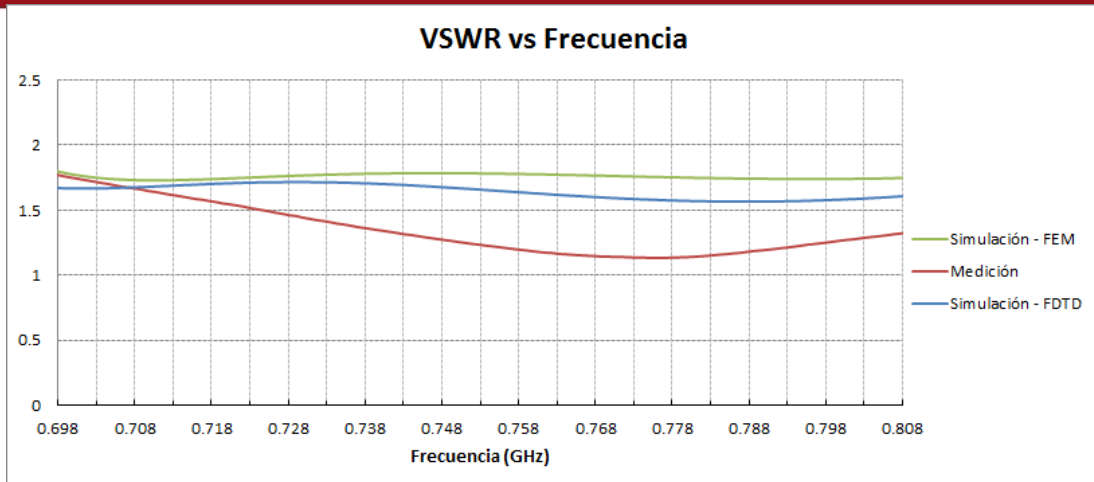


Figura 4.6: Comparación de VSWR de la medición y simulaciones

FUENTE: Elaboración propia

4.3 Ganancia

Existen una serie de técnicas empleadas para realizar mediciones de ganancia absoluta, las cuales se basan en la ecuación de transmisión de Friss, haciendo uso de dos antenas, así también existen métodos con tres o cuatro antenas (figura 4.7), que otorgan una mayor precisión en el resultado final. En este trabajo se describe el método usado de dos antenas iguales [1].

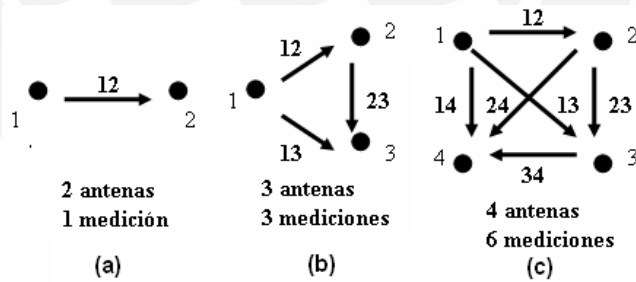


Figura 4.7: Distribución de antenas para el cálculo de ganancia, (a) 2 antenas, (b) 3 antenas, (c) 4 antenas.

FUENTE: “Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia de antenas de RF y microondas”

4.3.1 Método de dos antenas

Para la medición de ganancia usando este método, se considera el esquema mostrado en la figura 4.8, donde el generador de señales manda una portadora de RF a la frecuencia de medición con una potencia P_t de valor fijo, dado que los

cables coaxiales que conectan el generador y el analizador con las antenas introducen pérdidas, se debe realizar la correspondiente calibración. Usando el power sensor USB (dispositivo portable usado para medir potencia, marca Satori, modelo ST2655MA) se miden las pérdidas a través del cable coaxial; mediante la conexión en serie del generador de potencia (marca Agilent, modelo E8257D), cable coaxial RG-52, power sensor USB y computadora de escritorio, tal como se observa en la figura 4.9; es decir, se obtiene el verdadero valor de potencia que llega a la entrada de la antena.

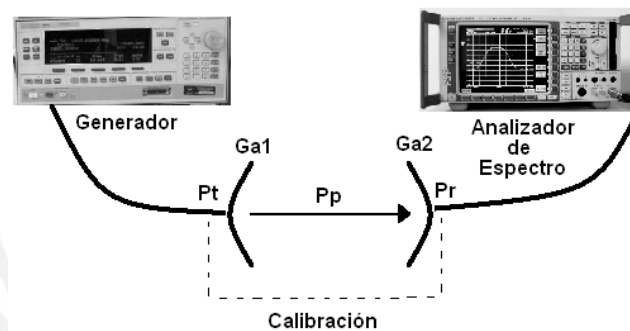


Figura 4.8: Esquema del método de dos antenas para el cálculo de ganancia

FUENTE: "Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia de antenas de RF y microondas"



Figura 4.9: Medición de potencia a la entrada de la antena (pérdidas por cables coaxiales)

FUENTE: Elaboración propia

Se conectan las antenas y se orientan de manera que se logre el máximo de potencia recibida P_r . Para ello, las antenas deben estar separadas una distancia

mayor a la requerida para funcionar en el campo lejano R_{ff} (Far field), esto con el fin de minimizar los efectos de proximidad y multitrayectoria [3].

Las antenas usadas son iguales, por lo que se considera a priori que ambas tienen la misma ganancia. Además para la realización de los cálculos correspondientes se establece como potencia entregada por el generador 0 dBm, separación entre antenas 1.05 metros (mayor a los 0.43 m del far field), altura 1.40 metros y dimensión máxima de la antena 0.15 metros; asimismo, además de la ecuación de Friss se usan las siguientes fórmulas para el cálculo de la ganancia [3].

$$R_{ff} = \frac{2(D_{max})^2}{\lambda} \quad (m) \quad (4.1)$$

Donde D_{max} (0.15 m) es la dimensión más grande de la antena y $\lambda = c/f$ es la longitud de onda en metros. P_p es la pérdida de propagación en espacio libre.

$$P_p = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{ff}} \right)^2 \quad (dB) \quad (4.2)$$

De la fórmula de Friss expresada en decibelios se despeja G_{ant} , que corresponde al valor de ganancia de cada una de las antenas.

$$G_{ant} = \frac{1}{2} \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R_{ff}}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (dB) \quad (4.3)$$

$$G_{ant} = \frac{P_r - P_t - P_p}{2} \quad (dB) \quad (4.4)$$

El montaje realizado, correspondiente a las mediciones para el cálculo de ganancia se muestra en la figura 4.10 en donde se pueden dar a notar ciertos factores que pueden repercutir negativamente en el resultado final; esto es, un ambiente no controlado (susceptible a posibles reflexiones), soporte metálico en el trípode que sostiene la antena, deficiente alineamiento entre antenas, esto debido a que dicho trípode no es idóneo para realizar tal propósito. En suma estas pequeñas consideraciones pueden generar pérdidas de potencia que no se consideren en el cálculo final de la ganancia, de manera que los valores resultantes no se acerquen del todo a lo esperado.



Figura 4.10: Medición de ganancia usando el método de dos antenas

FUENTE: Elaboración propia

En la tabla 4.2 se muestran los cálculos realizados y los resultados obtenidos para las diferentes frecuencias de la banda de 700 MHz, en las cuales se obtienen las ganancias, observables en la última columna.

Tabla 4.2: Resultados de los valores necesarios para el cálculo de ganancias en el rango de operación de la antena

		Frecuencia (MHz)	Ganancia FDTD (dB)	Lambda (mm)	Farfield (mm)	Potencia Pt (dBm)	Distancia Rff (mm)	Potencia Pr (dBm)	Ganancia Real (dB)
		698	4.58	429.799	104.7	-1.295	1050	-27.66	1.689
		700	4.59	428.571	105	-1.297	1050	-27.655	1.705
Uplink	Bloque A 703 - 718 MHz	703	4.52	426.743	105.45	-1.303	1050	-27.805	1.651
		710.5	4.43	422.238	106.575	-1.309	1050	-27.633	1.786
		718	4.33	417.827	107.7	-1.312	1050	-27.787	1.757
		725	4.05	413.793	108.75	-1.317	1050	-27.617	1.886
	Bloque B 718 - 733 MHz	725.5	4.26	413.508	108.825	-1.318	1050	-27.615	1.891
		733	4.16	409.277	109.95	-1.322	1050	-27.939	1.775
		740.5	4.08	405.132	111.075	-1.338	1050	-28.077	1.759
	Bloque C 733 - 748 MHz	748	4.01	401.07	112.2	-1.349	1050	-28.256	1.718
		750	3.82	400	112.5	-1.347	1050	-28.321	1.696
		753	3.97	398.406	112.95	-1.343	1050	-28.269	1.738
Downlink	Bloque A 758 - 773 MHz	758	3.94	395.778	113.7	-1.344	1050	-28.396	1.703
		765.5	3.87	391.901	114.825	-1.364	1050	-27.859	2.025
		773	3.82	388.098	115.95	-1.376	1050	-27.665	2.17
	Bloque B 773 - 788 MHz	775	3.78	387.097	116.25	-1.375	1050	-28.168	1.929
		780.5	3.76	384.369	117.075	-1.368	1050	-27.65	2.216
		788	3.71	380.711	118.2	-1.375	1050	-27.507	2.332
	Bloque C 788 - 803 MHz	795.5	3.68	377.121	119.325	-1.397	1050	-27.966	2.155
		800	3.53	375	120	-1.405	1050	-28.11	2.111
		803	3.64	373.599	120.45	-1.456	1050	-28.278	2.069
		806	3.62	372.208	120.9	-1.501	1050	-28.118	2.188

FUENTE: Elaboración propia

El resultado de graficar la ganancia versus la frecuencia se exhibe en la figura 4.11, de donde se obtiene el valor promedio de 1.91 dB; seguidamente se tiene la comparación de los valores de ganancia de medición y simulaciones, donde se nota claramente que la curva de ganancia medida está por debajo de las curvas de los valores esperados según las simulaciones; el valor promedio de ganancia en la simulación usando el software CST, es 4.01 dB, mientras que el software ADS entrega un valor promedio de 2.9 dB.

La diferencia entre los valores de medición y simulación puede deberse en principio a los factores perjudiciales que se mencionó líneas arriba; además, se debe tener en cuenta el hecho de que, al no tener mediciones en elevación se está asumiendo que la ganancia absoluta está en el plano sobre el cual se ha trazado la medición, lo cual no necesariamente es cierto.

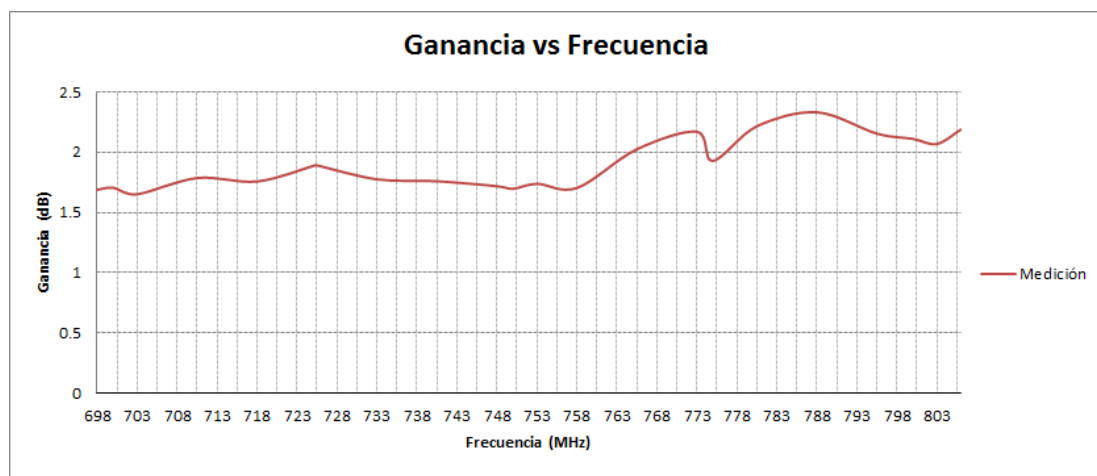


Figura 4.11: Valores de ganancias medidas

FUENTE: Elaboración propia

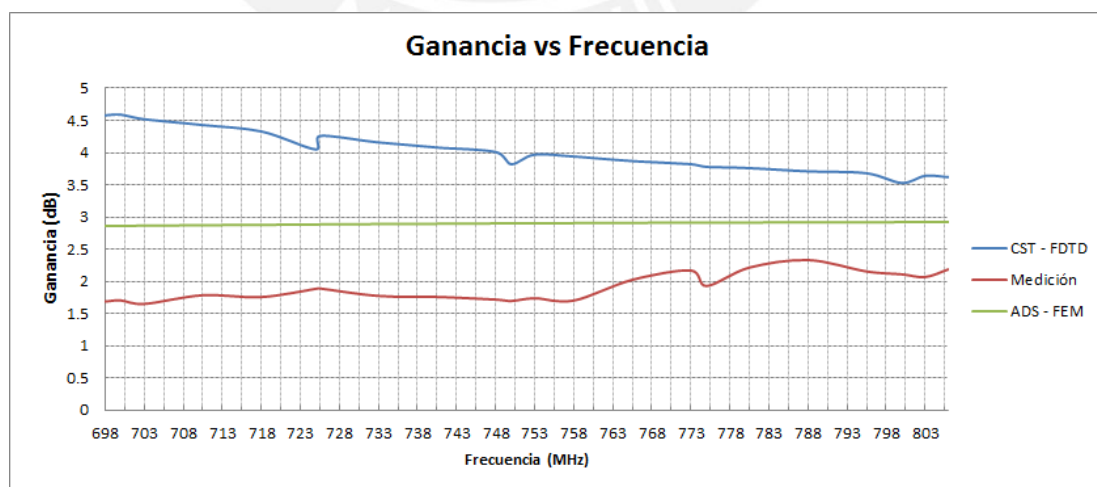


Figura 4.12: Comparación de ganancias de medición y de simulaciones en la banda de 700 MHz

FUENTE: Elaboración propia

4.4 Patrones de radiación

Para lograr los correspondientes patrones de radiación en azimut, se realiza en principio la misma configuración que se describe para la obtención de la ganancia (figura 4.13), sin embargo la diferencia radica en que, en este caso, el eje perpendicular a la antena (eje que la sostiene) se hace rotar 360 grados (haciendo uso de un goniómetro para una mayor precisión); vale aclarar que no es necesaria una calibración a la entrada de la antena, no obstante, nuevamente haciendo uso de la ecuación de Friss se debe determinar la distancia de separación entre las antenas, de tal forma que la señal recibida sea lo suficientemente notoria en el analizador de espectros. Dicho lo anterior, se establece como nivel de potencia 0 dBm en el generador, así como la frecuencia a la cual se desea obtener el patrón de radiación, además se consideran dos grados como desplazamiento angular para la toma de valores de potencia, es decir se obtienen 180 muestras en total por cada patrón de radiación.

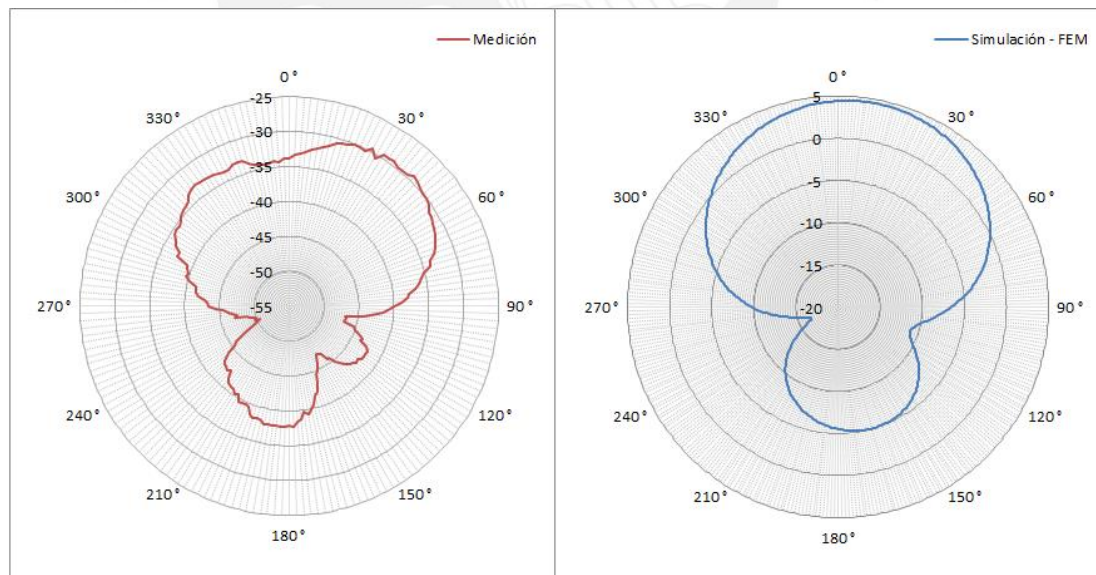


Figura 4.13: Montaje realizado para la medición del patrón de radiación en azimut

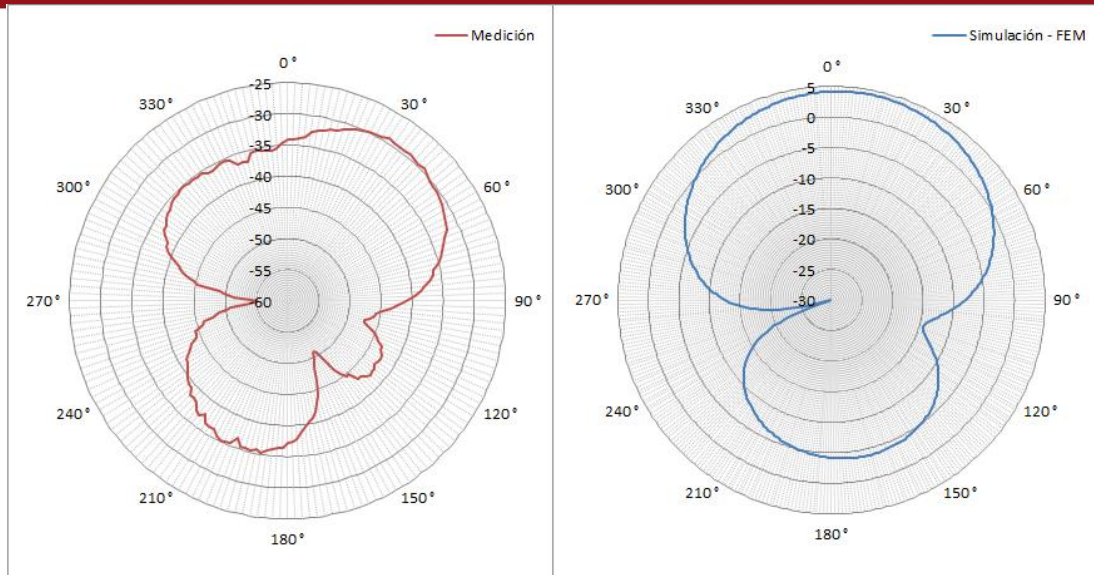
FUENTE: Elaboración propia

Se realizaron cinco mediciones de patrón de radiación a las frecuencias de 700, 725, 750, 775 y 800 MHz, esto debido a que se quiere comprobar las ligeras variaciones que se pudieron notar en los resultados de simulación.

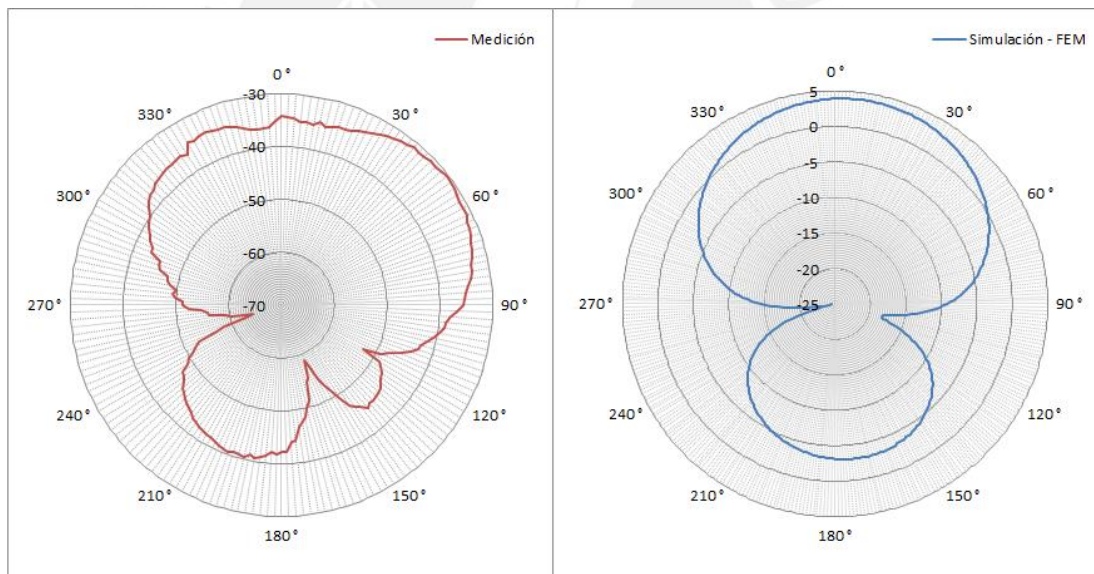
Los patrones de radiación resultantes se muestran en las figuras 4.14, en donde se observa una correspondencia con los gráficos obtenidos en las simulaciones. Vale aclarar que los niveles de potencia mostrados en medición y simulación no son iguales debido a que ambos no tienen el mismo nivel de potencia a la entrada. Sin embargo se puede notar que las diferencias entre los máximos en los lóbulos principales y el punto mínimo de referencia (el centro) presentan casi el mismo valor. Por ejemplo el patrón de radiación hallado para 700 MHz da como máximo de potencia -30 dBm aproximadamente y como mínimo -55 dBm, es decir existe una diferencia de -25 dB, relación que se condice con los valores de simulación, para este ejemplo la simulación en 700 MHz presenta el máximo en 5 dBm y el mínimo en -20 dBm aproximadamente, de donde se obtiene nuevamente una diferencia de -25 dB. Así, realizando el análisis visual y cuantitativo para cada uno de los patrones de radiación, se puede notar la correspondencia entre uno y otro resultado, no obstante es notoria la rotación existente en el resultado obtenido en la medición, ello como respuesta a los posibles factores que se mencionaron en el montaje y medición de ganancia (principalmente la deficiente alineación entre antenas).



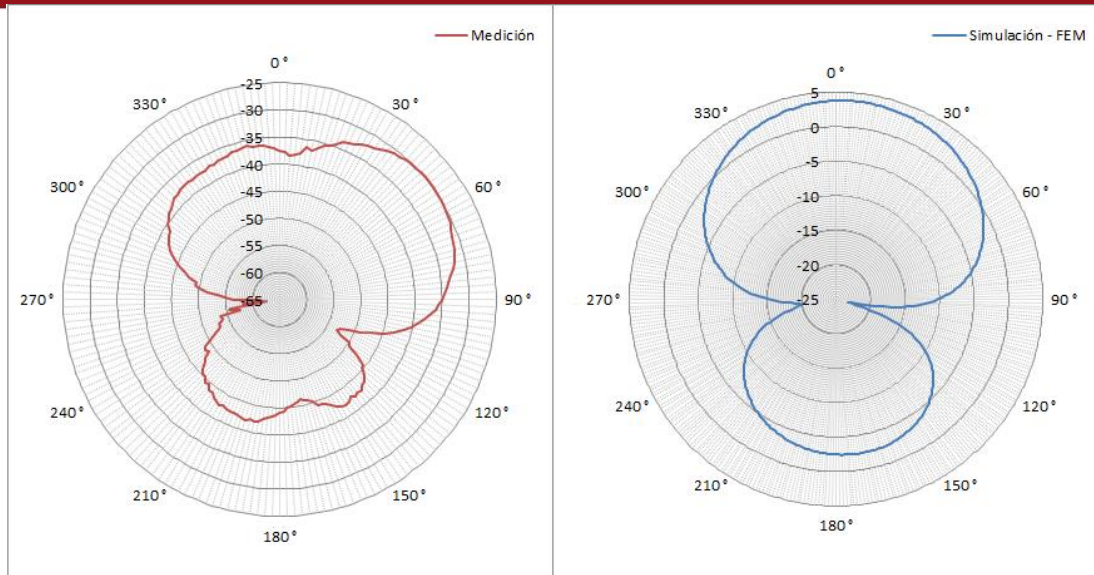
(a) 700 MHz



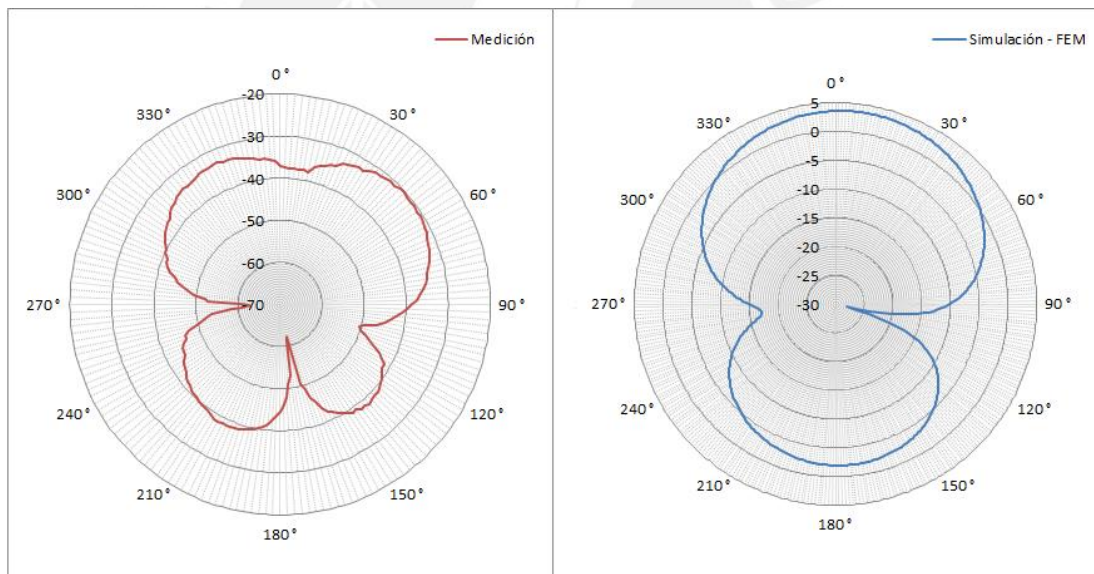
(b) 725 MHz



(c) 750 MHz



(d) 775 MHz



(e) 800 MHz

Figura 4.14: Comparación de patrones de radiación en azimut, de medición (izquierda) y simulación (derecha) para: (a) 700 MHz, (b) 725 MHz, (c) 750 MHz, (d) 775 MHz y (e) 800 MHz.

FUENTE: Elaboración propia

4.5 Directividad

Se debe precisar que para el cálculo de la directividad se deben tener como referencias los ángulos de las ganancias máximas en azimut y elevación; al no tener el presente trabajo resultados en elevación. Se procederá a considerar la directividad en relación del ancho de haz de media potencia (HPBW), en el diagrama de radiación obtenido en azimut, el cual considera la separación angular en la que la magnitud del diagrama de radiación disminuye en un 50% (-3 dB). Los resultados del análisis a partir de HPBW se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Resultados del análisis del ancho de haz de media potencia (HPBW)

Frecuencia (MHz)	Máximo (dBm)	Posición del máximo (°)	Apertura antihoraria (°)	Apertura horaria (°)	Total apertura (°)
700	-29.17	44	36	22	58
725	-29.67	44	36	24	60
750	-31	44	44	40	84
775	-30.17	44	22	38	60
800	-30.83	44	20	32	52

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

• Conclusiones

Luego del desarrollo de la presente Tesis se concluye que:

- El ancho de banda o rango de frecuencias donde la antena está acoplada está en función del espesor del sustrato, comprobándose un rango de 200.375 MHz para un espesor de 3 mm en la presente tesis.
- La ganancia medida de la antena diseñada varía alrededor de 1 dB con respecto a la ganancia estimada inicialmente, esto debido a variaciones del sustrato y/o condiciones de medición.
- Las variaciones del largo del elemento reflector y la separación respecto a la línea de alimentación, determinan que tanto se puede direccionar la potencia radiada.
- Los resultados de patrón de radiación se asemejan a lo esperado, teniendo en cuenta que ciertos factores (trípodes, entorno) no permitían la máxima precisión para la obtención de mejores resultados.
- Si bien las simulaciones dan un esbozo cercano de lo que se debe conseguir en condiciones reales, no siempre deben tomarse dichos resultados muy a la ligera. Es de suma importancia realizar múltiples pruebas usando los diferentes métodos y simuladores disponibles, esto para obtener un posible resultado más acorde a la realidad.
- Para garantizar las correctas mediciones de ganancia, directividad y patrón de radiación es muy importante respetar la distancia mínima de campo lejano.

- **Recomendaciones**

A continuación se realizan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta sobre esta tesis.

- Se debe considerar que las mediciones reales han sido realizadas en escenarios susceptibles a reflexiones y/o interferencias, por lo cual se recomienda el uso de una cámara anecóica para evitarlas.
- Se debe tratar que la fabricación de la antena sea lo más precisa posible, de modo que los resultados obtenidos sean cercanos a los esperados.
- Se recomienda usar posicionadores de antenas para lograr tener mediciones más exactas de ganancia y de directividad.
- Las herramientas de simulación requieren gran capacidad de procesamiento, por lo que se recomienda el uso de computadores que puedan soportar y agilizar los procesos de tales simulaciones.
- Se debe tener sumo cuidado al momento de soldar el conector, pues una mala realización de este puede repercutir en el funcionamiento de la antena.
- El proceso de unión de las dos caras de los sustratos usados debe ser cuidadosamente realizado, tratando de usar la menor cantidad de pegamento y solo en los bordes, de manera que no afecte en el valor de permitividad final del sustrato, que a su vez podría dar resultados distintos a los esperados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. BALANIS, "Antenna theory: Analysis and Design", New Jersey: J. Wiley, 2005.
- [2] D. POZAR, "Microwave Engineering", Third Edition ed., University of Massachusetts at Amherst: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] E. D. J. O. J. MEDINA, «Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia de antenas de RF y microondas,» de *Simposio de Metrología*, Santiago de Querétaro, México, 2008.
- [4] H. A. E. A. E. H. Kamel S. Sultan, «Novel, Compact and Multiband Antenna for Mobile and Wireless Communication,» de *Electronics Research Institute, Faculty of Engineering, Cairo University*, Giza, Egypt, 2013.
- [5] D. M. S. B. A. L. A. C. M. a. V. F. M. Farran, "Microstrip-fed quasi-Yagi antennas for WLAN applications," in *Proceedings of the 44th European Microwave Conference*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Brescia, 2014.
- [6] D. A. J. C. A. LUIS PACHECO, *El Espectro Radioeléctrico como herramienta para la promoción de la expansión de los servicios móviles y la competencia en el Perú*, Lima, Perú, 2013.
- [7] X. a. J. Y. YUAN YAO, *Multiband Planar Monopole Antenna for LTE MIMO Systems*, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, : Hindawi Publishing Corporation, 2012.
- [8] S. E. KATHERIN GRIFFI, «Antenas planares para Beamforming utilizando elementos Quasi Yagis,» de *Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones*, Lima, 2013.
- [9] MTC, «Líneas Instaladas y en Servicio, según Modalidad de Servicio: 2009-2013,» Ministerio de Transportes y Comunicaciones, [En línea]. Disponible: <http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/comunicaciones.html#s2>. [Último acceso: 26 Junio 2015].
- [10] OSIPTEL, «Reporte Estadístico Abril 2015,» [En línea]. Disponible: http://www.osiptel.gob.pe/Archivos/Publicaciones/reporte_estadistico_n09/reporte_estadistico_e09.html#1/z. [Último acceso: 27 Junio 2015].
- [11] V. V. D. SIDDHESH UTTAM CHAVAN, «Design and Implementation of Dual and Triple Band Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 4, pp. 690-692, 2015.
- [12] P. C. B. a. P. M. M. N. SUMA, «A Wideband Printed Monopole Antenna for 2.4-

GHz WLAN Applications,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, nº 5, pp. 871-873, 2006.

- [13] E. F.-R. RAÚL L. KATZ, «Beneficios Económicos del Dividendo Digital para América Latina,» GSMA / AHCNET, 2011.
- [14] T. V. B. G. NGUYEN MINH TRAN, «Dual-band Microstrip Antenna for 4G-LTE Handheld Devices,» *VNU Journal of Science: Comp. Science & Com. Eng.*, vol. 31, nº 1, p. 55–59, 2015.
- [15] A. K. & S. SINGH, «Designing and Analysis of T-Shape Microstrip Antenna for the 4G Systems,» *Global Journals Inc*, vol. 13, nº 1, 2013.



ANEXOS

- ANEXO 1: SIMULACIONES EN CST
- ANEXO 2: SIMULACIONES EN EMPRO
- ANEXO 3: SIMULACIONES EN ADS
- ANEXO 4: RESULTADOS PRELIMINARES
- ANEXO 5: DISEÑO EN AUTOCAD

