



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBA PARA MEDICIONES DE APANTALLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO A 3.5 GHz

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

Alex Henry Póvez Mucha

ASESOR: Manuel Yarlequé Medina

Lima, noviembre del 2009

Resumen

En el presente proyecto de tesis se implementa un módulo de prueba para las mediciones de apantallamiento electromagnético dentro de un laboratorio y se evalúa el material apantallador con mayor efectividad por medio de este módulo de pruebas. Además, se describe el diseño y construcción de antenas omnidireccionales y direccionales para la frecuencia de 3.5 GHz requeridos para los ensayos.

En el primer capítulo se describe el concepto de apantallamiento y blindaje así como los materiales que se utilizan para realizar ello. También se muestra una lista de las empresas que efectúan el apantallamiento de recintos y equipos electrónicos.

En el segundo capítulo se revisa la teoría sobre el principio físico del apantallamiento y los conceptos que están relacionados con ello; como los campos electromagnéticos. Asimismo, se define la efectividad del apantallamiento y las técnicas que se utilizan.

En el tercer capítulo se explica el diseño, construcción y caracterización de las antenas omnidireccionales (antena monopolo) y direccionales (antena logarítmica periódica).

En el cuarto capítulo se realiza la implementación del módulo de prueba y las mediciones del parámetro de transmisión para cada uno de los materiales de apantallamiento. Luego se escoge al material que presenta mayor efectividad de apantallamiento.

Por último, se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de culminar el presente trabajo. También se realizan algunas recomendaciones y se proponen trabajos futuros de investigación.



*A mi familia,
por su constante apoyo.*

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por haberme dado la fortaleza para poder culminar mis estudios superiores y la perseverancia para enfrentar los obstáculos en cada etapa de mi vida.

Gracias a mis padres y hermanos por sus consejos que me han ayudado a seguir adelante en cada uno de los problemas que se han presentado.

Mi sincero agradecimiento a mi asesor, el Dr. Manuel Yarlequé Medina, por su tiempo y ayuda que me ha brindado durante la realización de este proyecto.

A los ingenieros Juan Rodríguez, Ana Gonzáles y a todo el equipo de trabajo de la empresa en donde realice mis prácticas pre-profesionales, por su confianza y enseñanzas que me ayudaron a seguir creciendo profesionalmente.

A todos mis amigos que me acompañaron en mi vida, con quienes compartí alegrías y tristezas; a quienes me brindan su confianza y apoyo incondicional en momentos difíciles.

Gracias a todos.

Índice

Resumen	ii
Índice	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
Introducción	10
Capítulo 1 Apantallamiento y Blindaje	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Definiciones	12
1.3 Tipos de Apantallamiento	13
1.3.1 Contra el Acoplamiento Capacitivo (Campos Eléctricos)	13
1.3.2 Contra el Acoplamiento Inductivo (Campos Magnéticos)	14
1.3.3 Contra el Acoplamiento por Radiofrecuencia	14
1.4 Materiales para el Apantallamiento	14
1.5 La Industria del Apantallamiento	16
Capítulo 2 Teoría y Mecanismo del Apantallamiento Electromagnético	20
2.1 Aspectos Generales de Campos Electromagnéticos	20
2.1.1 Campos Electromagnéticos	20
2.1.2 Propagación de Ondas en Medios Limitados	23
2.1.3 Emisiones Electromagnéticas	24
2.1.3.1 Señales emitidas intencionalmente	24
2.1.3.2 Señales emitidas inintencionalmente	24
2.1.4 Radiación en campo cercano y lejano	25
2.1.5 Mediciones de Campo Electromagnético	27
2.2 Teoría y Mecanismo Físico del Apantallamiento	28
2.2.1 Mecanismo Físico	28
2.2.2 Efectividad del Blindaje	29
2.2.2.1 Perdidas por absorción	29
2.2.2.2 Perdidas por reflexión	29
2.2.3 Efecto de las Aperturas	30
2.3 Técnicas de Apantallado para Salas	32
2.3.1 Pinturas Conductoras	32
2.3.2 Láminas Conductoras	32
2.3.3 Mallas Metálicas	32
2.3.4 Galvanizado Selectivo (Electrodeposición)	33
Capítulo 3 Diseño, Construcción y Caracterización de Antenas Omnidireccionales y Direccionales a 3.5 GHz para el Módulo de Pruebas	34
3.1 Diseño de la Antena Omnidireccional de Cuarto de Onda	34
3.1.1 Introducción	34
3.1.2 Características	35
3.1.3 Justificación	35
3.1.4 Dimensionamiento de la Antena	36
3.1.5 Construcción de la Antena	37
3.2 Diseño de la Antena Logarítmica Periódica en Circuito Impreso	39
3.2.1 Introducción	39

3.2.2	Especificaciones Técnicas	39
3.2.3	Dimensionamiento de la Antena	41
3.2.3.1	Antena impresa	43
3.2.3.2	Ondas de superficie y ondas radiadas	44
3.2.3.3	Dimensiones finales para la antena impresa	45
3.2.4	Fase de Simulación	46
3.2.4.1	Proceso de simulación	46
3.2.4.2	Resultados de la simulación	48
3.2.5	Fabricación de la Antena	50
3.3	Proceso de Caracterización	53
3.3.1	Antena Monopolo	53
3.3.1.1	Medición de las pérdidas de retorno	54
3.3.1.2	Medición del SWR	55
3.3.1.3	Medición de impedancias	55
3.3.2	Antena Logarítmica Periódica Impresa	56
3.3.2.1	Medición de las pérdidas de retorno	57
3.3.2.2	Medición del SWR	58
3.3.2.3	Medición de impedancias	59
3.3.2.4	Comparación entre sustratos de la antena	61
3.3.2.5	Comparación entre la simulación y las mediciones	61
Capítulo 4 Implementación del Esquema de Prueba para las Mediciones de Apantallamiento		63
4.1	Desarrollo Experimental	63
4.2	Exposición de Finalidades	64
4.3	Descripción del Experimento	65
4.4	Escenario de Prueba	65
4.5	Mediciones del Parámetro de Transmisión	65
4.5.1	Usando la Antena Monopolo	66
4.5.1.1	En el espacio libre	66
4.5.1.2	Con la plancha de cobre	67
4.5.1.3	Con la plancha de aluminio	68
4.5.1.4	Con la plancha de acero	69
4.5.2	Usando la Antena Microstrip Logarítmica	70
4.5.2.1	En el espacio libre	70
4.5.2.2	Con la plancha de cobre	71
4.5.2.3	Con la plancha de aluminio	72
4.5.2.4	Con la plancha de acero	73
4.6	Presentación de Resultados	74
4.7	Evaluación de Resultados	77
Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros		81
5.1	Conclusiones	81
5.2	Recomendaciones	82
5.3	Trabajos Futuros	83
Bibliografía		84
Anexos		87

Lista de Figuras

FIGURA 1-1: APANTALLAMIENTO.....	10
FIGURA 1-2: BLINDAJE.....	13
FIGURA 1-3: PROCESO DE APANTALLAMIENTO.....	18
FIGURA 1-4: APANTALLAMIENTO DE SALAS.....	18
FIGURA 1-5: APANTALLAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA.....	19
FIGURA 2-1: PROPAGACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.....	21
FIGURA 2-2: CONCEPTO GRÁFICO DE LAS INTENSIDADES DE CAMPO.....	22
FIGURA 2-3: PROPAGACIÓN DE ONDAS.....	23
FIGURA 2-4: REGIONES ALREDEDOR DE UNA ANTENA.....	26
FIGURA 2-5: REPRESENTACIÓN DEL BLINDAJE MEDIANTE UNA BARRERA HOMOGENEA.....	28
FIGURA 2-6: EFECTO DE LAS APERTURAS.....	31
FIGURA 2-7: SECCIÓN DE UN AGUJERO EN FORMA DE GUÍA DE ONDAS.....	31
FIGURA 3-1: ANTENA MONOPOLO.....	35
FIGURA 3-2: PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA MONOPOLO.....	35
FIGURA 3-3: DIMENSIONES DEL PLANO DE TIERRA.....	37
FIGURA 3-4: INSERCIÓN DEL CONECTOR SMA EN LA PLACA.....	38
FIGURA 3-5: ANTENA MONOPOLO CONSTRUIDA.....	38
FIGURA 3-6: ANTENA LOGARÍTMICA.....	39
FIGURA 3-7: PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA ANTENA LOGARÍTMICA.....	40
FIGURA 3-8: CALCULADORA PARA LAS DIMENSIONES DE LA ANTENA.....	41
FIGURA 3-9: CONSTANTE DE DISEÑO VS. ESPACIAMIENTO RELATIVO.....	42
FIGURA 3-10: RESULTADO PARA LAS DIMENSIONES DE LA ANTENA.....	42
FIGURA 3-11: ESTRUCTURA DE UNA ANTENA MICROCINTA.....	44
FIGURA 3-12: ONDAS RADIADAS Y DE SUPERFICIE EM UNA ANTENA MICROCINTA.....	44
FIGURA 3-13: ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA.....	47
FIGURA 3-14: DIBUJO PARA LA SIMULACIÓN DE LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA.....	48
FIGURA 3-15: GRÁFICO DEL S_{11} VS. FRECUENCIA.....	48
FIGURA 3-16: GRÁFICO DEL VSWR VS. FRECUENCIA.....	49
FIGURA 3-17: GRÁFICO DE IMPEDANCIAS.....	49
FIGURA 3-18: PATRÓN DE RADIACIÓN.....	50
FIGURA 3-19: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CONSTRUIDAS.....	50
FIGURA 3-20: ALIMENTACIÓN PARA LA ANTENA MICROSTRIP.....	52
FIGURA 3-21: ENSAMBLAJE FINAL DE LA ANTENA MICROSTRIP.....	53
FIGURA 3-22: MEDICIONES CON LA ANTENA MONOPOLO.....	54
FIGURA 3-23: PÉRDIDA DE RETORNO DE LA ANTENA MONOPOLO.....	54
FIGURA 3-24: RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA DE LA ANTENA MONPOLO.....	55
FIGURA 3-25: IMPEDANCIAS DE LA ANTENA MONOPOLO.....	56
FIGURA 3-26: MEDICIONES CON LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA.....	56
FIGURA 3-27: PÉRDIDA DE RETORNO DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO BLANCO.....	57
FIGURA 3-28: PÉRDIDA DE RETORNO DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO VERDE.....	58
FIGURA 3-29: RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO BLANCO.....	58

FIGURA 3-30: RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO VERDE	59
FIGURA 3-31: IMPEDANCIAS DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO BLANCO	60
FIGURA 3-32: IMPEDANCIAS DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO VERDE.....	60
FIGURA 4-1: ESQUEMA PARA LAS PRUEBAS DE APANTALLAMIENTO.....	65
FIGURA 4-2: ANTENAS MONOPOLO EN EL ESPACIO LIBRE	66
FIGURA 4-3: S_{21} EN EL ESPACIO LIBRE CON LAS ANTENAS MONOPOLO.....	66
FIGURA 4-4: ANTENAS MONOPOLO CON LA PLANCHA DE COBRE	67
FIGURA 4-5: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE COBRE Y LAS ANTENAS MONOPOLO.....	67
FIGURA 4-6: ANTENAS MONOPOLO CON LA PLANCHA DE ALUMINIO	68
FIGURA 4-7: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ALUMINIO Y LAS ANTENAS MONOPOLO	68
FIGURA 4-8: ANTENAS MONOPOLO CON LA PLANCHA DE ACERO.....	69
FIGURA 4-9: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ACERO Y LAS ANTENAS MONOPOLO.....	69
FIGURA 4-10: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS EN EL ESPACIO LIBRE .	70
FIGURA 4-11: S_{21} EN EL ESPACIO LIBRE CON LAS ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS	70
FIGURA 4-12: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CON LA PLANCHA DE COBRE	71
FIGURA 4-13: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE COBRE Y LAS ANTENAS MICROSTRIP	71
FIGURA 4-14: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CON LA PLANCHA DE ALUMINIO.....	72
FIGURA 4-15: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ALUMINIO Y LAS ANTENAS MICROSTRIP.....	72
FIGURA 4-16: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CON LA PLANCHA DE ACERO	73
FIGURA 4-17: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ACERO Y LAS ANTENAS MICROSTRIP	73
FIGURA 4-18: RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON LA ANTENA MONOPOLO	74
FIGURA 4-19: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL COBRE USANDO LA ANTENA MONOPOLO.....	74
FIGURA 4-20: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ALUMINIO USANDO LA ANTENA MONOPOLO.....	75
FIGURA 4-21: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ACERO USANDO LA ANTENA MONOPOLO.....	75
FIGURA 4-22: RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON LA ANTENA LOGARÍTMICA.....	76
FIGURA 4-23: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL COBRE USANDO LA ANTENA LOGARÍTMICA.....	76
FIGURA 4-24: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ALUMINIO USANDO LA ANTENA LOGARÍTMICA.....	77
FIGURA 4-25: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ACERO USANDO LA ANTENA LOGARÍTMICA.....	77
FIGURA 4-26: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES CON LA ANTENA MONOPOLO.....	78
FIGURA 4-27: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES CON LA ANTENA LOGARÍTMICA.....	79

Lista de Tablas

TABLA 1-1: PROYECTOS DE APANTALLAMIENTO	17
TABLA 2-1: CARACTERÍSTICAS DE LOS FILAMENTOS METÁLICOS.....	33
TABLA 3-1: MATERIALES PARA LA ANTENA MONOPOLO	37
TABLA 3-2: DIMENSIONES PARA LA ANTENA LOGARÍTMICA	43
TABLA 3-3: DIMENSIONES FINALES PARA LA ANTENA IMPRESA	46
TABLA 3-4: ESPECIFICACIONES DEL SUBSTRATO USADO EN LA SIMULACIÓN	47
TABLA 3-5: MATERIALES PARA LA ALIMENTACIÓN DE LA ANTENA MICROSTRIP	51
TABLA 3-6: MATERIALES PARA LA ALIMENTACIÓN FINAL DE LA ANTENA MICROSTRIP.....	52
TABLA 3-7: COMPARACIÓN ENTRE SUBSTRATOS	61
TABLA 3-8: COMPARACIÓN ENTRE LA SIMULACIÓN Y LAS MEDICIONES	61
TABLA 4-1: MATERIALES PARA LAS MEDICIONES DE APANTALLAMIENTO.....	64
TABLA 4-2: FRECUENCIAS DE MAYOR EFICIENCIA DE APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES	78
TABLA 4-3: EFICIENCIA DEL APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES PARA 3.5 GHz.....	79
TABLA 4-4: CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES DE APANTALLAMIENTO.....	80

Introducción

En la actualidad, vivimos inmersos en un ambiente electromagnético provocado tanto por la radiación voluntariamente emitida por diversos equipos como emisoras de radio, televisiones, radares, etc., como por la radiación no intencionada de otros equipos (máquinas eléctricas, computadores, líneas de alimentación). Todas estas radiaciones provocan un acoplamiento de energía con cualquier sistema susceptible de captarlas, pudiendo provocar fallos en el normal funcionamiento de éste. Por ejemplo, el sector de las comunicaciones vía satélite ha empezado a reconocer el problema potencial que existe en la ruptura masiva de enlaces de comunicaciones satelitales en la banda C, sistemas de radares y enlaces de microondas domésticos; en aquellos lugares en donde las administraciones nacionales están permitiendo que los sistemas de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (BWA) compartan las mismas frecuencias de espectro ya utilizadas para proveer servicios satelitales.

Los sistemas satelitales que operan en la banda de 3.4 – 4.2 GHz (banda C) y una tecnología de acceso inalámbrico muy conocida como WiMax, que posee una banda licenciada en 3.5 GHz, entra en conflicto con la primera cuando ocasiona caídas de los sistemas satelitales debido a que las antenas que reciben transmisiones satelitales en la banda C son extremadamente sensibles y las estaciones móviles y base para aplicaciones de servicios inalámbricos terrestres emiten señales desde muchas ubicaciones, en toda dirección, de manera simultánea. Estos problemas perjudican tanto a los operadores de estaciones terrestres satelitales como a los usuarios que hacen uso de los servicios brindados por esta tecnología.

El presente trabajo de tesis plantea estudiar y analizar el apantallamiento electromagnético para implementar un módulo de prueba dentro de un laboratorio; en el cual se experimentará con materiales que puedan disipar o absorber la radiación electromagnética. Asimismo, para las mediciones, se ha escogido la frecuencia de 3.5 GHz porque ahí se han presentado reportes de interferencia entre las tecnologías ya mencionadas, con lo cual se pretende encontrar un material para aminorar dicho fenómeno y su posterior aplicación en los equipos de las estaciones terrestres.

Capítulo 1

Apantallamiento y Blindaje

Dado que una gran parte de las interferencias se producen por acoplamiento de campos eléctricos (acoplamiento capacitivo), magnéticos (acoplamiento inductivo) o electromagnéticos (acoplamiento por radiación electromagnética); un método para evitar los posibles acoplamientos sería la utilización de blindajes o pantallas metálicas que se verán en este capítulo.

1.1 Antecedentes

Como antecedente sobre el apantallamiento tenemos al término TEMPEST (Transient EM pulse Emanation Standard) que es la palabra clave que introdujo en la década de los 50 el Gobierno Americano para identificar una serie de estándares que limitan las emanaciones eléctricas y electromagnéticas de equipos electrónicos a través del aire o de conductores eléctricos. Las tareas principales del proyecto TEMPEST se centran en evitar la radiación electromagnética no deseada portadora de datos sensibles de equipos para el tratamiento de la información.

Casi medio siglo después de las primeras investigaciones sobre emanaciones de este tipo, casi todos los países desarrollados y organizaciones militares internacionales tienen programas similares a TEMPEST con el mismo fin: proteger información confidencial para los gobiernos.

TEMPEST, hasta hace pocos años, era percibido como una necesidad sólo para los gobiernos y el área militar; sin embargo, factores como: Extensión de “e-commerce”, medios de pago digitales (códigos de tarjeta de crédito, passwords, etc.), e-mail y

sofisticación del crimen hacen de TEMPEST una necesidad para bancos, corporaciones, etc. [UCO2007].

1.2 Definiciones

El apantallamiento se define como aquella superficie metálica dispuesta entre dos regiones del espacio que se utiliza para atenuar la propagación de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. La energía electromagnética que incide sobre la superficie de una pantalla de material conductor es parcialmente reflejada y una considerable cantidad de la energía restante se atenúa en su tránsito por el interior de la pantalla hacia la pared exterior del medio conductor. Al llegar a esta pared exterior, parte de esta energía vuelve, por reflexión, al interior de la plancha, atenuándose igualmente.

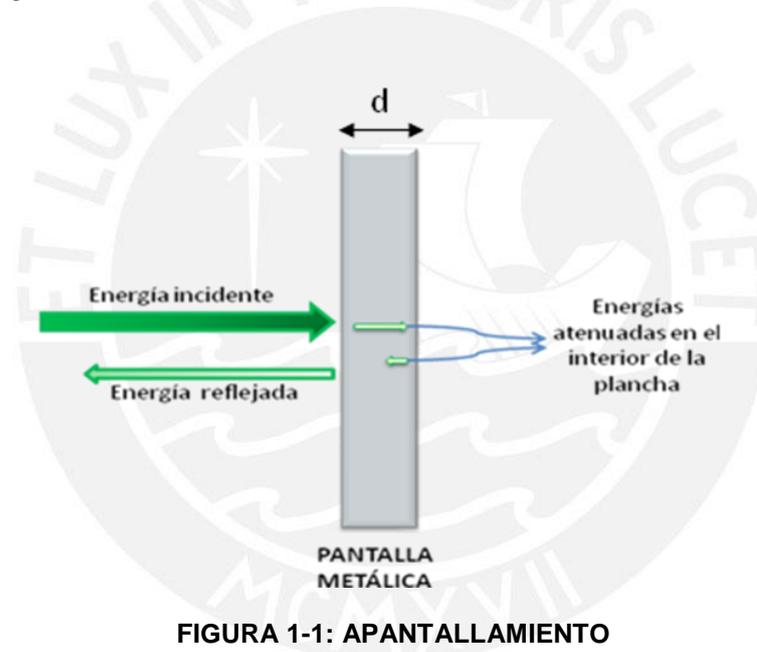


FIGURA 1-1: APANTALLAMIENTO

En cambio un blindaje sirve tanto para no dejar salir el flujo de los campos de la zona encerrada por él, como para evitar que en una zona protegida por él mismo ingrese campo alguno. La forma en que se presentan los blindajes son: cajas, armarios, juntas eléctricas, compartimientos internos, pinturas conductoras, láminas metálicas, cables apantallados, diferentes tipos de depósitos conductores sobre plásticos, etc.

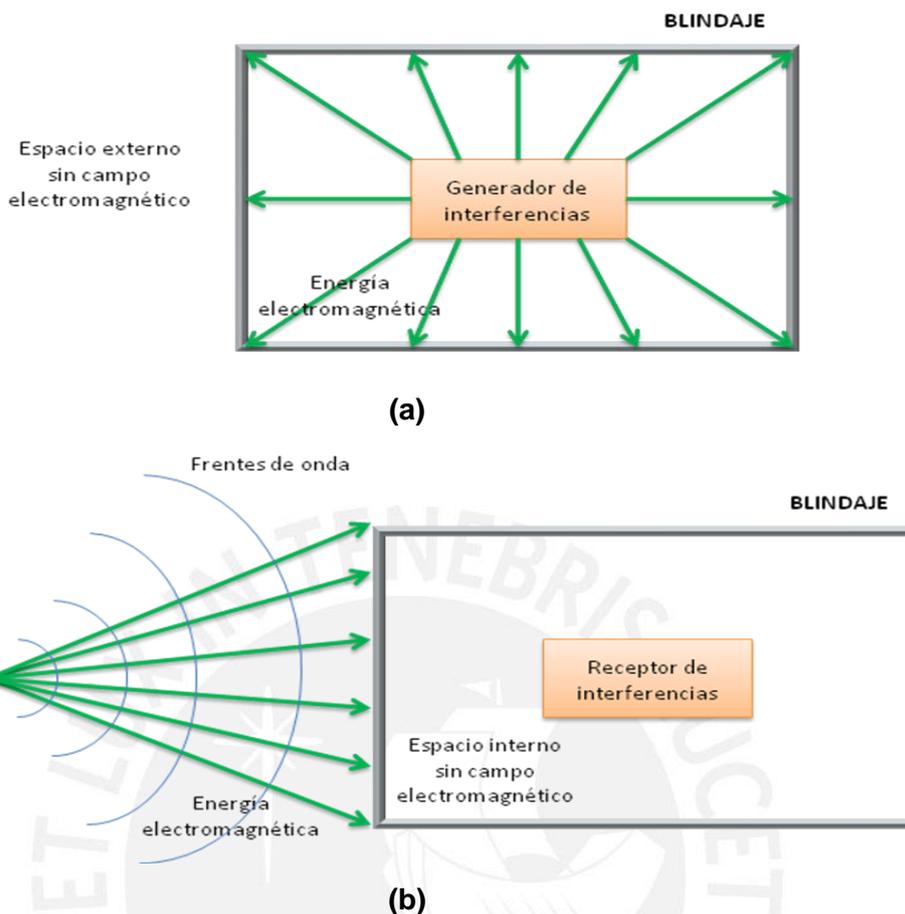


FIGURA 1-2: BLINDAJE

- (a) El blindaje no deja salir el flujo encerrado por él.
- (b) El blindaje evita que ingrese el campo electromagnético externo.

1.3 Tipos de Apantallamiento

Existen tres tipos de apantallamiento de acuerdo al tipo de acoplamiento que se desea evitar. El acoplamiento entre sistemas consiste en que un dispositivo interacciona y perturba el funcionamiento de otro. De esta manera el camino de acoplo entre la fuente y el receptor permite a la primera interferir en el segundo [CEC2000].

1.3.1 Contra el Acoplamiento Capacitivo (Campos Eléctricos)

El acoplamiento capacitivo se debe al paso de señales de interferencia a través de capacidades parásitas. Los materiales efectivos para blindajes contra el acoplamiento capacitivo son los buenos conductores (Cobre y Aluminio).

Este blindaje debe incluir o encerrar dentro de un recinto metálico hermético (Jaula de Faraday) todos los elementos a proteger; y se debe conectar a un potencial constante que debe ser la tierra del sistema. Este tipo de blindaje se usa en los circuitos digitales

de alta velocidad en forma de planos de masa insertados entre las capas de la placa del circuito impreso para eliminar las capacidades parásitas entre ellas. Otra aplicación común está en los transformadores apantallados electrostáticamente.

1.3.2 Contra el Acoplamiento Inductivo (Campos Magnéticos)

En el acoplamiento inductivo el mecanismo físico que induce una tensión parásita en un bucle de corriente en el circuito interferido es la inducción magnética. Los materiales efectivos serán los que tengan alta permeabilidad para tener altas pérdidas por absorción; éstos son el Hierro, el Mu-metal y el Supermalloy. En este blindaje se deben minimizar los campos perjudiciales en la fuente que los genera: Reduciendo el área de los bucles de corriente, usando planos de tierra en tarjetas de circuitos integrados; que actúan como conductor de retorno para todos los bucles de corriente en el circuito, y apantallando magnéticamente con materiales de alta permeabilidad todo el generador de interferencias.

1.3.3 Contra el Acoplamiento por Radiofrecuencia

La forma de trabajo de este blindaje utiliza el hecho de que los campos inducen corrientes en el material del blindaje, las cuales disipan energía de dos modos: pérdidas por calor (absorción) en el material y pérdidas de radiación (reflexión) al re-irradiar sus propios campos sobre el blindaje. La energía necesaria a ambos mecanismos es absorbida de los campos incidentes y, por ello, se quedan sin energía para penetrarlo.

No existe el blindaje perfecto contra campos de alta frecuencia. Un material con alta conductividad es un buen reflector y un material con alta permeabilidad es un buen absorbente. El problema anterior se soluciona utilizando un blindaje múltiple con dos metales diferentes dispuestos el uno junto al otro gracias a un baño galvánico, usualmente con un material ferromagnético galvanizado y con cobre; sin embargo, esto no es muy práctico.

1.4 Materiales para el Apantallamiento

En general, los materiales usados para absorber las ondas electromagnéticas (EM) pueden ser clasificados en dos grupos: (1) materiales con alta constante dieléctrica, como titanato de bario (BaTiO_3), partículas de carbón, etc.; y (2) materiales con alta permeabilidad, como magnetita (Fe_3O_4), materiales de ferrita, etc.

Los materiales con alta constante dieléctrica absorben la energía eléctrica y la convierten en energía térmica, mientras que los materiales con alta permeabilidad convierten la energía magnética en energía térmica. Los absorbentes EM pueden ser aplicados en muchos campos además de supresión de interferencia electromagnética (EMI); por ejemplo, camuflaje de radar y tecnología de misiles, control del ruido de microondas, patrón de una antena de microondas, curación por microondas y calefacción.

1.4.1 Materiales Metálicos

La tradicional aproximación para el apantallamiento de EMI depende del uso de materiales metálicos como excelente suministro para la efectividad de apantallamiento. Sin embargo, los convencionales blindajes metálicos en forma de hojas de gran volumen o mallas imponen una complejidad por el peso y los recubrimientos de metal cromado, mientras que los polvos o fibras llenados en los compuestos de polímeros o recubrimientos sufren de desgaste o resistencia a los rasguños.

Las características importantes de la estructura metalizada son las propiedades del metal en las paredes; por ejemplo, la conductividad, la permeabilidad relativa y la frecuencia, a estas características se denomina profundidad del recubrimiento definido por [ZOR2004]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f}} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

μ_0 : Es la permeabilidad de espacio libre.

μ_r : Es la permeabilidad relativa de la protección.

σ : Es la conductividad del blindaje.

f: Es la frecuencia del campo incidente.

1.4.2 Polímeros Compuestos

Los compuestos de polímeros intrínsecamente conductivos (ICPs) han estado reemplazando a los metales para varias aplicaciones de blindaje en la industria eléctrica y electrónica, especialmente para materiales electrónicos de la vivienda. Sin embargo; los ICPs, la mayoría de polianilina (PANI) y polipirrol (PPY), tienen características rígidas propias de su conformación química de aros de benceno. Los carbonos también son usados en las aplicaciones de apantallamiento de EMI, principalmente como rellenos conductores (fibras, partículas, polvos, filamentos, tubos)

en materiales compuestos, debido a su conductividad eléctrica, resistencia química y baja densidad.

1.4.3 Tejidos Conductivos

Los tejidos conductivos o tejidos de punto, debido a su orden estructural y la capacidad de flexionar y conformar demasiadas formas deseadas, ofrecen una gran oportunidad para desarrollar una nueva generación de textiles multifuncionales e interactivos. Los tejidos conductivos han sido considerados para el apantallamiento EM y aplicaciones de disipación en la defensa e industrias eléctricas y electrónicas. Tales tejidos tienen propiedades deseables como flexibilidad, descarga electrostática, protección EMI, protección de la interferencia radio frecuencia, coincidencia en la expansión térmica y peso ligero.

La conductividad y la eficacia del apantallamiento EM de tejidos sintéticos son mejoradas usando los siguientes métodos:

- Laminación de las capas de conductividad en la superficie de los tejidos, recubrimiento conductivo, arco de pulverización de zinc, planchas iónicas, metalización al vacío, pulverización y vinculación de hoja metálica.
- Añadiendo conductores de relleno, como carbón negro conductivo, fibra de carbón, nanotubos de carbón, fibras metalizadas, fibra de metal (acero inoxidable, Al, Cu), polvos de metal y hojuelas (Al, Cu, Ag, Ni) para material aislante.
- La incorporación de fibras conductoras o hilos en los tejidos. Las fibras metálicas están espaciadas, y los caminos conductivos continuos pueden ser establecidos fácilmente. Sin embargo, debido a la rigidez de las fibras, se encuentran dificultades en el proceso de fabricación de maquinaria textil.

1.5 La Industria del Apantallamiento

La empresa Advanced Shielding Technologies (AST) fundada en 1994 por ingenieros europeos, con más de 20 años de experiencia en EMC fue la primera compañía en desarrollar soluciones para cumplir los estándares CE EN50082 así como la primera compañía en desarrollar sistemas de apantallamiento portátiles basados en telas metalizadas. Cuenta con más de 100 instalaciones en: El Reino Unido, Italia, España, Alemania, Suecia, Japón, USA, Australia, Suiza, Singapur, etc. y posee plenas capacidades internacionales (oficinas subsidiarias en el Reino Unido, Alemania y Singapur) [UCO2007].

Otras empresas son: Wavecontrol que se ha consolidado en España como proveedor e instalador de recintos y cámaras apantalladas; Alava Ingenieros que suministra filtros, componentes para apantallamientos y diseña e instala salas seguras de acuerdo al nivel de seguridad exigido; entre otros [CYP2006].

En la siguiente tabla se muestran los proyectos de apantallamiento realizados por varias empresas:

TABLA 1-1: PROYECTOS DE APANTALLAMIENTO

Fuente: "Lista de Referencias de Apantallamiento AST2004" [UCO2004]

COMPañÍA	PROYECTO
IBM España	Apantallamiento Centro de datos: Protección de todos los equipos electrónicos que se encuentran en el Centro de Datos del metro situado en el nivel inferior.
Hewlett Packard España	Apantallamiento Cables de Potencia: Protección de las personas y equipos electrónicos de los cables de potencia situados en la pared contigua.
AENA (Aeropuerto de Barcelona)	Apantallamiento de Sala de Racks de Comunicaciones: Protección de equipos electrónicos (racks de comunicaciones) del transformador y armario eléctrico situados en las paredes colindantes.
Sodick (Fabricante de Maquinaria)	Apantallamiento de una Sala de Alta Precisión: Protección de equipamiento electrónico de las antenas GSM, radio y TV., así como radares.
National Semiconductor (Malasia)	Apantallamiento Laboratorios de Alta Precisión (Laboratorio de Desarrollo de Microprocesadores): Protección de equipamiento electrónico de la Sala de Transformación situada al lado.
FEDA (Compañía Eléctrica)	Apantallamiento de Sala de Servidores: Protección de los racks de las antenas GSM cercanas a la Sala.

<p>STA (Compañía de Telecomunicaciones)</p>	<p>Apantallamiento Centro de Datos (C.P.D.): Protección de equipos electrónicos de antenas GSM y radio cercanas al CPD.</p>
----------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

En las siguientes fotografías se muestran algunos de los proyectos ejecutados sobre el apantallamiento.



FIGURA 1-3: PROCESO DE APANTALLAMIENTO

Fuente: “Lista de Referencias de Apantallamiento AST2004” [UCO2004]



FIGURA 1-4: APANTALLAMIENTO DE SALAS

Fuente: “Lista de Referencias de Apantallamiento AST2004” [UCO2004]



FIGURA 1-5: APANTALLAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA

Fuente: "Lista de Referencias de Apantallamiento AST2004" [UCO2004]



Capítulo 2

Teoría y Mecanismo del Apantallamiento Electromagnético

2.1 Aspectos Generales de Campos Electromagnéticos

2.1.1 Campos Electromagnéticos

Las ondas producidas por un campo electromagnético viajan a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y se caracterizan por su longitud de onda. La longitud de onda (λ) se define físicamente por la siguiente ecuación [CRT2004]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

v: Es la velocidad de propagación de la luz en el medio recorrido.

f: Es la frecuencia de la onda.

La longitud de onda es la distancia que existe entre los puntos correspondientes a un ciclo completo de la onda electromagnética, tal y como se indica en la figura 2-1. La frecuencia es el número de ondas electromagnéticas que pasan por un determinado punto en un segundo. La unidad de la frecuencia es el hertz (Hz) y es igual a un ciclo por segundo.

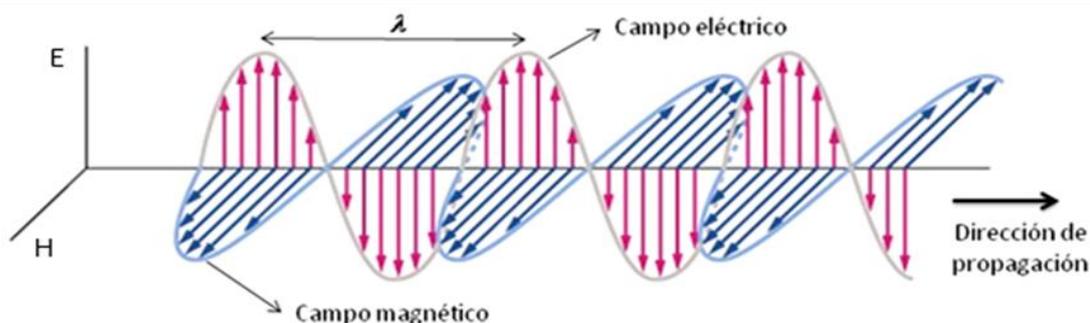


FIGURA 2-1: PROPAGACIÓN DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Las ondas electromagnéticas (EM) se componen como su nombre lo indica de un campo eléctrico y un campo magnético. Una onda EM puede ser polarizada de manera lineal, circular, elíptica o aleatoria. Una onda polarizada linealmente tiene un campo eléctrico cuya orientación es constante en todo su recorrido. La orientación del campo eléctrico en el espacio, es una propiedad importante de las ondas EM porque determina la absorción de la onda en los cuerpos biológicos.

El campo y los patrones de onda alrededor de una fuente de radiación dependen estrechamente de la distancia existente entre la fuente y los objetos en el ambiente. Dependiendo de las propiedades dieléctricas de los objetos, la energía de la onda es reflejada, refractada, difractada, dispersada y absorbida por tales objetos. Dado que las longitudes de onda tratadas son pequeñas, la intensidad del campo local se incrementa.

En casi el 100% de los casos, una onda EM puede estudiarse como una onda plana que se propaga perpendicularmente al plano formado por los dos vectores de campo (E y H). Igualmente se caracteriza porque E y H son constantes y perpendiculares a la dirección de propagación, y varían en una proporción de $1/r$, donde r es la distancia a la fuente. La energía transportada por una onda EM se calcula a través de la densidad de potencia en un punto, realizando el producto vectorial de la intensidad del campo eléctrico y magnético:

$$S = E \times H \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

S: Es llamado el vector de Poynting, el cual representa la densidad de potencia y la dirección de propagación de la energía. S varía en una proporción de $1/r^2$ donde r es la distancia a la fuente.

Asimismo, el estudio de la propagación del campo electromagnético a través de diferentes medios manifiesta que una de las magnitudes más relevantes en esta propagación es lo que se conoce como impedancia de onda (Z). En general, suponiendo que un campo se propaga, por ejemplo, según la dirección z se puede definir esta impedancia como [CRT2004]:

$$Z = \frac{E_u}{H_v} \dots\dots\dots(4)$$

Esto es como el cociente de una componente, E_u , del campo eléctrico transversal a la dirección de propagación y la correspondiente componente, H_v , del campo magnético transversal que sea perpendicular a la anterior.

El valor de la impedancia de onda dependerá de las características de la fuente en la región de campo cercano o lejano, que se detallarán más adelante. De esta manera en el campo lejano el valor de la impedancia está dado por:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\Omega \dots\dots\dots(5)$$

En la figura 2-2, se muestra las intensidades de campo en función del tipo de fuente y de la distancia; por ejemplo, la fuente básica de campo eléctrico es una antena vertical, lo que corresponde a una alta impedancia y una corriente baja, y la fuente básica de campo magnético es un bucle de corriente, que corresponde a baja impedancia y corriente alta.

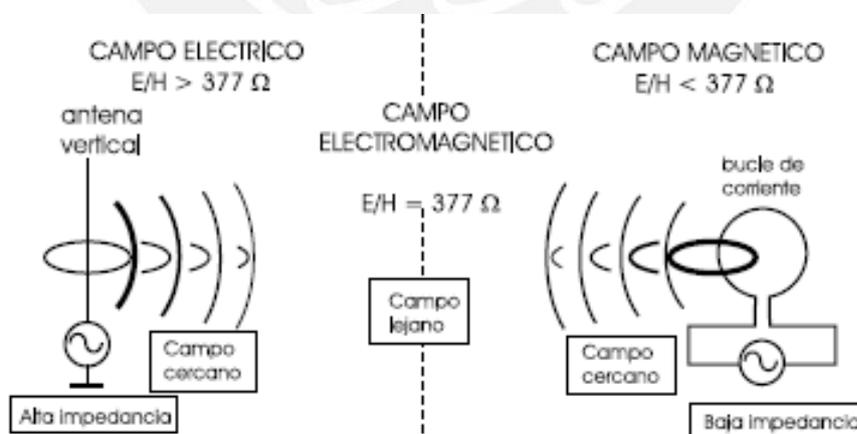


FIGURA 2-2: CONCEPTO GRÁFICO DE LAS INTENSIDADES DE CAMPO
Fuente: "Nociones Teóricas de Compatibilidad Electromagnética" [MES2000]

2.1.2 Propagación de Ondas en Medios Limitados

Cuando una onda incide sobre una superficie de separación entre dos medios, una parte de su energía se transmite al segundo medio en forma de una onda transmitida (normalmente refractada) de características similares al incidente; mientras que otra parte de la energía incidente rebota en dicha superficie propagándose hacia el primer medio. Entonces tenemos los siguientes fenómenos [OND2005]:

- **Refracción:** Es el cambio en la dirección de propagación de una onda que atraviesa la superficie de separación entre dos medios.
- **Reflexión:** Es el cambio en la dirección de propagación de la onda que no es capaz de atravesar la superficie de separación entre dos medios.

Las frecuencias de las ondas incidente, transmitida y reflejada son iguales. En cambio, la longitud de onda de la onda transmitida (λ_t) difiere del incidente (λ_i) en una relación que depende de sus índices de refracción respectiva [HIR2000]:

$$\frac{\lambda_t}{\lambda_i} = \frac{n_1}{n_2} \dots\dots\dots(6)$$

La fracción de energía del haz luminoso que se transmite al segundo medio depende del tipo de superficie de separación, de la dirección de incidencia sobre la misma, del campo eléctrico asociado al haz y de los índices de refracción de los dos medios. Así, en el paso del aire al vidrio se transmite aproximadamente un 96% de la energía incidente, mientras que cuando el segundo medio tiene una superficie de separación pulida y reflectante (por ejemplo, un espejo), se refleja prácticamente toda la energía y apenas existe transmisión.

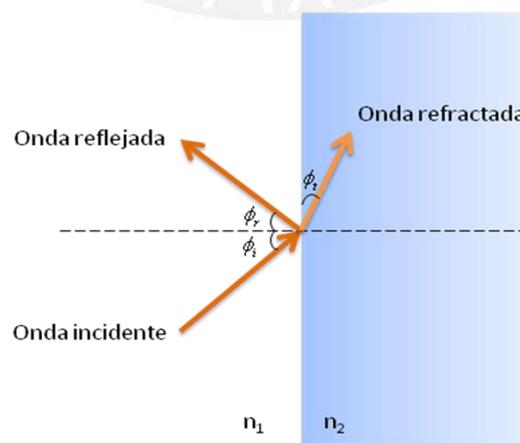


FIGURA 2-3: PROPAGACIÓN DE ONDAS

Otro fenómeno presente en la propagación de ondas es [PRO2007]:

- **Difracción:** Se puede entender como el esparcimiento de las ondas en los límites de una superficie; es decir para que exista la difracción tiene que haber un obstáculo, así es como este fenómeno permite que parte de la señal llegue al otro lado del objeto. Por ejemplo, cuando una onda se encuentra con una “pared” con una pequeña apertura; conforme aumenta el tamaño de apertura hasta varias λ , el efecto de difracción disminuye. Si en lugar de tratarse de pequeñas aperturas se trata de pequeños obstáculos, el fenómeno es el mismo hasta que el tamaño del obstáculo es del orden de varias λ .

2.1.3 Emisiones Electromagnéticas

Los aparatos eléctricos, electromecánicos o electrónicos emiten usualmente energía electromagnética en el curso de sus operaciones normales. Las emisiones emitidas por estos equipos pueden dividirse en las dos siguientes categorías:

2.1.3.1 Señales emitidas intencionalmente

Estas señales son las emitidas por equipos tales como radar, equipos de comunicación, emisoras de radio y TV, equipos de navegación, etc. Estas emisiones pueden interferir con otros equipos, especialmente cuando no se ha llevado a cabo una buena planificación del espectro de frecuencias.

2.1.3.2 Señales emitidas inintencionalmente

Dentro de este tipo de señales se pueden distinguir varias fuentes [MES2000]:

- **Emisiones indeseadas:** Se dan en el curso de la operación normal de los equipos emisores señalados anteriormente. Un ejemplo de esto puede ser cuando estos equipos emiten con un ancho de banda mayor que el previsto.
- **Procesos de modulación/ demodulación:** Son inherentemente generadores de ruido dado que requieren el uso de dispositivos activos no lineales que dan lugar a la emisión de subarmónicos de la frecuencia de la señal tratada.
- **Generación de arcos o corrientes transitorias:** Producidos en muchos dispositivos durante su conexión o desconexión; por ejemplo, en puesta en marcha de motores de automóvil, dispositivos controlados por termostatos y electrodomésticos.
- **Descargas atmosféricas:** Se calcula que estas descargas producen del 50 al 70% de los fallos de suministro en instalaciones de media y alta tensión. Para

estimar su efecto se modela el rayo como una columna vertical de corriente, de modo que su efecto será el de una sucesión de dipolos eléctricos. La emisión producida por los rayos es captada por los cables en forma de un pulso de tensión y éste es transmitido a todos los equipos conectados a esta línea.

- **Descargas electrostáticas:** Cuando se produce una acumulación de carga en algún cuerpo, la carga depositada en éste busca el camino de menor resistencia para descargarse a tierra. Este proceso de descarga da lugar a unas corrientes rápidamente cambiantes que provocan desde pequeñas perturbaciones hasta serios shocks a equipos y personas. Las causas de la acumulación de carga pueden ser muy diversas aunque algunas de las más usuales son:
 - cuando dos materiales de diferente constante dieléctrica se frotran,
 - al calentar un material por efecto termo electrónico,
 - por contacto con un cuerpo cargado.
- **Pulso electromagnético:** Este pulso se origina en una explosión nuclear debido al choque de los rayos X y/o γ emitidos con los materiales de los equipos. Este choque provoca una emisión incontrolada de electrones; creando el movimiento repentino de todos estos electrones, un pulso electromagnético de considerable magnitud (se estima que es equivalente al producido por el efecto combinado de cientos de rayos). También puede originarse este pulso por la interacción de la radiación generada en la explosión con las moléculas del aire, suponiendo que en éste se den inhomogeneidades.

2.1.4 Radiación en campo cercano y lejano

Los campos radiados, asociados con la antena, cambian con la distancia y son asociados con dos tipos de energía: energía radiada y energía reactiva. Por otro lado, el espacio alrededor de una fuente, como una antena, se divide en dos regiones: campo lejano y campo cercano. La región del espacio donde la onda radiada se comporta como una onda plana se define como campo lejano o zona de Fraunhofer y el límite a partir del cual se inicia esta región está dado por la siguiente ecuación [AST2005]:

$$R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda} \dots\dots\dots(7)$$

En donde:

λ : Es la longitud de onda radiada por la antena.

D: Es la longitud total de la antena.

R: Es la distancia desde el punto de radiación hasta un punto de medición arbitrario.

La región del espacio contenida entre la fuente y el campo lejano es llamada campo cercano. En el campo cercano los campos eléctricos y magnéticos no necesariamente son perpendiculares y por lo tanto no se comportan como ondas planas.

El campo cercano puede ser dividido en dos regiones: la región de campo cercano reactiva y la región de campo cercano radiada.

- **Región de campo cercano reactiva:** En esta región, la energía radiada no es disipada, sino que permanece almacenada. La importancia de esta región de campo es que proporciona las condiciones de borde necesarias para adaptar los campos entre la antena y el espacio libre. Su límite esta dado por la siguiente ecuación:

$$R_1 < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \dots\dots\dots(8)$$

- **Región de campo cercano radiada (zona de Fresnel):** El campo reactivo en esta región es pequeño y el campo radiado decrece rápidamente en función de la distancia desde la antena. Su límite esta dado por:

$$0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R_2 < 2\frac{D^2}{\lambda} \dots\dots\dots(9)$$

Estas regiones se muestran en la figura 2-4.

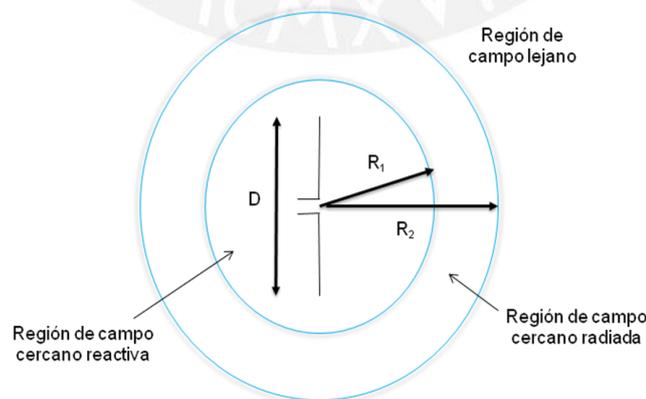


FIGURA 2-4: REGIONES ALREDEDOR DE UNA ANTENA

Fuente: "Astrónomos" [AST2005]

2.1.5 Mediciones de Campo Electromagnético

Los campos están determinados por las características de las fuentes emisoras en las proximidades que los generan y dan lugar a los acoplamientos capacitivo e inductivo. Lejos de las fuentes que los producen, las características de los campos ya no están influenciadas por la forma de las fuentes sino que dependen básicamente del medio donde se propagan y se habla entonces de radiación de energía electromagnética. En esta situación (para distancias suficientemente lejanas), las fuentes se comportan como dipolos eléctricos/magnéticos.

Entonces para la medición del campo electromagnético se deben tener en cuenta algunos factores importantes como: características del sitio, distancia a la fuente de radiación, las variables a medir, las unidades de medida y el tipo de medición; además, se debe estar familiarizado con las normas relacionadas con este tipo de mediciones. Igualmente se deben conocer los límites de exposición permitidos, contar con los instrumentos de medición requeridos y conocer el patrón de radiación de la fuente. El campo eléctrico se mide habitualmente en voltios por metro (V/m) y el magnético en amperios por metro (A/m.) La densidad de potencia, que es la combinación de los dos componentes, se mide en milivatios o miliWatts por centímetro cuadrado (mW/cm²), siendo esta última mucho más útil cuando el lugar de medida está muy lejos de la fuente emisora (campo lejano).

En campo lejano, el campo eléctrico E y el magnético H , se encuentran relacionados de manera conocida ($E = Z \times H$), por lo que conociendo una de estas magnitudes, queda definida la otra y, por tanto, la densidad de potencia. En la zona de campo cercano se hace necesaria la medición de ambos componentes de campo para poder caracterizarlo completamente. Tenemos dos tipos de medición [APO2007]:

- **Medición de emisión:** Medición del valor promedio de la intensidad de campo eléctrico o magnético debidos a una fuente de radiofrecuencia determinada, la cual opera a una frecuencia específica. Para ello se utilizan equipos de medición en banda angosta.
- **Medición de inmisión:** Medición del campo electromagnético producto del aporte de múltiples fuentes de radiofrecuencia, que operan a distintas frecuencias. En este tipo de mediciones se utilizan equipos de banda ancha. Para evaluar la exposición poblacional se realiza la medición de inmisión, ya que las personas están expuestas simultáneamente a muchas fuentes de radiación.

2.2 Teoría y Mecanismo Físico del Apantallamiento

2.2.1 Mecanismo Físico

Cuando un campo EM es pasado a través de un objeto, hay tres fenómenos que determinan cuanta fuerza de campo es perdido como una interacción con el objeto: atenuación de absorción, atenuación debido a la reflexión y atenuación debido a sucesivas reflexiones internas (Figura 2-5).

Como la onda afecta la superficie del objeto, estas fuerzas de cargas oscilan a la misma frecuencia de la onda incidente y se comportan como una antena resultando en una reflexión. La señal completa no es re-irradiada en la dirección de la onda incidente, resultando en mediciones de pérdidas de la señal. El campo es emitido en muchas direcciones en un patrón asociado con una señal de antena con carga oscilante; y por lo tanto, el campo es dispersado. Luego, como la carga está forzada a vibrar en el medio, la energía es perdida en forma de calor. Este modo de pérdida de señal es conocido como atenuación debido a la absorción.

Así, para el apantallamiento del campo EM se necesita de una superficie situada entre dos regiones del espacio con el fin de atenuar la propagación del campo electromagnético, evitando tanto su entrada como su salida y sobre la base de lo mencionado anteriormente se tiene dos grandes mecanismos EM: reflexión desde una superficie conductora y absorción en un volumen conductor. Una onda EM que golpea con una superficie metálica encuentra ambos tipos de pérdida. Parte de la onda es reflejada, mientras que el resto es transmitido y atenuado cuando pasa a través del medio. El efecto combinado de estas pérdidas (reflexión y absorción) determina la efectividad del apantallamiento [JUN2008].

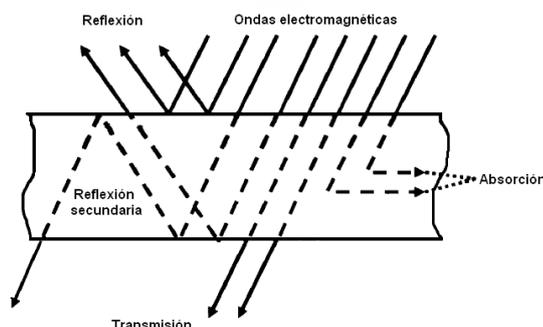


FIGURA 2-5: REPRESENTACIÓN DEL BLINDAJE MEDIANTE UNA BARRERA HOMOGÉNEA

Fuente: "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics"
[JUN2008]

2.2.2 Efectividad del Blindaje

La efectividad del apantallamiento electromagnético SE de un material es definido como la proporción entre la potencia transmitida (P_t) a través del material y la potencia incidente (P_i) de una onda electromagnética. En general, SE es dado en decibeles:

$$SE = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_i}\right) \dots\dots\dots(10)$$

Esta expresión puede ser escrita en función del campo eléctrico:

$$SE = 20 \log\left(\frac{E_t}{E_i}\right) \dots\dots\dots(11)$$

La efectividad del apantallamiento varía con la frecuencia, la geometría del blindaje, la posición dentro del blindaje, el tipo de campo a ser atenuado, las direcciones de incidencia y la polarización.

Como se mencionó anteriormente las pérdidas por reflexión y absorción determinan la efectividad del apantallamiento y estos se analizan a continuación.

2.2.2.1 Perdidas por absorción

Cuando una onda electromagnética pasa a través de un blindaje, su amplitud decrece exponencialmente debido a las corrientes inducidas en el mismo.

La absorción en un blindaje EM transforma la energía EM en energía térmica. El blindaje hecho de absorbentes EM atenúa las indeseables ondas EM y sustancialmente resuelve la EMI. La pérdida de absorción no depende de la impedancia de onda del campo incidente, y así esto no está directamente relacionado a las condiciones de campo cercano o lejano del sistema. Las pérdidas aumentan al crecer el espesor de la barrera y también con la frecuencia de operación.

2.2.2.2 Perdidas por reflexión

El cálculo de las perdidas por reflexión es más complicado que el de las pérdidas por absorción. Las perdidas por reflexión en la frontera entre dos medios (aire y blindaje) están relacionadas con las impedancias características de cada uno de los medios.

La reflexión de un blindaje EM resulta cuando la impedancia de la onda en el espacio libre es diferente a la impedancia de la onda EM en la frontera. Este fenómeno es independiente del espesor de la frontera y es una función de la conductividad del material, la permeabilidad magnética y de la frecuencia. Una onda EM consiste de un componente eléctrico y de un componente magnético, perpendiculares entre sí, y se

propaga en ángulo recto al plano que contiene las dos componentes. Como la impedancia de la onda es diferente para campos magnéticos (baja impedancia) y campos eléctricos (alta impedancia), la reflexión en la barrera sigue una diferente característica para cada tipo de onda. Los materiales eléctricamente conductivos como metales reflejan los campos EM para impedirles escapar o penetrar el blindaje. Finalmente, podemos describir la efectividad de blindaje para láminas de una sola capa como [LEE2007]:

$$SE = SE_A + SE_R + SE_M \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

SE_A : Es la efectividad de blindaje de la OEM de absorción interna.

SE_R : Es la efectividad de blindaje de la OEM debido a las reflexiones en la frontera.

SE_M : Es la efectividad de blindaje de la OEM debido a las múltiples reflexiones internas.

También se expresa como:

$$SE = 20 \log \left| \frac{1}{4n} \left[(1+n)^2 \exp(-ikd) - (1-n)^2 \exp(ikd) \right] \right| \dots\dots\dots(13)$$

Donde el índice de reflexión complejo “n” está relacionado con el vector de onda complejo “k” ($=n\omega/c$) y “d” es el espesor de la lámina. De la ecuación anterior, cada mecanismo de eficiencia electromagnética está dado por:

$$SE_A = 20k_2d \log e = 8.686k_2d \dots\dots\dots(14)$$

$$SE_R = 20 \log \left| \frac{1+n}{4n} \right|^2 \dots\dots\dots(15)$$

$$SE_M = 20 \log \left| 1 - \exp(2ikd) \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2} \right| \dots\dots\dots(16)$$

2.2.3 Efecto de las Aperturas

En general, los blindajes no pueden ser totalmente herméticos sino que en éstos aparecen frecuentemente aperturas para satisfacer las necesidades de ventilación, requisitos mecánicos, pantallas, etc. Obviamente, todas estas aperturas disminuirán la efectividad del blindaje dado que el campo penetra por ellas por efecto de difracción.

En general se puede señalar que

- La pérdida de efectividad del blindaje debido a las aperturas depende básicamente de la forma, tamaño y localización de éstas y no tanto de las características del material.
- Si el tamaño de las aperturas se aproxima a la longitud de onda del campo incidente, la efectividad se reduce considerablemente puesto que los efectos de difracción aumentan significativamente.
- Un número elevado de pequeñas aperturas es más efectivo que una sola ranura con la misma superficie total. Esto puede entenderse cualitativamente observando las corrientes inducidas en el metal en las situaciones mostradas en la figura 2-6.

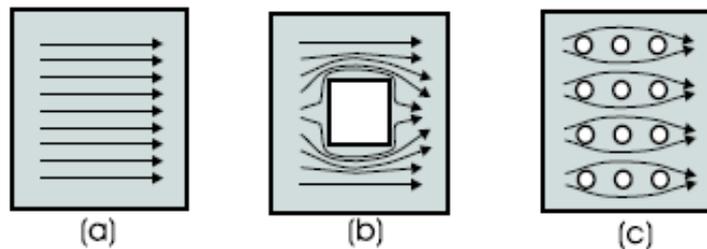


FIGURA 2-6: EFECTO DE LAS APERTURAS

- (a) Posible forma de las corrientes inducidas en la pantalla completa.
- (b) Deformación de las corrientes por efecto de una gran apertura.
- (c) Deformación de las corrientes debido a un gran numero de pequeñas aperturas.

Fuente: "Nociones Teóricas de Compatibilidad Electromagnética" [MES2000]

- Si los posibles agujeros en el blindaje se disponen en forma de guía de ondas (Figura 2-7), se puede hacer uso de la existencia de frecuencias de corte en estas guías y por tanto ofrecerá muy buena efectividad incluso para campos de alta frecuencia.

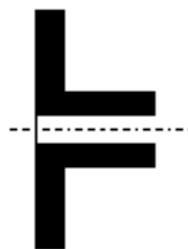


FIGURA 2-7: SECCIÓN DE UN AGUJERO EN FORMA DE GUÍA DE ONDAS

Fuente: "Nociones Teóricas de Compatibilidad Electromagnética" [MES2000]

2.3 Técnicas de Apantallado para Salas

2.3.1 Pinturas Conductoras

Están basadas fundamentalmente en grafito, cobre, níquel y plata. Las ventajas de las pinturas conductoras son las siguientes [CEC2000]:

- Utilización como pinturas ordinarias.
- Aplicación sencilla.
- No requieren o es mínimo el tratamiento previo de la superficie.
- Se adhieren a casi cualquier tipo de plástico con gran poder de cobertura.
- Son duras y resistentes a la abrasión y superan las condiciones climáticas extremas.

Los tipos de pinturas conductoras son:

- De Grafito: Tiene un costo muy reducido y baja conductividad, usándose contra campos magnéticos y contra las descargas electrostáticas.
- De Plata: Tiene un costo muy elevado y máxima conductividad, consiguiéndose buenos apantallamientos con sólo 25 μm de espesor. Se utiliza en aplicaciones militares.
- De Cobre: Tiene un costo moderado y tiene casi tanta conductividad como la plata, pero se oxida fácilmente, por lo que pierde efectividad.
- De Níquel: Actualmente es el más usado, ya que sin ser tan buen conductor como el cobre o la plata absorbe más EMI debido a su permeabilidad magnética. Es muy duro, es fácil de aplicar y no se oxida con facilidad.

2.3.2 Láminas Conductoras

Las láminas adhesivas metalizadas se usan, habitualmente, para el apantallamiento electromagnético de equipos e incluso de grandes habitaciones. Estas láminas adhesivas tienen la ventaja de poder ser aplicadas sobre un armario o habitación con lo que pueden ser usadas ante imprevistos.

Normalmente son de cobre o aluminio, debidamente aisladas externamente y proporcionan una buena conductividad. No son deseables para producción porque su adhesión es laboriosa en casos complejos.

2.3.3 Mallas Metálicas

Se utilizan como alternativa a las láminas conductoras, ya que reducen los costos de implementación para el apantallamiento. Los hilos de metales compuestos, los cuales

son usados en la construcción de tejidos de metales compuestos, son producidos con filamentos de metal disponibles comercialmente y filamentos de polyester (PET). Las características de los filamentos de metal son listados en la tabla 2-1.

TABLA 2-1: CARACTERÍSTICAS DE LOS FILAMENTOS METÁLICOS

Fuente: "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics"
[JUN2008]

Fibra de metal	Plata blindado con Cobre (Cu)	Acero limpio
Densidad lineal	Cub: $\varnothing=0.040\text{mm}$ Cuc: $\varnothing=0.047\text{mm}$	$\varnothing=0.035\text{mm}$
Proveedor	Elektrisola - Textile Wire, Suiza	Bekaert, Bélgica
Densidad (Kg/dm^3)	8.9	8
Resistencia DC (Ω/m)	Cub: 13.373 Cuc: 13.705	735

2.3.4 Galvanizado Selectivo (Electrodeposición)

Este método es un proceso electrolítico usado para depositar metal en sustratos conductores. Los electrodepositos contienen todos los metales requeridos en cada caso y pueden depositar varios metales o aleaciones, escogiendo selectivamente las distintas partes de la superficie total a tratar. Los metales más usuales son: cobre, níquel, cobalto, cromo, plata, oro, platino, cadmio, estaño, zinc, indio y plomo. Las aleaciones son: níquel-cobalto, estaño-indio, cobalto-tungsteno, níquel-tungsteno, estaño-cadmio, estaño-plomo-níquel.

En algunos casos, sea cual sea el metal a depositar, se realiza un paso intermedio en el que se deposita cobre debido a su alta conductividad. Los electrodepositos son generalmente más densos que los depósitos realizados mediante pinturas en aerosol o mediante tanques electrolíticos, ofreciendo una buena protección contra la corrosión propia del metal [JUN2008].

Capítulo 3

Diseño, Construcción y Caracterización de Antenas Omnidireccionales y Direccionales a 3.5 GHz para el Módulo de Pruebas

Las antenas omnidireccionales son buenas para cubrir áreas grandes; es decir, la radiación cubre 360°. Sin embargo, las antenas direccionales son mejores para una conexión punto a punto, ya que concentran la mayor parte de la energía radiada de manera localizada, aumentando así la potencia emitida hacia el receptor y evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas.

En el presente capítulo, se describe el proceso realizado para el diseño, construcción y caracterización de las antenas omnidireccionales (la antena monopolo) y direccionales (la antena logarítmica periódica) a 3.5 GHz para el módulo de pruebas.

3.1 Diseño de la Antena Omnidireccional de Cuarto de Onda

3.1.1 Introducción

La antena monopolo o cuarto de onda está constituida de un solo brazo vertical y un plano de tierra como se muestra en la figura 3-1. De acuerdo a la teoría de imágenes, el plano a tierra toma la función del segundo elemento de la antena; por lo tanto, las ondas electromagnéticas que rebotan en el plano simulan que provienen del elemento inferior. Entonces, si ponemos un elemento de largo $L/2$ y la juntamos con el plano a tierra, el sistema total se comportará como una antena dipolo de largo L .

En una antena monopolo, cuyo elemento único tiene largo $\lambda/4$ tendrá el doble de directividad que el dipolo de largo $\lambda/2$, ya que la radiación del monopolo será únicamente sobre el plano a tierra [ITZ2007].

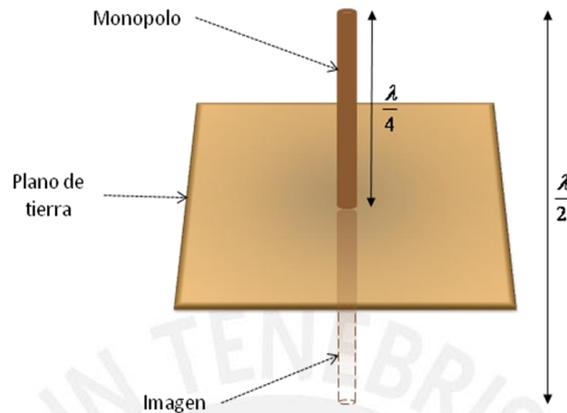


FIGURA 3-1: ANTENA MONOPOLO

3.1.2 Características

La ganancia típica del monopolo de cuarto de onda puede variar de 2 a 6 dB y tiene un ancho de banda de aproximadamente de 10%. Su resistencia de radiación es la mitad de un dipolo; es decir, 36.5Ω y su directividad puede estar entre 3.28 y 5.16 dB.

El patrón de radiación es omnidireccional y utiliza la polarización lineal vertical ya que es menos sensible a la interferencia por multi-trayectorias. En la siguiente figura se muestra el patrón de radiación de la antena monopolo [ITZ2007].

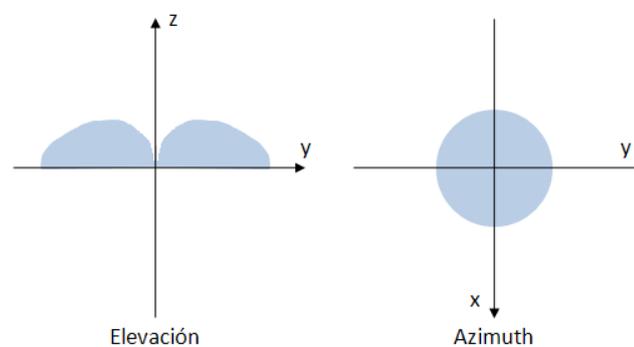


FIGURA 3-2: PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA MONOPOLO

3.1.3 Justificación

Este tipo de antena omnidireccional es simple y barata para construirla. Para ello, se necesitará un alambre de cobre, un conector SMA (SubMiniature versión A) y un

pedazo de tarjeta de circuito que cumplirá la función del plano de tierra. En relación a este último material, se puede usar 4 radiales de cuarto de longitud de onda en vez de la placa de circuito; sin embargo existen ventajas y desventajas en ciertos parámetros que se explican a continuación:

- Cuando se usan los radiales, estos se deben soldar al conector a un determinado ángulo de inclinación respecto al eje horizontal con lo cual se puede variar este ángulo y ello implica variar la impedancia de la antena. De esta manera podemos adaptar mejor nuestra antena a la línea de transmisión que se usará para la alimentación; pero una desventaja es la poca estabilidad que presenta la antena.
- Cuando se usa la placa de circuito, ésta debe estar cubierta de cobre la parte inferior de la placa, la cual hará contacto con el chasis del conector; y por la otra cara, que sólo tiene al substrato, estará el elemento radiante. Con esta disposición se logra obtener estabilidad en el funcionamiento de la antena; pero ya no se puede variar y ajustar la impedancia de la antena como en el caso anterior.

Entonces en el diseño de la antena se optará por tener mayor estabilidad en la frecuencia de operación de la antena para tener mejores valores al momento de medir los parámetros de transmisión con los materiales de apantallamiento.

Por otro lado, cabe mencionar que no se ha utilizado ningún programa para simular el funcionamiento de la antena monopolo porque posee un diseño sencillo que no implica mayores cálculos que la longitud del elemento radiante.

3.1.4 Dimensionamiento de la Antena

Empezaremos por hallar las dimensiones de nuestra antena que operará a una frecuencia central de 3.5GHz.

Calculamos la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{3.5 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0.0857 \text{ m}$$

Luego hallamos un cuarto de longitud de onda:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0.0857}{4} = 0.02143 \text{ m} = 21.43 \text{ mm}$$

La longitud calculada anteriormente es la del elemento radiante que irá en la parte central de un conector SMA. Como plano de tierra usaremos una tarjeta de circuito cuyo radio será de la misma dimensión hallada anteriormente.

Ahora calculamos la longitud del plano de tierra en milímetros. Como tenemos un triángulo de 45° podemos calcular la hipotenusa:

$$l = 21.43 \times \sqrt{2} = 30.3 \text{ mm}$$

En la siguiente figura se muestran las dimensiones del plano de tierra para la antena monopolo.

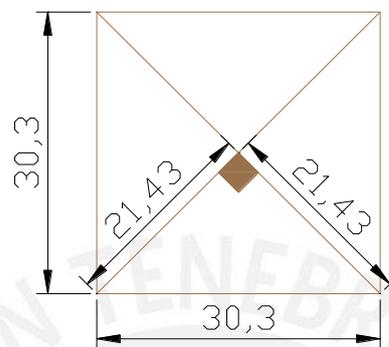


FIGURA 3-3: DIMENSIONES DEL PLANO DE TIERRA

3.1.5 Construcción de la Antena

En la siguiente tabla se muestran los materiales y equipos requeridos para la realización de las dos antenas, una para transmisión y otra para la recepción.

TABLA 3-1: MATERIALES PARA LA ANTENA MONOPOLO

MATERIALES	EQUIPOS
<ul style="list-style-type: none"> • 2 conectores SMA hembra con chasis montado sobre el conector • 2 placas de circuito de 30.3mmx30.3mm • 10 cm de alambre de cobre • 8 tornillos con tuercas • Punzón • Martillo de goma • Lija 	<ul style="list-style-type: none"> • Taladro • Hoja de sierra • Cortadora

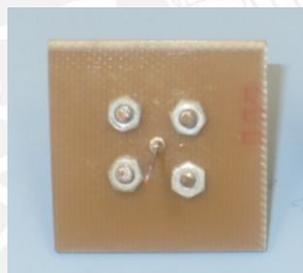
El proceso de construcción consiste en realizar un agujero, mediante un taladro, en la parte central de la placa de circuito para insertar el pin del conector. Luego insertamos el conector para marcar, con un lápiz, los 4 agujeros del conector en la placa. Seguidamente remarcamos con un punzón y un martillo de goma la parte marcada por

el lápiz. Después de ello tenemos que perforar los 4 puntos marcados con un taladro. Posteriormente fijamos el conector en la placa mediante los tornillos y las tuercas respectivas quedando como lo mostrado en la figura 3-4.

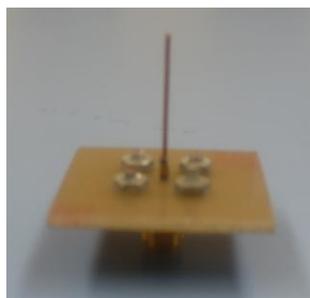


FIGURA 3-4: INSERCIÓN DEL CONECTOR SMA EN LA PLACA

Luego por la parte superior de la placa se suelda el alambre de cobre, cortado a la longitud hallada inicialmente, al pin del conector SMA; por último, se cortan los tornillos que han sobrepasado la placa para que no genere alguna interferencia y de esta manera se termina de ensamblar la antena. En la figura 3-5 se muestran las vistas de la antena terminada, lista para medirse.



(a)



(b)

FIGURA 3-5: ANTENA MONOPOLO CONSTRUIDA

(a) Vista frontal de la antena.

(b) Vista de perfil de la antena.

3.2 Diseño de la Antena Logarítmica Periódica en Circuito Impreso

3.2.1 Introducción

La antena logarítmica periódica consiste de un conjunto de dipolos, de diferentes longitudes, conectados a una línea de transmisión central con reversión de fase entre los dipolos y es alimentado por una sola fuente en el extremo pequeño.

La ventaja principal de las antenas logarítmicas periódicas es la independencia de su impedancia de radiación y de su patrón de radiación a la frecuencia. El patrón de radiación para una antena logarítmica periódica básica tiene radiación máxima hacia afuera del extremo pequeño.

Las antenas logarítmicas periódicas tienen relaciones de ancho de banda de 10:1 o más. Estas antenas pueden ser unidireccionales o bidireccionales y pueden tener una ganancia directiva de bajo a moderado. Pueden obtenerse también ganancias mayores utilizándolas como un elemento en un arreglo más complicado. La figura 3-6 muestra una antena logarítmica básica.



FIGURA 3-6: ANTENA LOGARÍTMICA

Fuente: "Parámetros de LPDA" [ECE2007]

3.2.2 Especificaciones Técnicas

La antena trabaja en su región activa, que es la porción en la cual está emitiendo o recibiendo radiación eficientemente. La región cambia con la frecuencia. Como ésta cambia en forma ascendente, la región activa cambia hacia delante. Además, la frecuencia límite superior de la antena está en función del elemento más corto.

La figura 3-7 muestra el arreglo básico de una antena logarítmica, que está alimentada por dos cables desfasados 180° , y sus parámetros de diseño.

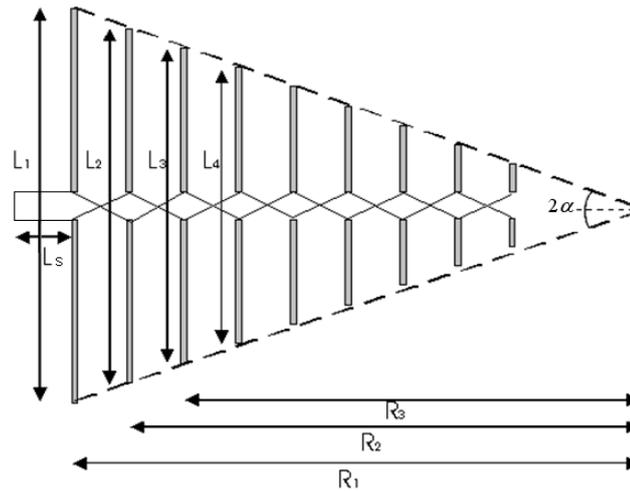


FIGURA 3-7: PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA ANTENA LOGARÍTMICA

Fuente: “Calculadora para el diseño de antenas” [DXZ2007]

La longitud de los dipolos y su espaciado están relacionados de tal forma que los elementos adyacentes tienen una relación constante entre sí, expresado por la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

R: Distancia al origen desde el dipolo mayor

L: Longitud del dipolo

τ : Constante de diseño

Asimismo, el espaciado entre cada dipolo se expresa por sigma (σ) y tiene la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{R_n - R_{n-1}}{2L_{n-1}} \dots\dots\dots(18)$$

El ángulo de origen se define como:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1-\tau}{4\sigma} \right) \dots\dots\dots(19)$$

Por último; el elemento corto, mostrado en la figura anterior, actúa como reflector y está expresado como:

$$L_s = \frac{L_1}{4} \dots\dots\dots(20)$$

3.2.3 Dimensionamiento de la Antena

Para hallar las dimensiones de los dipolos emplearemos una calculadora que se encuentra disponible en una página Web y de esta manera hacemos más fácil el proceso de cálculo. En la siguiente figura se muestra la interfaz de la calculadora.

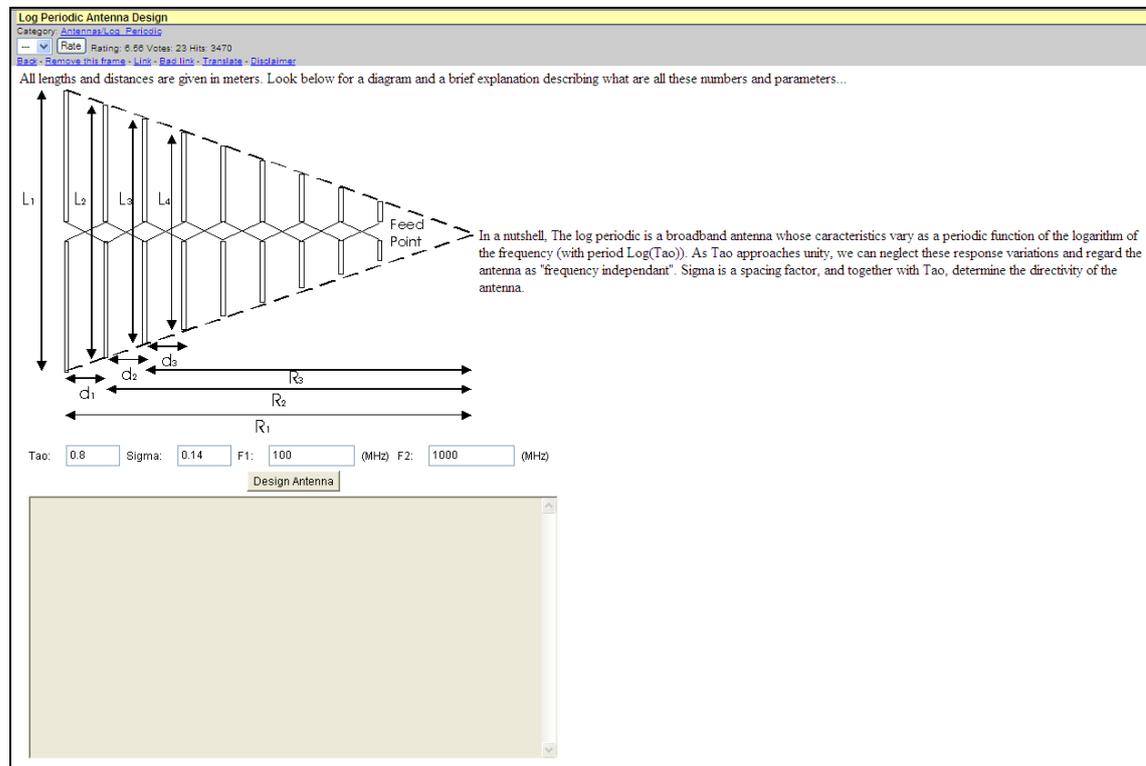


FIGURA 3-8: CALCULADORA PARA LAS DIMENSIONES DE LA ANTENA

Fuente: "Calculadora para el diseño de antenas" [DXZ2007]

Como vemos, en la figura 3-8, necesitamos de 4 factores para hallar las dimensiones: tau (τ), sigma (σ), frecuencia superior (F2) y frecuencia inferior (F1). Entonces, ahora el problema es hallar los valores de τ y σ ; pero usando la figura 3-9 podemos seleccionar los valores que deseamos:

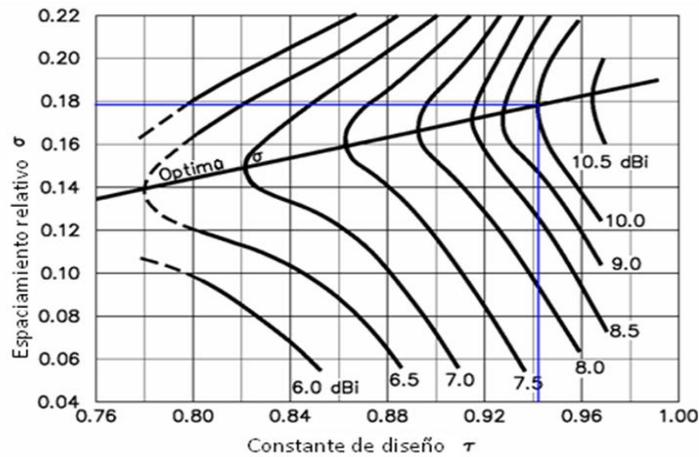


FIGURA 3-9: CONSTANTE DE DISEÑO VS. ESPACIAMIENTO RELATIVO

Fuente: “Department of Radio Electronics” [URE2004]

Normalmente se selecciona un τ bajo. También podríamos mantener la ganancia bastante baja con tal de evitar que el ancho del haz sea demasiado angosto. Escogiendo un τ de 0.941 y un σ de 0.178 se tiene una ganancia aproximada de 10 dBi.

Ahora ya podemos ingresar los datos teniendo en cuenta que el rango de frecuencias deseado se encuentra entre 3 y 4 GHz, ya que la frecuencia central de operación es de 3.5 GHz. La figura 3-10 muestra el resultado de las dimensiones, en metros, para los datos ingresados.

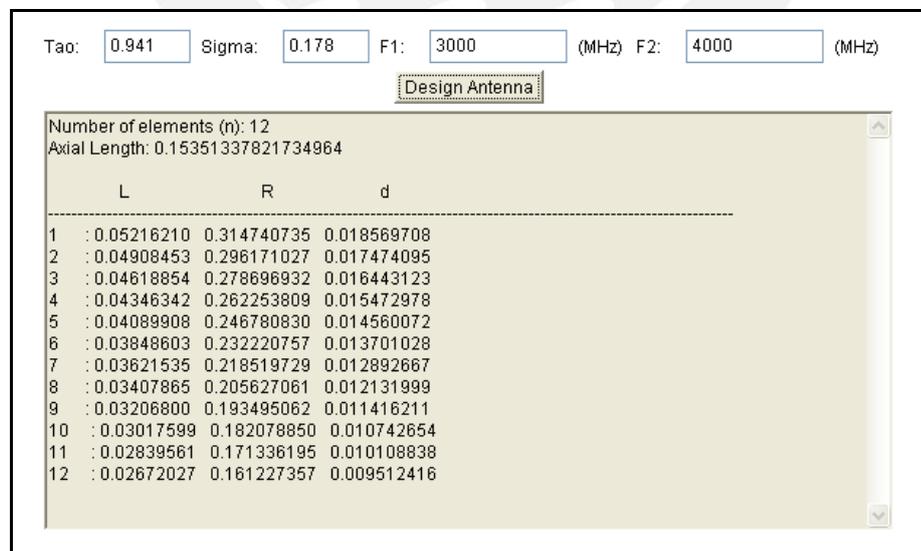


FIGURA 3-10: RESULTADO PARA LAS DIMENSIONES DE LA ANTENA

Fuente: “Calculadora para el diseño de antenas” [DXZ2007]

Del resultado anterior, vemos que la antena será de 12 elementos y la longitud axial es de 153.51 mm. En la siguiente tabla tenemos las dimensiones para la antena expresada en milímetros.

TABLA 3-2: DIMENSIONES PARA LA ANTENA LOGARÍTMICA

n	L (mm)	L/2 (mm)	R (mm)	d (mm)
1	52.16	26.08	314.74	18.57
2	49.08	24.54	296.17	17.47
3	46.19	23.10	278.69	16.44
4	43.46	21.73	262.25	15.47
5	40.89	20.45	246.78	14.56
6	38.49	19.25	232.22	13.7
7	36.22	18.11	218.52	12.89
8	34.08	17.04	205.63	12.13
9	32.07	16.04	193.49	11.42
10	30.18	15.09	182.08	10.74
11	28.39	14.20	171.34	10.11
12	26.72	13.36	161.23	9.51

Hasta este punto ya conseguimos tener las dimensiones de la antena para 3.5 GHz; sin embargo, por las pequeñas longitudes que se obtuvieron resulta complicado realizar la construcción con tubos de aluminio; por esta razón se ve conveniente ensamblar la antena utilizando una microcinta.

3.2.3.1 Antena impresa

La constitución de las antenas microcinta o microstrip se basa principalmente en una tira metálica muy fina situada sobre un sustrato de altura $h \ll \lambda_0$ que se encuentra sobre un plano de tierra o masa. A partir de esta formación podemos encontrar desde las más sencillas hasta estructuras con varias composiciones de sustratos y parches en paralelo. El parche es generalmente hecho con un material conductor como el oro o cobre. Para los arreglos de parches se requieren de líneas de microcinta, lo más delgadas posible, para interconectar cada uno de sus elementos a un punto en común que es el puerto de entrada de la antena.

Se pueden usar numerosos sustratos en este tipo de diseños, estando la constante dieléctrica (ϵ_r) comprendida entre $2.1 < \epsilon_r < 12$. En el caso de tener circuitos de microondas, es apropiado elegir sustratos más finos de mayores ϵ_r para minimizar radiaciones y acoplamientos indeseados y obtener circuitos de menor tamaño, aunque en general presentará mayores pérdidas, con lo que bajará su eficiencia y su ancho de

banda relativo [ANT2008]. En la figura 3-11 se muestra la estructura de una antena microcinta.

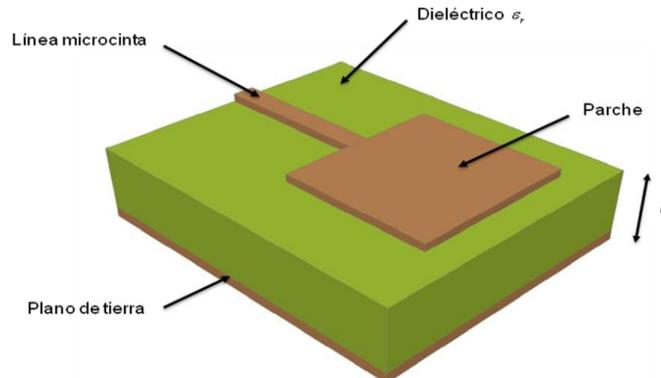


FIGURA 3-11: ESTRUCTURA DE UNA ANTENA MICROCINTA

Fuente: “Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital” [ITZ2007]

Las antenas microstrip se han vuelto populares en aplicaciones con dispositivos inalámbricos de pequeño tamaño; tales como teléfonos celulares y posicionadores GPS; aplicaciones militares y comunicación satelital.

3.2.3.2 Ondas de superficie y ondas radiadas

Cuando una antena de parche radia, una porción de la potencia total disponible por radiación directa se ve confinada o “atrapada” a lo largo de la superficie del sustrato. Esta energía electromagnética atrapada conlleva la aparición de las ondas de superficie. Este tipo de ondas es predominante en sustratos de alta permitividad y espesor grande (comparado con la longitud de onda). Asimismo, existen ondas que se transmiten al espacio donde las amplitudes de los campos decrecen con la distancia de propagación [ANT2008]. Estos fenómenos se muestran en la figura 3-12.

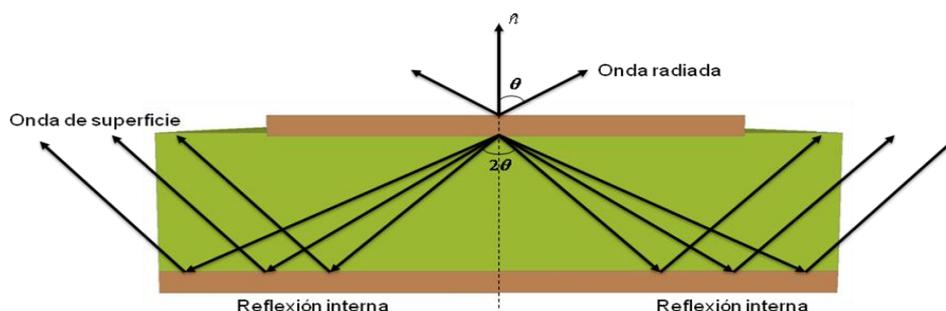


FIGURA 3-12: ONDAS RADIADAS Y DE SUPERFICIE EN UNA ANTENA MICROCINTA

Fuente: “Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital” [ITZ2007]

Es importante mencionar estos fenómenos, ya que introducen residuos de señal en diferentes circuitos y distorsionan las características de radiación de la antena con lo cual puede fallar al transmitir o recibir cuando se apunta a una dirección en particular.

3.2.3.3 Dimensiones finales para la antena impresa

Como vimos en el punto anterior, las ondas que se propagan por la antena microcinta tienen un comportamiento diferente a la propagación en el espacio libre. Entonces, las dimensiones calculadas inicialmente, para la antena logarítmica, están hechas para el espacio libre; es decir, considera la constante dieléctrica del aire; por eso, ahora, tenemos que considerar la permitividad del sustrato. En nuestro caso, el sustrato que se consigue en el mercado nacional es de dos tipos: Baquelita y fibra de vidrio. De los dos sustratos, la fibra posee mejores características para la construcción de antenas porque se necesita una constante dieléctrica lo más baja posible y la baquelita no posee esa cualidad.

Por otro lado, la fibra de vidrio posee una permitividad relativa menor a 4; pero no tenemos un valor exacto, ya que los proveedores de este material desconocen dicho parámetro; por lo tanto fijaremos un valor de 3.5 para los cálculos.

Empezaremos por la ecuación general para la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}} \dots \dots \dots (21)$$

A partir de ello, sacamos el factor de escalamiento que depende de la constante dieléctrica:

$$Factor = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots \dots \dots (22)$$

Reemplazamos el valor $\epsilon_r=3.5$:

$$Factor = \frac{1}{\sqrt{3.5}} = 0.53$$

El factor hallado se multiplicará a todas las dimensiones halladas inicialmente, los resultados lo tenemos en la siguiente tabla.

TABLA 3-3: DIMENSIONES FINALES PARA LA ANTENA IMPRESA

n	L (mm)	L/2 (mm)	R (mm)	d (mm)
1	27.64	13.82	166.81	9.84
2	26.01	13.01	156.97	9.26
3	24.48	12.24	147.71	8.71
4	23.03	11.52	138.99	8.20
5	21.67	10.84	130.79	7.72
6	20.40	10.20	123.08	7.26
7	19.20	9.60	115.82	6.83
8	18.06	9.03	108.98	6.43
9	17.00	8.50	102.55	6.05
10	16.00	8.00	96.50	5.69
11	15.05	7.52	90.81	5.36
12	14.16	7.08	85.45	5.04

Además, se tienen dos dimensiones adicionales:

- Longitud axial: 81.36 mm
- L_S : 6.91 mm

3.2.4 Fase de Simulación

Una vez definidas todas las especificaciones y requisitos iniciales a tener en cuenta para la antena microstrip, vamos a proceder a la simulación de resultados sobre el entorno HFSS de la empresa Ansoft. Este es un programa especializado para la simulación de campos en estructuras y búsqueda de parámetros mediante un barrido en altas frecuencias.

Como se ha de suponer inicialmente, la simulación dará resultados ideales, al no tener en cuenta la situación del entorno en la que se encontrará la antena y las imperfecciones de la construcción o montaje.

3.2.4.1 Proceso de simulación

En primer lugar, debemos dibujar la antena logarítmica en el entorno del programa y luego definir las características de cada elemento. Las especificaciones del substrato utilizado en la simulación se muestran en la tabla 3-4.

TABLA 3-4: ESPECIFICACIONES DEL SUBSTRATO USADO EN LA SIMULACIÓN

CARACTERÍSTICAS DEL SUBSTRATO	
Tipo	Dupont Type 100 HN Film (tm)
Permeabilidad	1
Permitividad	3.5
Pérdidas tangenciales	0.0026
Espesor (mm)	1.5

La figura 3-13 muestra el dibujo de la antena. En el cual se pueden ver los dipolos superiores (color fucsia) e inferiores unidos a una línea microstrip, con esta configuración se logra el desfase de 180° entre los elementos radiantes. También es necesario indicar que el ancho de todos los elementos es de 2 mm., valor que se fija por practicidad.

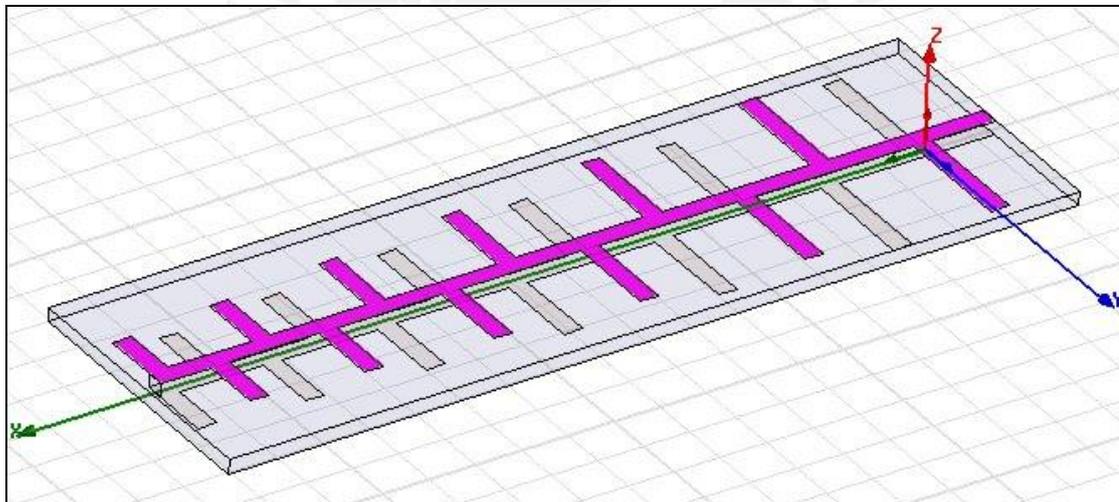


FIGURA 3-13: DIBUJO DE LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA

Asimismo, se deben definir las condiciones de frontera como la superficie de radiación para los cálculos de los campos electromagnéticos y el puerto de excitación que permitirá el flujo de la energía. Como se explicó anteriormente la antena se alimentará por el elemento más pequeño. Una vez hecho lo anterior, se ajusta la frecuencia central y se escoge un rango de frecuencias de barrido para observar el comportamiento de la antena a distintas frecuencias (ver Anexo 2). La figura 3-14 muestra el sistema final de la antena, listo para correr el programa.

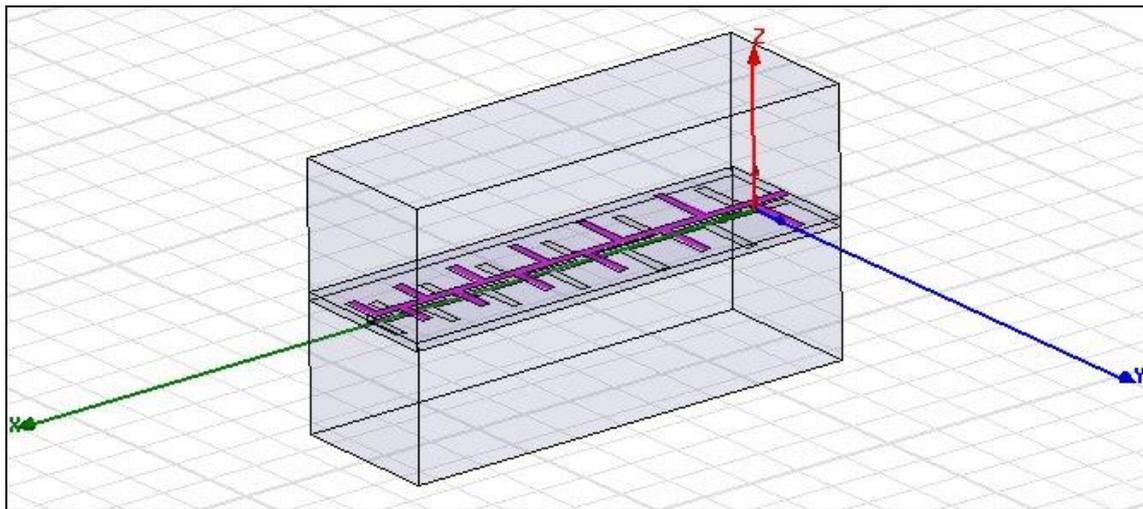


FIGURA 3-14: DIBUJO FINAL PARA LA SIMULACIÓN DE LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA

3.2.4.2 Resultados de la simulación

El software HFSS usa el método de elementos finitos para las estructuras que son simuladas. De esta manera genera las soluciones de los campos, características de los puertos de entrada y los parámetros S.

En la figura 3-15 se muestran las pérdidas de retorno en donde se puede observar que a 3.5 GHz se tiene una pérdida de -25.42 dB, con lo cual se obtiene un buen resultado con las dimensiones y los requerimientos planteados al inicio.

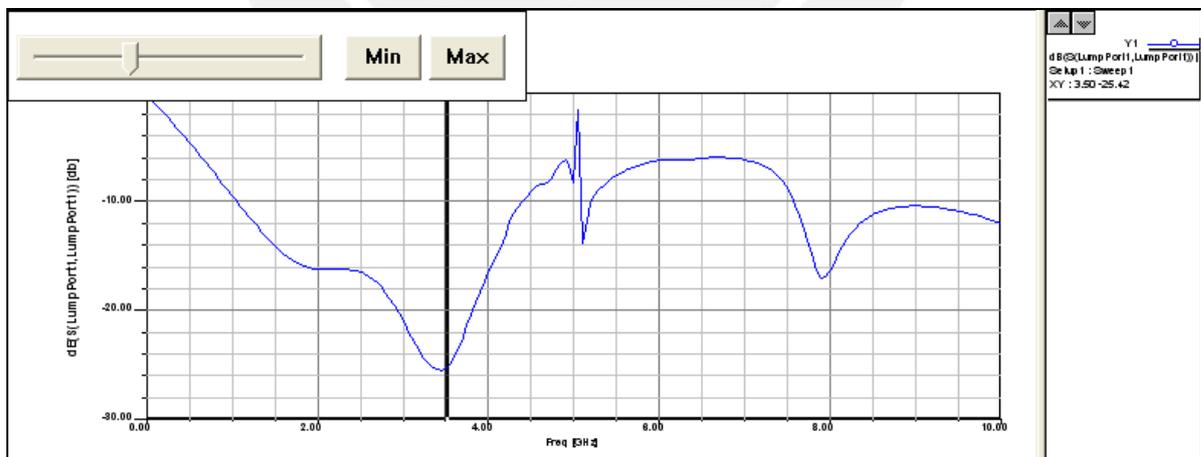


FIGURA 3-15: GRÁFICO DEL S_{11} VS. FRECUENCIA

En la figura 3-16 se muestra el gráfico de la relación de onda estacionaria (VSWR). Un valor de VSWR=1 indica que la antena está perfectamente adaptada, es el caso ideal

($S_{11}=0$). Como vemos en la figura a 3.5 GHz tenemos un VSWR=1.11, con lo cual estamos en el caso ideal.

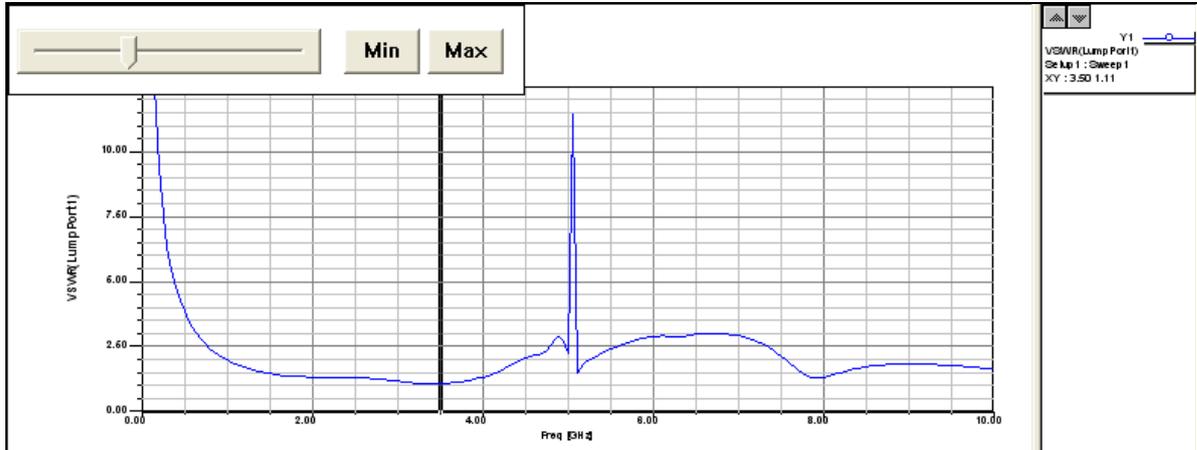


FIGURA 3-16: GRÁFICO DEL VSWR VS. FRECUENCIA

Con los dos gráficos mostrados podemos señalar que el diseño de la antena microstrip logarítmica es correcto y cumple con las especificaciones deseadas.

Por otro lado, mostraremos 2 gráficos más para apoyar nuestro diseño:

La figura 3-17 muestra las impedancias de la antena, siendo para 3.5 GHz el valor de $54.87+j2.81 \Omega$. La línea de color azul muestra la parte real de la impedancia y la línea roja, la parte imaginaria.

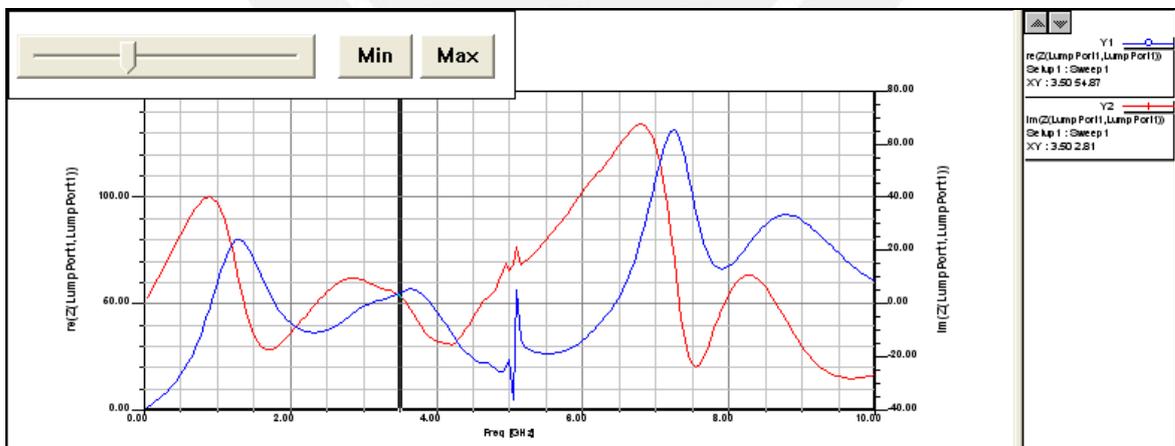


FIGURA 3-17: GRÁFICO DE IMPEDANCIAS

La figura 3-18 muestra el patrón de radiación de la antena y en la que podemos apreciar la directividad cuyo valor es de -16.788 dB en promedio.

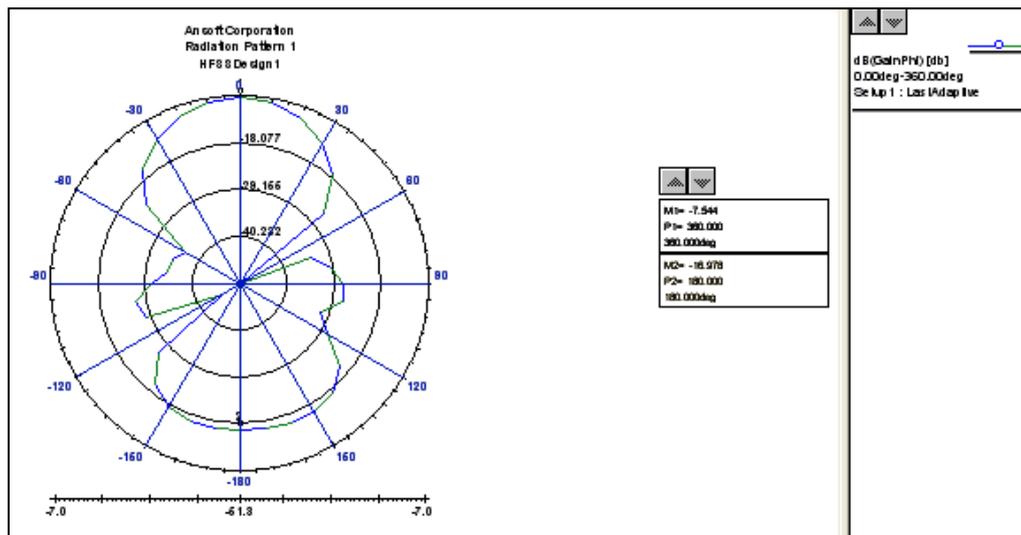


FIGURA 3-18: PATRÓN DE RADIACIÓN

Ahora, pasaremos a la etapa de ensamblaje de la antena.

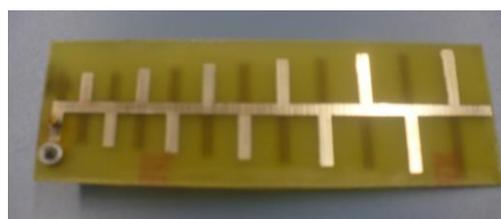
3.2.5 Fabricación de la Antena

La estructura microstrip se mandó a fabricar de acuerdo al diseño de las dimensiones, el cual se realizó en Autocad 2007 (ver Anexo 3).

La figura 3-19 muestra la antena microstrip logarítmica fabricada en dos tipos de fibra de vidrio que poseía el proveedor (color blanco y verde); en la parte de caracterización veremos cuál de ellas funciona adecuadamente.



(a)



(b)

FIGURA 3-19: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS

(a) Antena con substrato de color blanco.

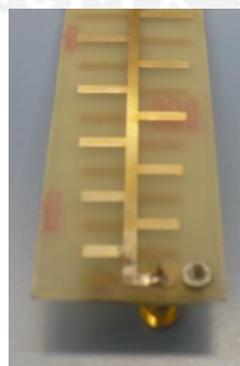
(b) Antena con substrato de color verde.

Ahora, lo que falta es la alimentación de las dos antenas mostradas en la parte superior; para ello necesitaremos los materiales enumerados en la tabla 3-5.

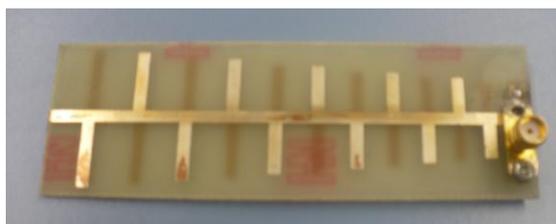
TABLA 3-5: MATERIALES PARA LA ALIMENTACIÓN PREVIA DE LA ANTENA MICROSTRIP

MATERIALES	EQUIPOS
<ul style="list-style-type: none"> • 2 conectores SMA hembra con chasis de dos agujeros • 2 tornillos con tuercas • Punzón • Martillo de goma • Pasta para soldar • Cautín y soldadura de estaño 	<ul style="list-style-type: none"> • Taladro • Hoja de sierra

Con el punzón y el martillo de goma marcamos un punto en el elemento radiante pequeño y con la ayuda del taladro perforamos el sustrato; también realizamos otro agujero; pero esta vez al costado del elemento radiante. Luego, el primer agujero servirá para hacer pasar el pin del conector y el otro será para atornillar y asegurar el conector al sustrato. Por último, tenemos que soldar en la parte superior, para que el pin haga contacto con el pequeño elemento, y en el parte inferior, para que el chasis haga la función del plano de tierra para la antena. En la figura 3-20 se muestran los acabados de la alimentación.



(a)



(b)

FIGURA 3-20: ALIMENTACIÓN PREVIA PARA LA ANTENA MICROSTRIP

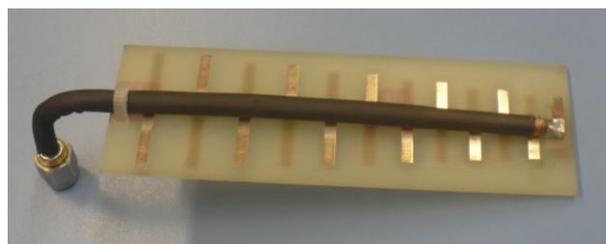
- (a) Vista superior de la alimentación de la antena.
- (b) Vista posterior de la alimentación de la antena.

Es importante hacer una observación a lo explicado anteriormente, si bien la antena se alimenta por el elemento más pequeño existe un problema cuando se conecta al equipo para la transmisión o recepción, ya que el conector se encontrará delante de la antena y ello afectaría al patrón de radiación. Por lo tanto, debemos tener el conector en la parte posterior del dipolo más largo y así pueda viajar la onda, sin obstáculos, hasta los dipolos pequeños e irradiarse al espacio libre. Para la construcción de la alimentación final se muestran los materiales en la tabla 3-6.

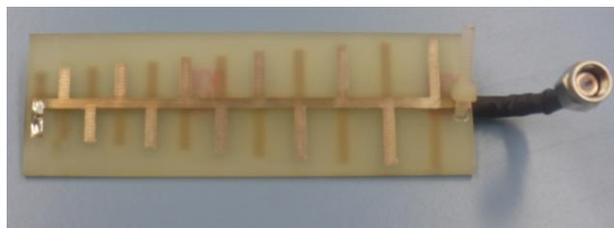
TABLA 3-6: MATERIALES PARA LA ALIMENTACIÓN FINAL DE LA ANTENA MICROSTRIP

MATERIALES	EQUIPOS
<ul style="list-style-type: none"> • 2 conectores SMA macho con coaxial de 50 Ω • 2 cintillos de 15cm. • Manga termocontractil • Punzón Y martillo de goma • Pasta para soldar • Cautín y soldadura de estaño 	<ul style="list-style-type: none"> • Taladro

Al igual que en el caso anterior, tenemos que realizar un agujero cerca al elemento radiante pequeño para que a través de él soldemos la guía del coaxial y conduzca a los elementos de la parte inferior. Además, en la parte del dipolo de mayor tamaño se tiene que hacer dos ranuras con el taladro para hacer pasar el cintillo y sujetar el coaxial al substrato. Antes de soldar, le ponemos la manga termocontractil al coaxial para que aisle a la línea microstrip superior y solo en la parte junto a la guía soldamos para que conduzca a los elementos superiores. El ensamblaje final se muestra en la figura 3-21.



(a)



(b)

FIGURA 3-21: ENSAMBLAJE FINAL DE LA ANTENA MICROSTRIP

(a) Vista superior de la antena.

(b) Vista posterior de la antena.

La alimentación previa se ha realizado para comprobar el funcionamiento de las antenas fabricadas en dos substratos, de color blanco y verde, cuyos resultados se verán más adelante; pero para las pruebas con los materiales de apantallamiento utilizaremos la alimentación final explicada en líneas anteriores.

3.3 Proceso de Caracterización

En esta parte se presentan tres tipos de medición: Medición de las pérdidas de retorno, la relación de onda estacionaria (SWR) y las impedancias.

Para obtener esos comportamientos se utilizó el analizador vectorial de redes (VNA – Vectorial Network Analyzer) Agilent, modelo 8722ET, que funciona en el rango de 50 MHz hasta 40 GHz. En el puerto de entrada del Test-Set se conectó un cable flexible con conectores 3.5 mm en sus extremos. Seguidamente se efectuó una calibración para reflexión indicando el rango de frecuencias de 50 MHz hasta 10 GHz y con los estándares de calibración corto, abierto y carga broadband de 3.5 mm. Ahora el VNA está listo para medir los parámetros de las antenas.

3.3.1 Antena Monopolo

La antena monopolo se conectó tal y como se muestra en la figura 3-22 para realizar todas las mediciones; además se utilizó un soporte de madera.

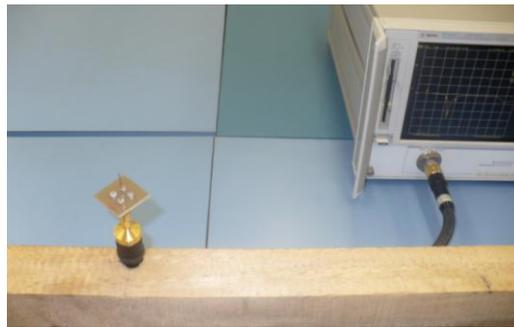


FIGURA 3-22: MEDICIONES CON LA ANTENA MONOPOLO

3.3.1.1 Medición de las pérdidas de retorno

Las pérdidas de retorno (Γ_L) o parámetro S_{11} (coeficiente de reflexión) indican la cantidad de señal incidente que se está reflejando hacia la fuente y se expresa en dB. Si Γ_L es mayor a cero, entonces se está reflejando más señal de lo que se está incidiendo.

En la figura 3-23 se muestra el resultado del S_{11} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -21.418 dB, lo cual significa que a esa frecuencia la onda reflejada es poca y la antena monopolo está trabajando bien.

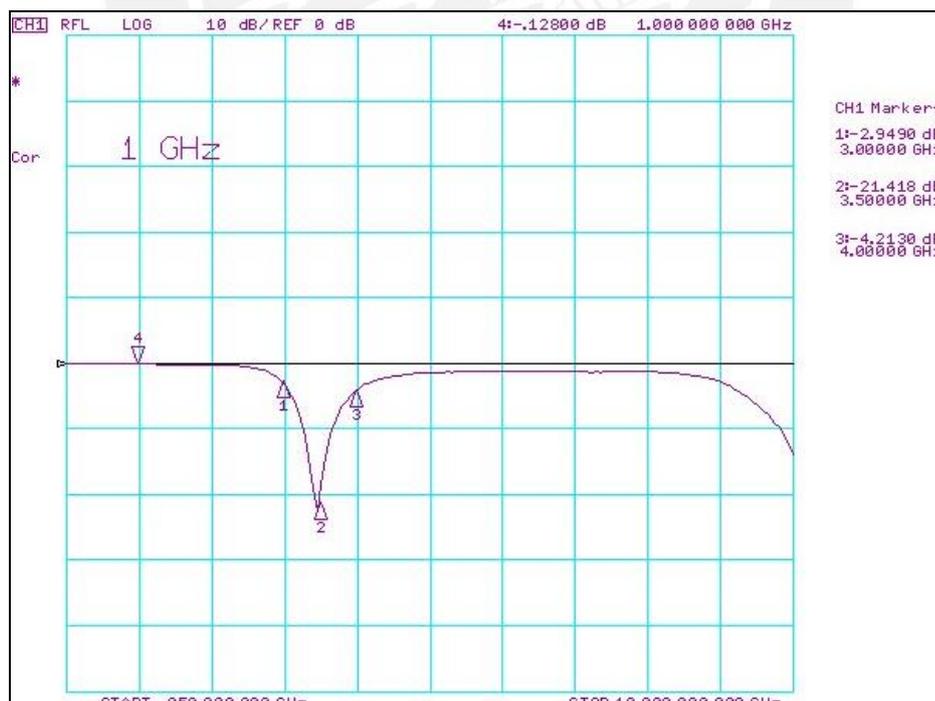


FIGURA 3-23: PÉRDIDA DE RETORNO DE LA ANTENA MONOPOLO

3.3.1.2 Medición del SWR

El SWR es la relación de la onda incidente y reflejada. Su valor ideal es 1 lo cual significa que existe una máxima transferencia de potencia y esto se da cuando el coeficiente de reflexión es cero.

En la figura 3-24 se muestra el resultado del SWR medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta un valor de 1.1921 y para que una antena funcione adecuadamente sus valores deben estar entre 1 y 1.5; por lo tanto es aceptable este valor.



FIGURA 3-24: RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA DE LA ANTENA MONOPOLO

3.3.1.3 Medición de impedancias

La impedancia de entrada de la antena se define como la relación entre la tensión y la corriente en sus terminales. Posee valores complejos (parte real e imaginaria).

En la figura 3-25 se muestra el resultado, en la Carta de Smith, con los valores de impedancias y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta un valor real de 56.125 Ω . Este valor no es muy próximo a la línea de transmisión la cual es de 50 Ω , lo que significa algunas pérdidas en las mediciones con la antena.

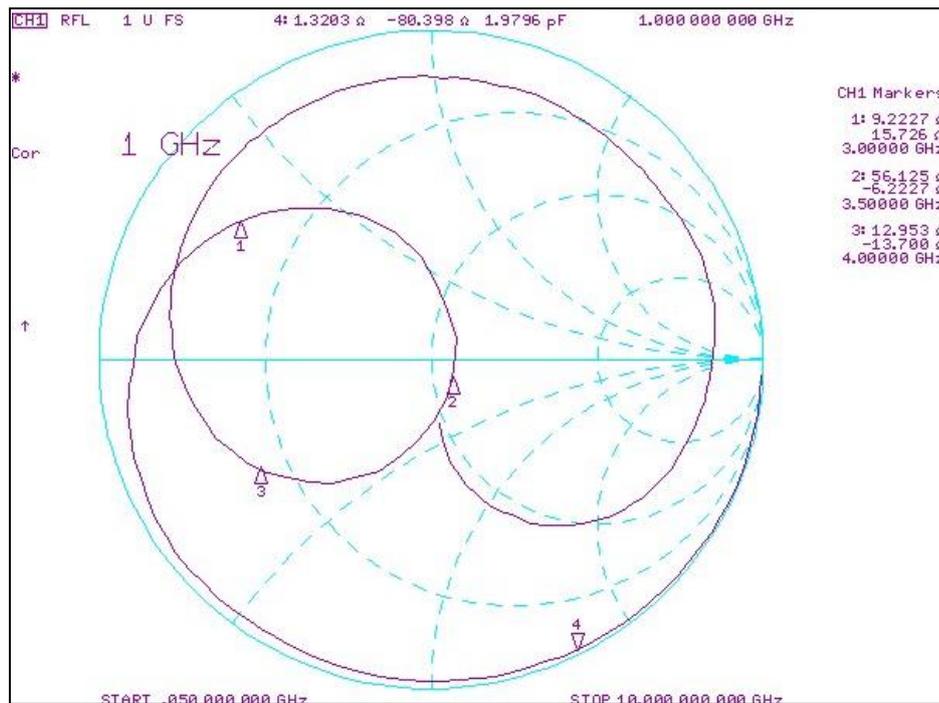


FIGURA 3-25: IMPEDANCIAS DE LA ANTENA MONOPOLO

3.3.2 Antena Logarítmica Periódica Impresa

Las antenas logarítmicas impresas se conectaron al igual que en el caso anterior, mediante el soporte de madera, y se muestran en la figura 3-26 para realizar todas las mediciones.



FIGURA 3-26: MEDICIONES CON LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA

(a) Antena logarítmica con substrato blanco.

(b) Antena logarítmica con substrato verde.

Por otro lado, como tenemos dos substratos: uno blanco y otro verde; determinaremos cual de ellos se ajusta a nuestros requerimientos con las mediciones necesarias.

3.3.2.1 Medición de las pérdidas de retorno

En la figura 3-27 se muestra el resultado del S_{11} medido para el sustrato blanco y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -18.153 dB.



FIGURA 3-27: PÉRDIDA DE RETORNO DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO BLANCO

En la figura 3-28 se muestra el resultado del S_{11} medido para el sustrato verde y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -13.973 dB.



FIGURA 3-28: PÉRDIDA DE RETORNO DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO VERDE

3.3.2.2 Medición del SWR

En la figura 3-29 se muestra el resultado de la relación de onda estacionaria medido para el substrato blanco y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta un valor de 1.2969.

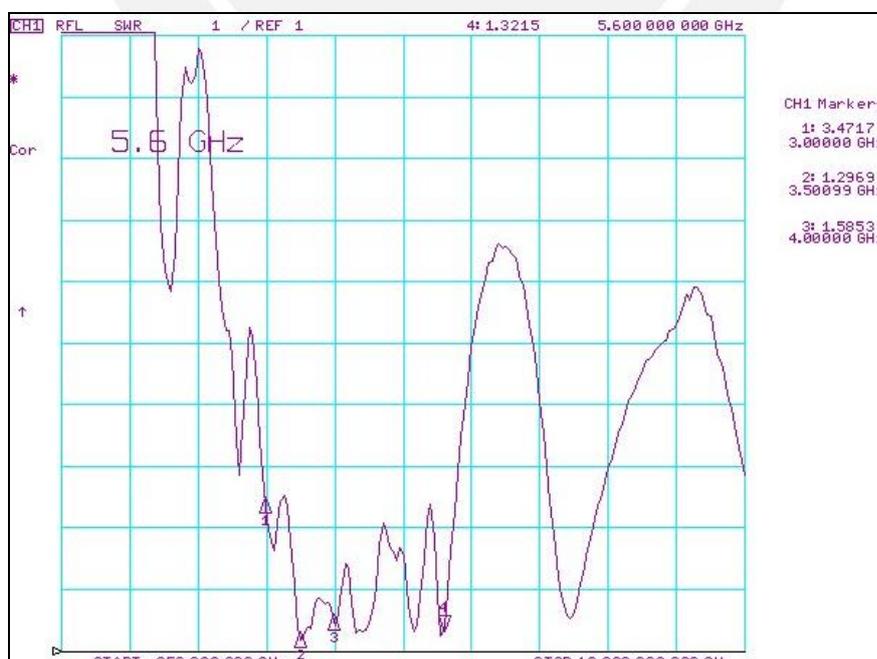


FIGURA 3-29: SWR DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO BLANCO

En la figura 3-30 se muestra el resultado del SWR medido para el sustrato verde y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta un valor de 1.5597.

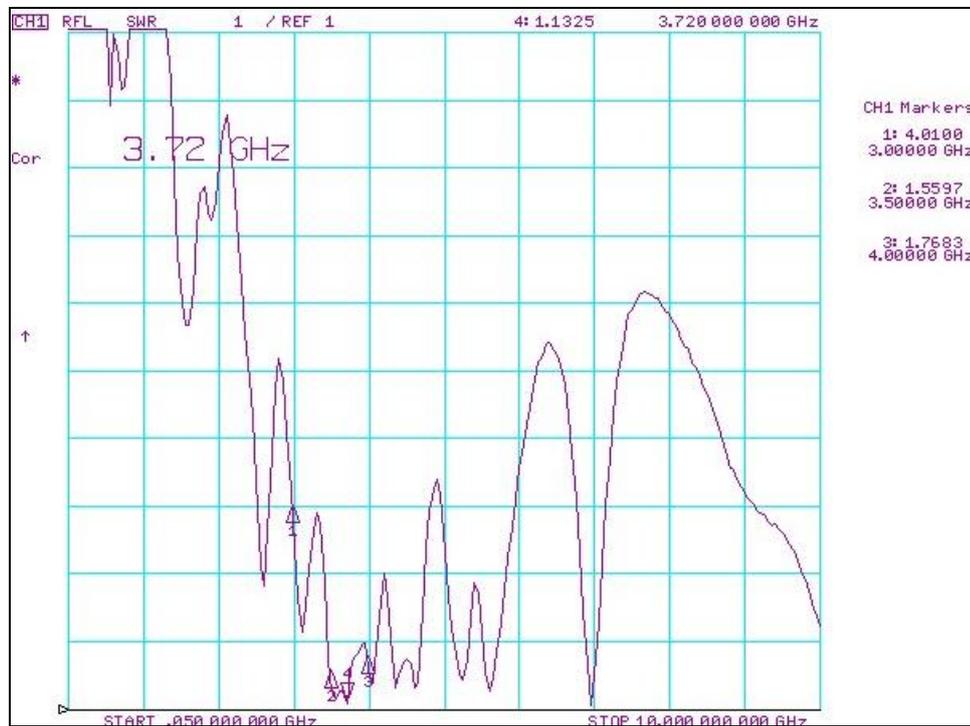


FIGURA 3-30: SWR DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO VERDE

3.3.2.3 Medición de impedancias

En la figura 3-31 se muestra el resultado, en la Carta de Smith, con los valores de impedancias para el sustrato blanco y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta un valor real de 49.264 Ω . Este valor está próximo a la impedancia del cable coaxial.

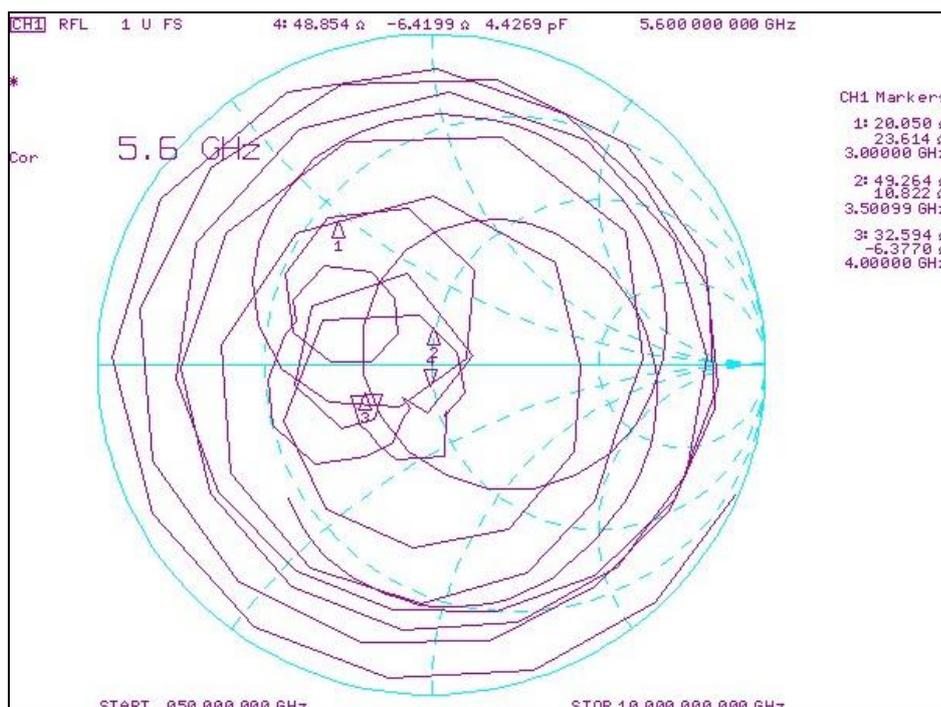


FIGURA 3-31: IMPEDANCIAS DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO BLANCO

En la figura 3-32 se muestra el resultado con los valores de impedancias para el substrato verde y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta un valor real de 34.834 Ω.

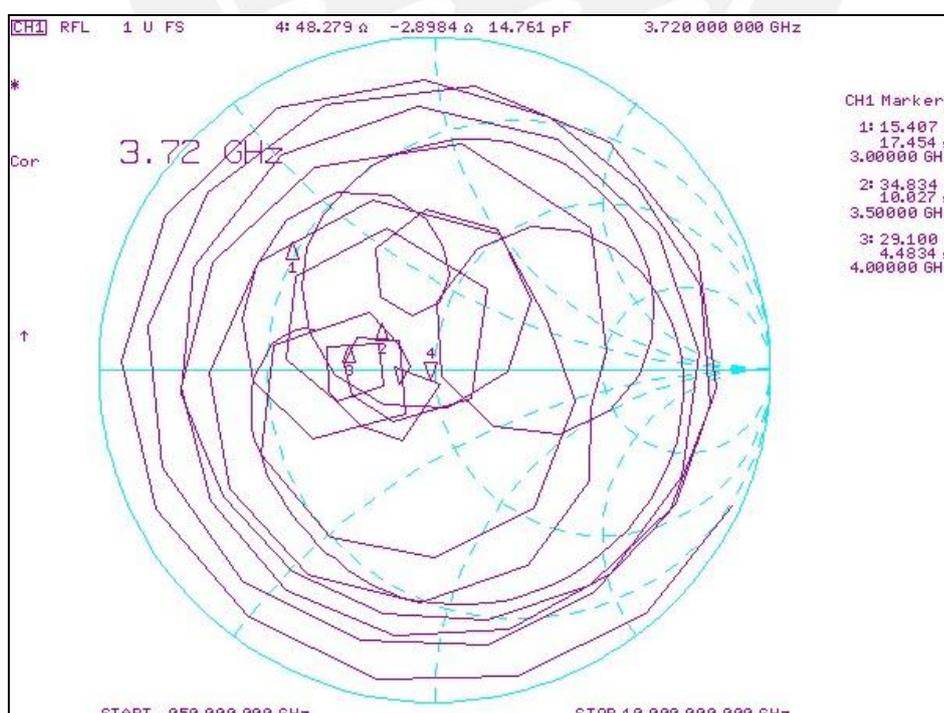


FIGURA 3-32: IMPEDANCIAS DE LA ANTENA LOGARÍTMICA CON SUBSTRATO VERDE

3.3.2.4 Comparación entre sustratos de la antena

En la tabla 3-7 se muestran los valores medidos entre ambos sustratos para la frecuencia de 3.5 GHz.

TABLA 3-7: COMPARACIÓN ENTRE SUBSTRATOS

PARÁMETROS	COLOR DE SUBSTRATO	
	BLANCO	VERDE
Pérdida de retorno (dB)	-18.153	-13.973
SWR	1.2969	1.5597
Impedancia	49.264 +j10.822 Ω	34.834 +j10.027 Ω

Como podemos ver, el sustrato de color blanco presenta mejores características para 3.5 GHz, porque posee menor pérdida de retorno, el valor de SWR está entre el rango adecuado de 1 a 1.5 y el valor de la impedancia se aproxima a la impedancia del cable coaxial que es 50 Ω.

Entonces para las mediciones de apantallamiento se usará la antena logarítmica con el sustrato de color blanco.

3.3.2.5 Comparación entre la simulación y las mediciones

Una vez que hemos definido la antena impresa en el sustrato blanco como la que posee el adecuado funcionamiento; ahora, compararemos sus valores obtenidos de los tres tipos de mediciones con la respectiva simulación para la frecuencia de 3.5 GHz. Estos resultados son indicados en la tabla 3-8.

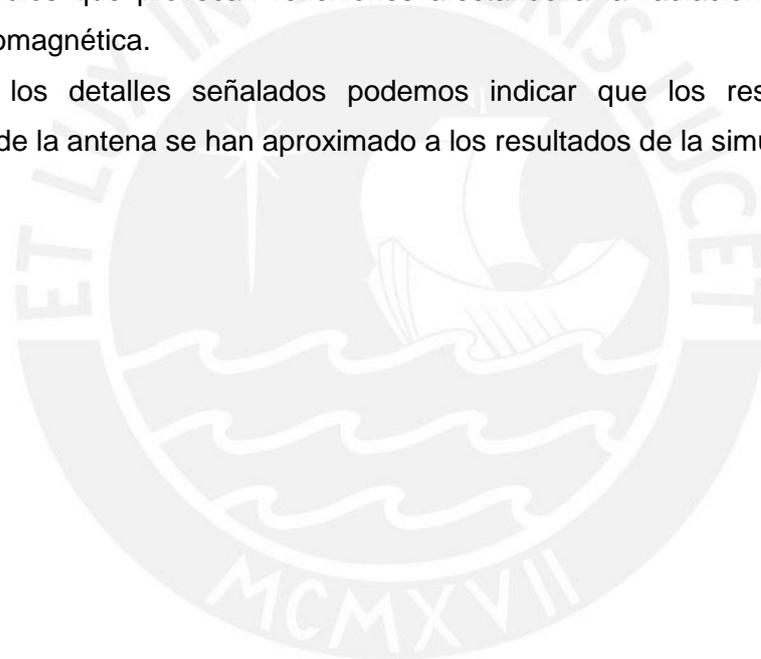
TABLA 3-8: COMPARACIÓN ENTRE LA SIMULACIÓN Y LAS MEDICIONES

PARÁMETROS	FASES DE LA ANTENA LOGARÍTMICA	
	SIMULACIÓN	CONSTRUCCIÓN
Pérdida de retorno (dB)	-25.42	-18.153
SWR	1.11	1.2969
Impedancia	54.87+j2.81 Ω	49.264 +j10.822 Ω

De la tabla anterior notamos que existen diferencias entre los resultados, sobretodo en el primer parámetro; mientras, que en el segundo y tercero (sólo la parte real) existe poca diferencia. Ahora estas variaciones se deben a muchos factores que se indican a continuación:

- El tipo de substrato utilizado en la simulación es diferente al utilizado para la construcción y por lo tanto la propagación de ondas en el dieléctrico cambia de acuerdo la permitividad obteniéndose diferencias en las mediciones.
- En la simulación sólo se indicó el puerto por donde se realizaría la alimentación de la antena; mientras que en la construcción se soldó un cable coaxial de 50 Ω y ello introduce pequeñas pérdidas, ya que no se usa ningún transformador de impedancias o balún.
- También las imperfecciones del ensamblaje de la antena producen pequeñas variaciones en las mediciones.
- Por último, en la simulación se considera una radiación en el espacio libre perfecto y en las experiencias realizadas dentro del laboratorio existen obstáculos que provocan reflexiones afectando a la radiación de la energía electromagnética.

A pesar de los detalles señalados podemos indicar que los resultados de la construcción de la antena se han aproximado a los resultados de la simulación.



Capítulo 4

Implementación del Esquema de Prueba para las Mediciones de Apantallamiento

En este capítulo, se explicará el montaje para las pruebas de transmisión y luego se realizarán las mediciones con láminas conductoras, solamente. Se escogió este tipo de material de apantallamiento porque fue más asequible su obtención en el mercado nacional. También utilizaremos dos tipos de antenas, cuya construcción se explicó en el capítulo anterior; además de los equipos de medición que existen en el laboratorio. Finalmente se hará una evaluación de los materiales conductores de acuerdo a los resultados.

4.1 Desarrollo Experimental

Para su ejecución se deben realizar los siguientes pasos:

- Definición e inspección del lugar escogido para la medición: En nuestro caso, las mediciones se realizarán dentro de un laboratorio de la universidad. Cabe indicar que el espacio es un poco reducido y cuenta con varios equipos y materiales como: Computadoras, armarios, etc.; los cuales se consideran como obstáculos que van generar reflexiones al momento de las mediciones.
- Determinación del esquema de medición (campo cercano, campo lejano): Las mediciones se realizarán en el campo lejano, ya que a una distancia grande en relación a la longitud de onda los campos formados pueden verse como un

plano para una pequeña región. Ahora determinaremos a partir de que distancia nos encontramos en el campo lejano, para ello utilizamos la ecuación (7):

$$R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}$$

La mayor longitud física de las dos antenas la posee la antena logarítmica microstrip la cual es 0.02764 m y la longitud de onda hallada anteriormente es 0.0857 m; reemplazando los valores tenemos:

$$R \geq 2 \frac{(0.02764)^2}{0.0857} = 0.0178m = 1.78cm$$

Según el valor calculado, vemos que a partir de una distancia de 2 cm desde la antena, ya estamos en campo lejano.

- Determinación de los equipos y materiales de apantallamiento a emplear en el proceso de medición: En la tabla 4-1 se detallan los materiales a emplearse.

TABLA 4-1: MATERIALES PARA LAS MEDICIONES DE APANTALLAMIENTO

MATERIALES	EQUIPOS
<ul style="list-style-type: none"> • 2 antenas omnidireccionales (antena monopolo) • 2 antenas direccionales (antena microstrip logarítmica) • 1 soporte para las antenas • Láminas conductoras: Cobre, aluminio y acero 	<ul style="list-style-type: none"> • Analizador vectorial de redes (VNA)

- Determinación de los parámetros de medición: El único parámetro que se medirá es el coeficiente de transmisión directa (S_{21}), el cual indica la relación de la onda transmitida con respecto a la onda incidente. Entonces este nos indicará la efectividad del blindaje según lo explicado en el capítulo 2.

4.2 Exposición de Finalidades

A continuación se exponen las finalidades de este experimento.

- Observar el comportamiento de los dos tipos de antenas construidos (omnidireccional y direccional) cuando se realicen las medidas de transmisión en el espacio libre.

- Realizar las mediciones de transmisión (parámetro S_{21}) usando el analizador vectorial de redes con las planchas metálicas delgadas encontradas. En este caso se consiguieron tres tipos: Cobre, aluminio y acero.
- Comparar los valores de transmisión S_{21} , de los tres materiales encontrados, a la frecuencia de 3.5 GHz. Luego evaluar qué material es el adecuado para el apantallamiento.

4.3 Descripción del Experimento

El experimento consiste en tener una antena transmisora conectada al puerto 1 del analizador vectorial de redes mediante un cable coaxial y otra antena receptora conectada al puerto 2 del mismo equipo. Entonces en el VNA mediremos el S_{21} , expresado en decibelios, inicialmente en el espacio libre, sin obstáculos; luego iremos poniendo, entre ambas antenas, las tres placas metálicas.

4.4 Escenario de Prueba

En la figura 4-1 se muestra el esquema para las pruebas.



FIGURA 4-1: ESQUEMA PARA LAS PRUEBAS DE APANTALLAMIENTO

En la imagen anterior podemos ver el soporte de madera que posee dos canales, los cuales se realizaron para soportar a los cables coaxiales, que estarán conectados a la antena y al VNA que se encuentra detrás. Además, la separación entre ambos es de 90 cm y en el medio se hizo una ranura para poder insertar los metales conductores.

4.5 Mediciones del Parámetro de Transmisión

Antes de realizar las mediciones es necesario calibrar el VNA para transmisión desde 50 MHz hasta 10 GHz. Para ello se conecta un cable coaxial al puerto 1 y el otro, al puerto 2; para la unión se usa un conector de 3.5 mm. Luego de esto ya podemos conectar nuestras antenas a cada extremo de los cables.

4.5.1 Usando la Antena Monopolo

4.5.1.1 En el espacio libre

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-2



FIGURA 4-2: ANTENAS MONOPOLO EN EL ESPACIO LIBRE

En la figura 4-3 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -43.467 dB.



FIGURA 4-3: S_{21} EN EL ESPACIO LIBRE CON LAS ANTENAS MONOPOLO

4.5.1.2 Con la plancha de cobre

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-4.

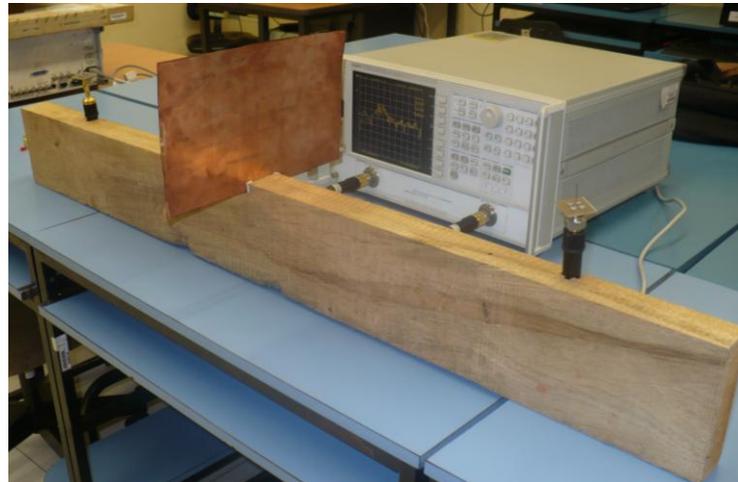


FIGURA 4-4: ANTENAS MONOPOLO CON LA PLANCHA DE COBRE

En la figura 4-5 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -66.418 dB.



FIGURA 4-5: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE COBRE Y LAS ANTENAS MONOPOLO

4.5.1.3 Con la plancha de aluminio

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-6.

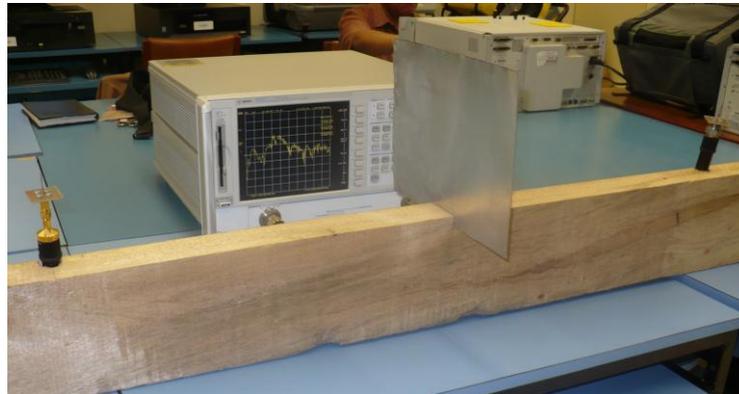


FIGURA 4-6: ANTENAS MONOPOLO CON LA PLANCHA DE ALUMINIO

En la figura 4-7 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -55.331 dB.

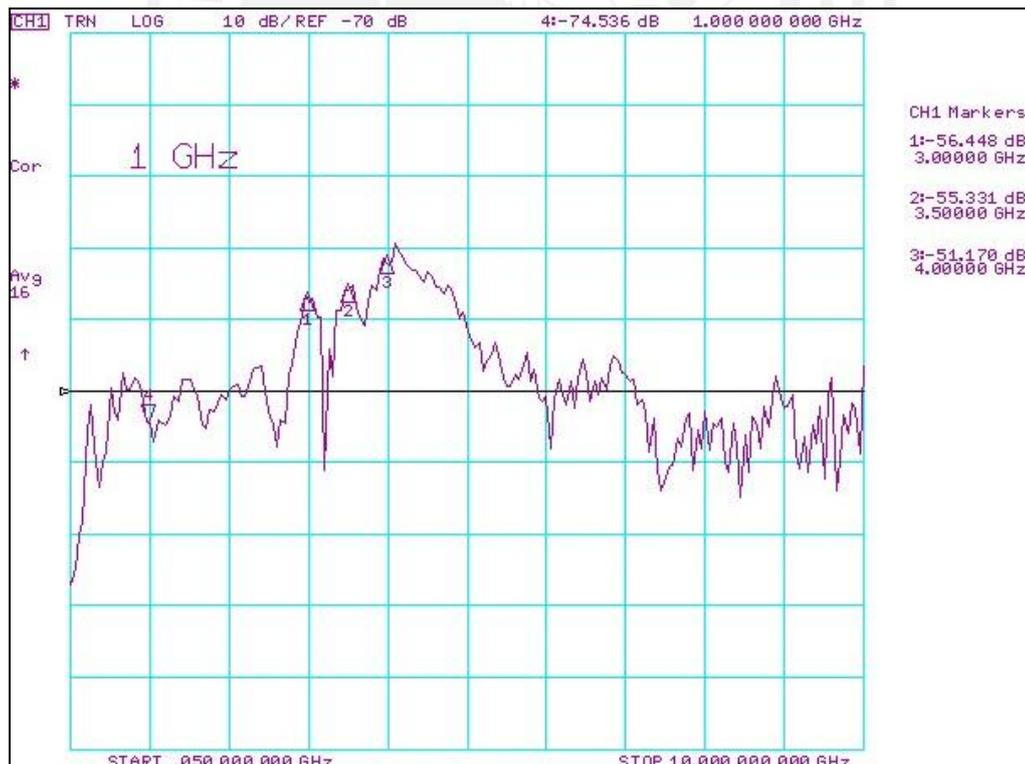


FIGURA 4-7: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ALUMINIO Y LAS ANTENAS MONOPOLO

4.5.1.4 Con la plancha de acero

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-8.

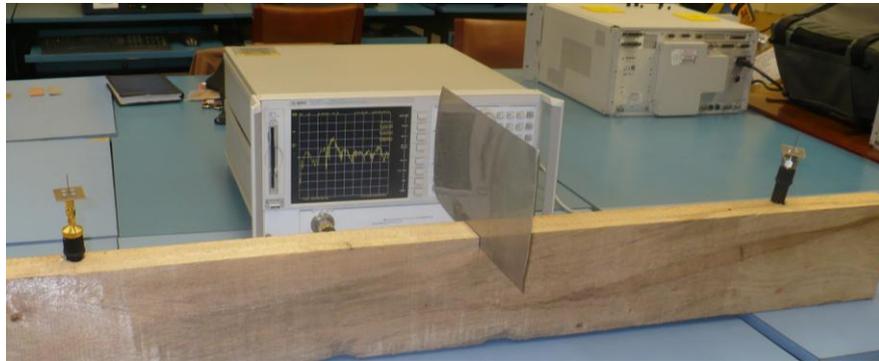


FIGURA 4-8: ANTENAS MONOPOLO CON LA PLANCHA DE ACERO

En la figura 4-9 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antenna presenta -50.267 dB.



FIGURA 4-9: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ACERO Y LAS ANTENAS MONOPOLO

4.5.2 Usando la Antena Microstrip Logarítmica

4.5.2.1 En el espacio libre

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-10.



FIGURA 4-10: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS EN EL ESPACIO LIBRE

En la figura 4-11 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -30.467 dB.



FIGURA 4-11: S_{21} EN EL ESPACIO LIBRE CON LAS ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS

4.5.2.2 Con la plancha de cobre

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-12.

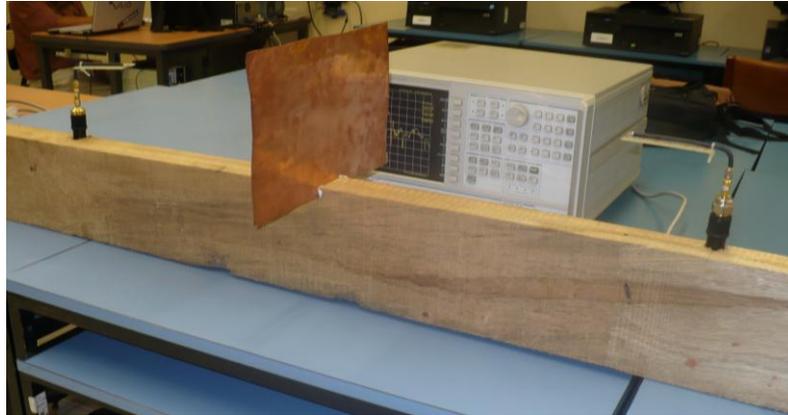


FIGURA 4-12: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CON LA PLANCHA DE COBRE

En la figura 4-13 se muestra el resultado del S_{21} y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antenna presenta -48.362 dB.

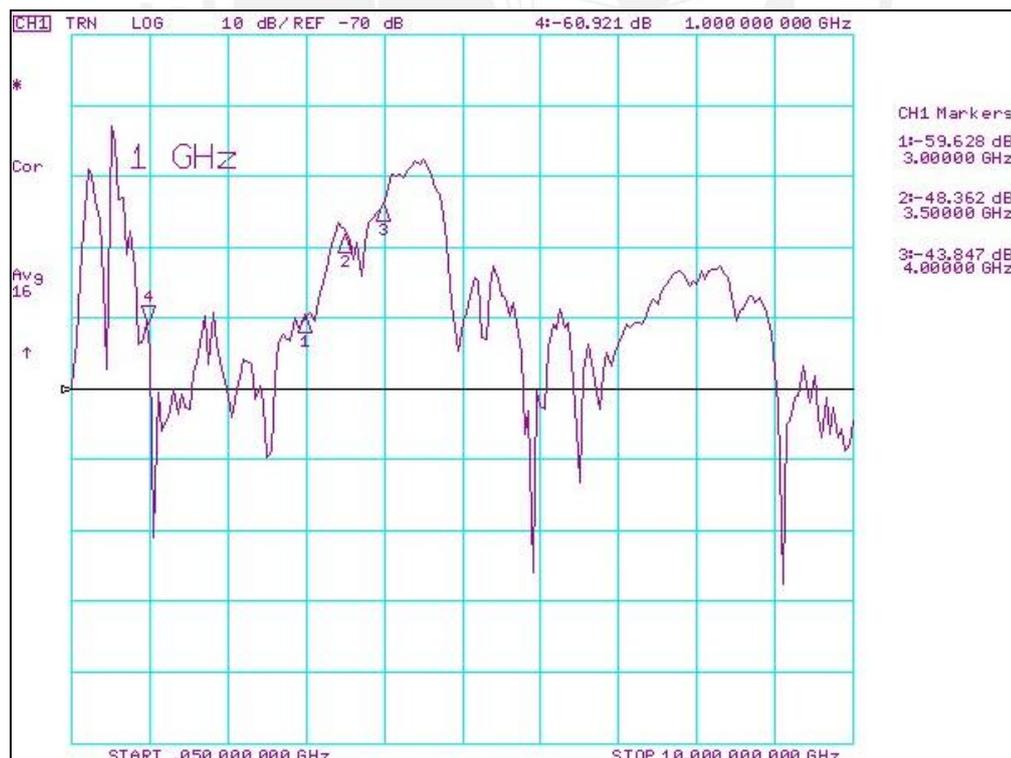


FIGURA 4-13: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE COBRE Y LAS ANTENAS MICROSTRIP

4.5.2.3 Con la plancha de aluminio

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-14.

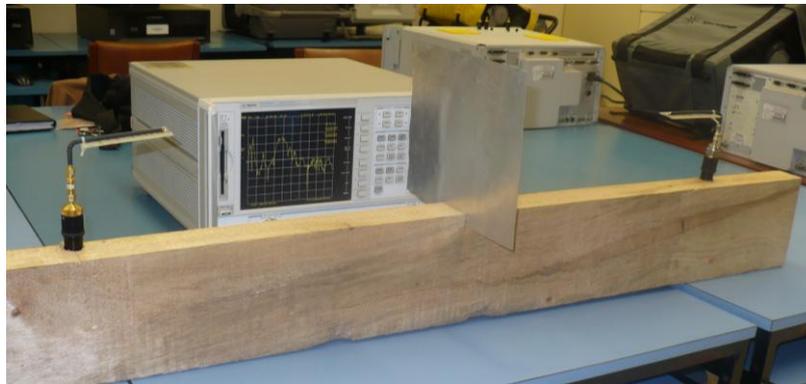


FIGURA 4-14: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CON LA PLANCHA DE ALUMINIO

En la figura 4-15 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -39.777 dB.

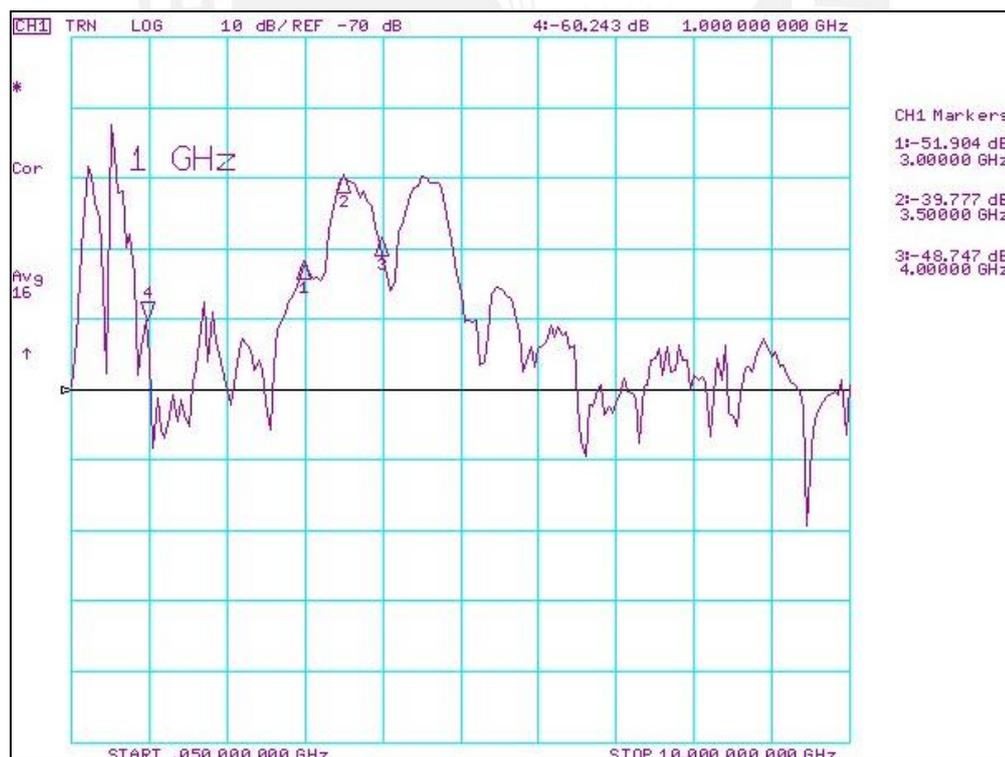


FIGURA 4-15: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ALUMINIO Y LAS ANTENAS MICROSTRIP

4.5.2.4 Con la plancha de acero

Realizamos el montaje tal y como se muestra en la figura 4-16.

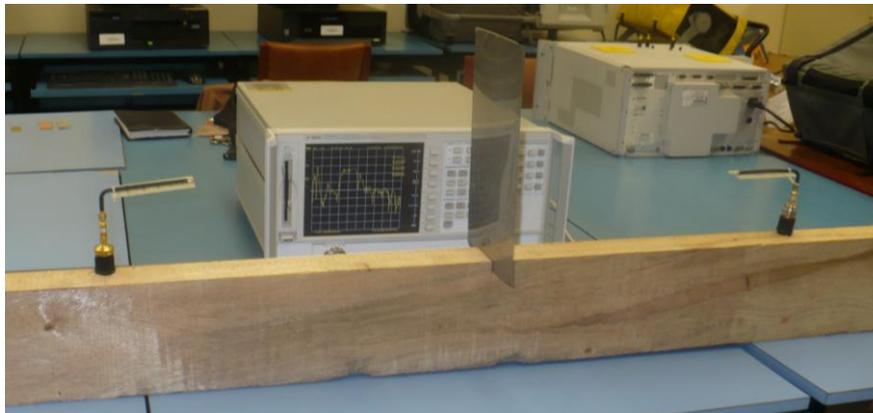


FIGURA 4-16: ANTENAS MICROSTRIP LOGARÍTMICAS CON LA PLANCHA DE ACERO

En la figura 4-17 se muestra el resultado del S_{21} medido y mediante el segundo marcador a 3.5 GHz podemos apreciar que la antena presenta -35.65 dB.

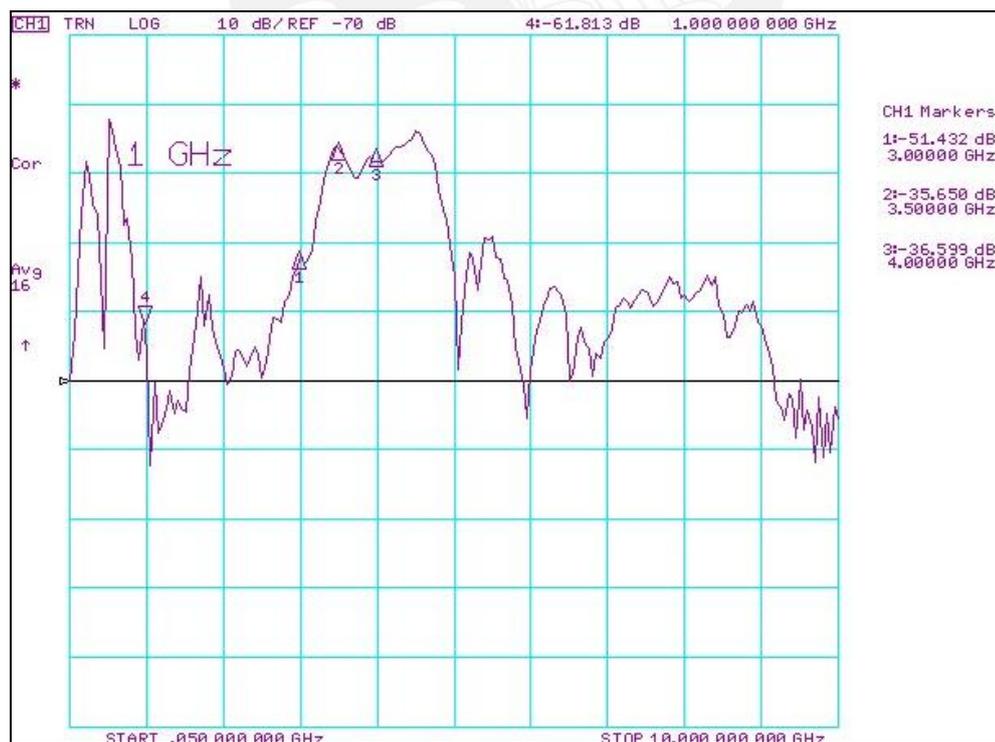


FIGURA 4-17: S_{21} ENTRE LA PLANCHA DE ACERO Y LAS ANTENAS MICROSTRIP

4.6 Presentación de Resultados

En la figura 4-18 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones con la antena monopolo usando tres tipos de materiales metálicos: Cobre, aluminio y acero. Para el cálculo de la eficiencia de apantallamiento, para cada uno de los materiales, establecemos un valor de referencia, el cual será el resultado medido en el espacio libre (S_{21}); y a partir de ello, restamos el parámetro de transmisión medido de cada material con el valor de referencia. Los resultados que se obtienen están en dB y se muestran en las figuras 4-19, 4-20 y 4-21.

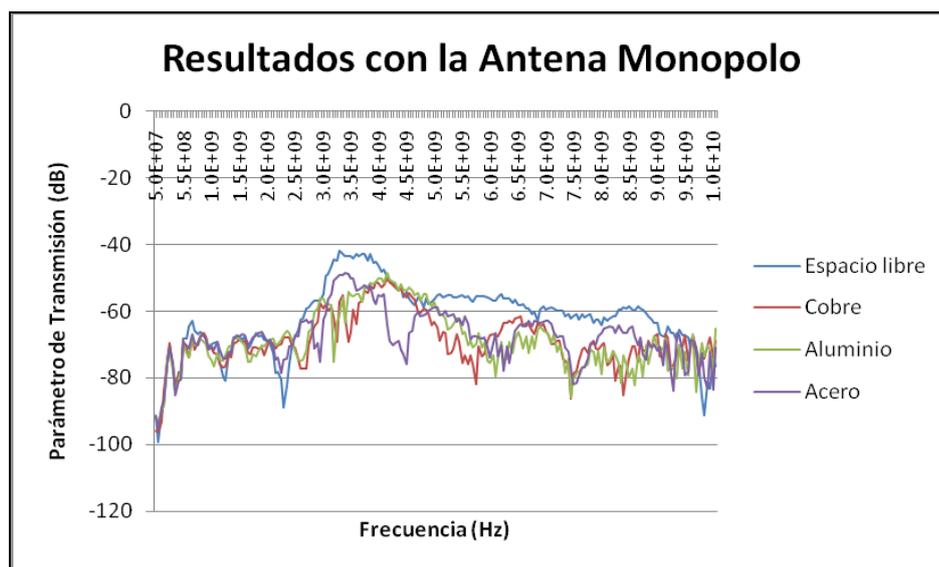


FIGURA 4-18: RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON LA ANTENA MONOPOLO

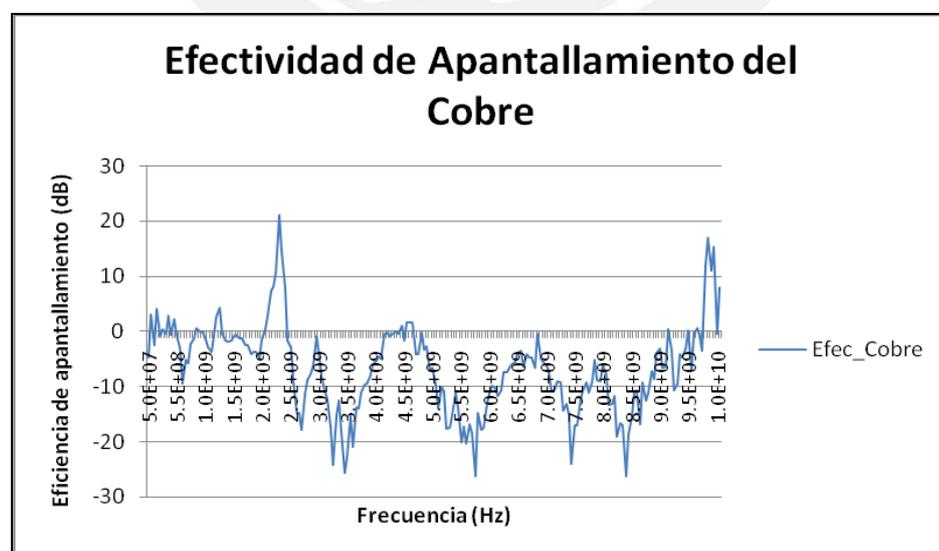


FIGURA 4-19: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL COBRE USANDO LA ANTENA MONOPOLO

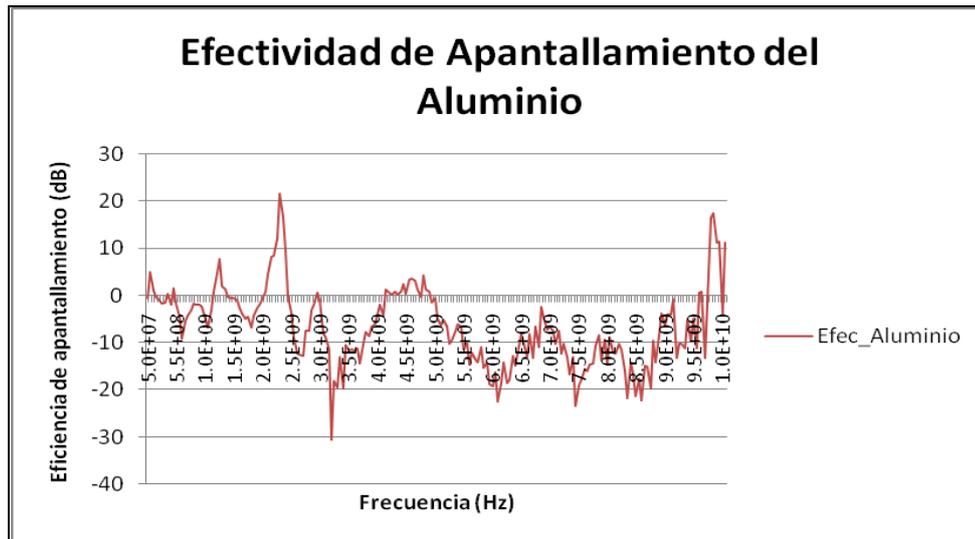


FIGURA 4-20: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ALUMINIO USANDO LA ANTENA MONOPOLO

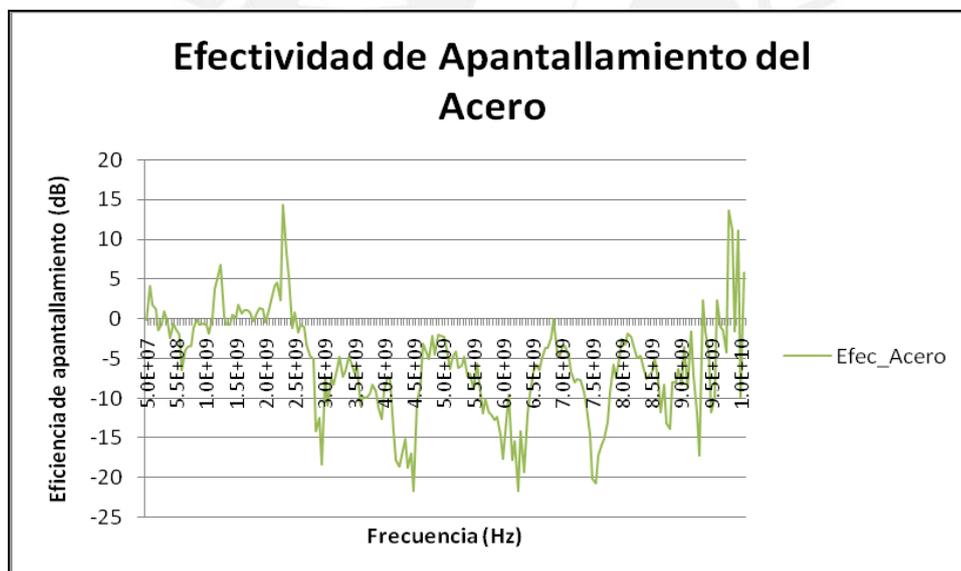


FIGURA 4-21: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ACERO USANDO LA ANTENA MONOPOLO

En la figura 4-22 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones con la antena logarítmica usando tres tipos de materiales metálicos. Cobre, aluminio y acero. La efectividad de cada material se calcula de la forma explicada anteriormente y los resultados se muestran en las figuras 4-23, 4-24 y 4-25.

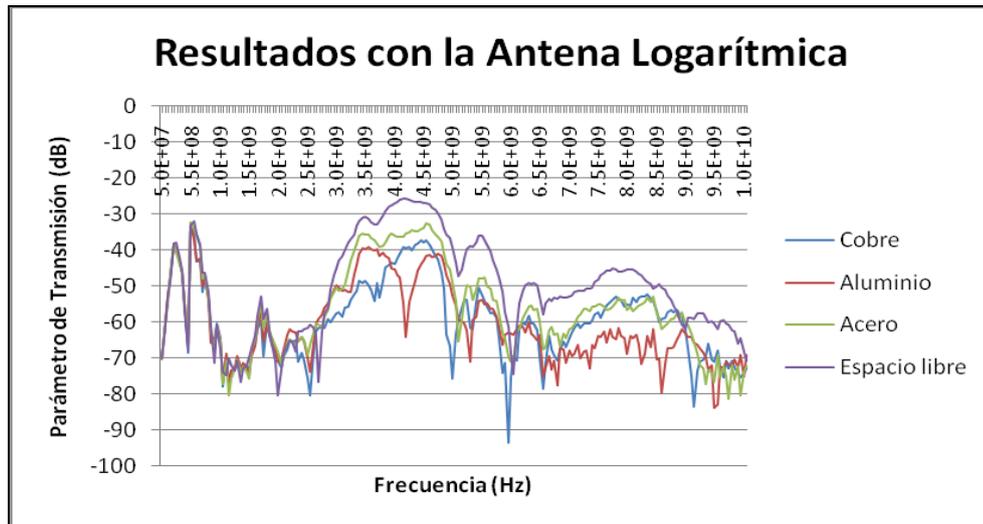


FIGURA 4-22: RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON LA ANTENA LOGARÍTMICA

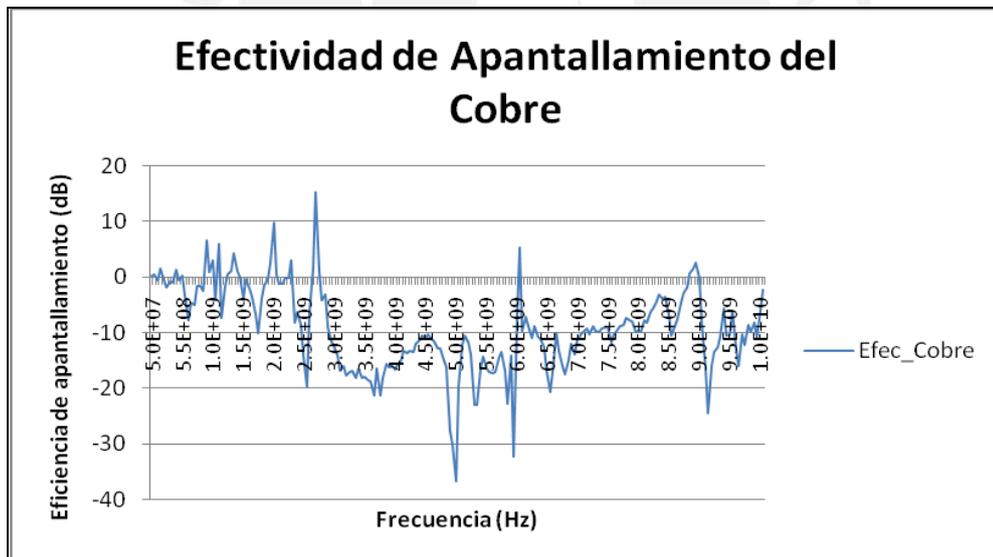


FIGURA 4-23: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL COBRE USANDO LA ANTENA LOGARÍTMICA

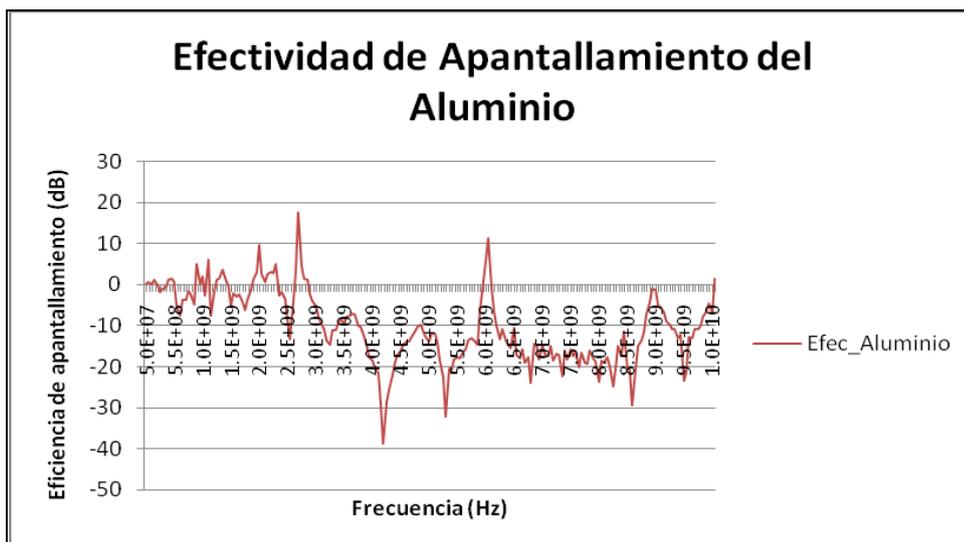


FIGURA 4-24: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ALUMINIO USANDO LA ANTENA LOGARÍTMICA

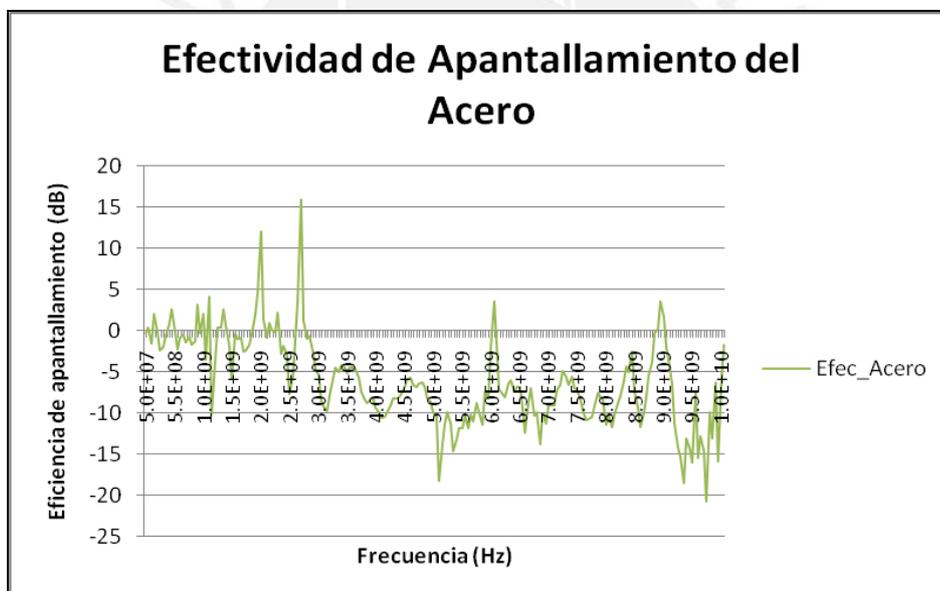


FIGURA 4-25: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DEL ACERO USANDO LA ANTENA LOGARÍTMICA

4.7 Evaluación de Resultados

Para seleccionar el material adecuado que sirva de apantallamiento hemos obtenido el comportamiento de la efectividad de los tres materiales en el rango de frecuencias de 50 MHz hasta 10 GHz. Dentro del análisis debemos considerar que la efectividad de cada material será mayor cuando más negativo sea su valor. De acuerdo a ello, en las figuras anteriores de efectividad, usando la antena monopolo y la antena logarítmica,

distinguiamos las frecuencias con mayor eficiencia los cuales se muestran en la tabla 4-2.

TABLA 4-2: FRECUENCIAS DE MAYOR EFICIENCIA DE APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES

MATERIALES	TIPO DE ANTENA	
	MONOPOLO	LOGARÍTMICA
Con el cobre	3.48, 5.72 y 8.36 GHz	4.98, 5.92 y 9.1 GHz
Con el aluminio	3.23, 6.07 y 7.41 GHz	4.18, 5.27 y 8.21 GHz
Con el acero	4.48, 6.22 y 7.51 GHz	5.07, 9.3 y 9.7 GHz

Sin embargo, lo que nos interesa es ver el comportamiento de los materiales a la frecuencia de 3.5 GHz, ya que para esa frecuencia fueron construidas las antenas. Eso lo vemos en la zona sombreada en cada una de las siguientes gráficas.

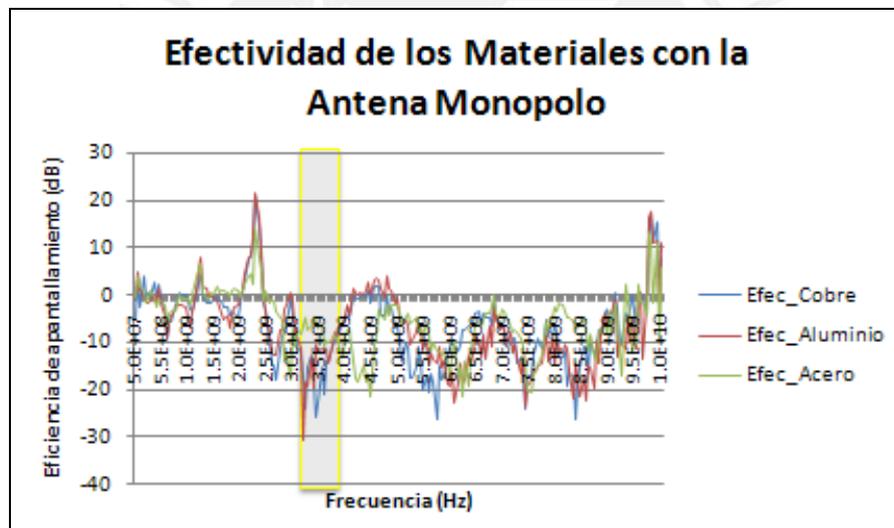


FIGURA 4-26: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES CON LA ANTENA MONOPOLO

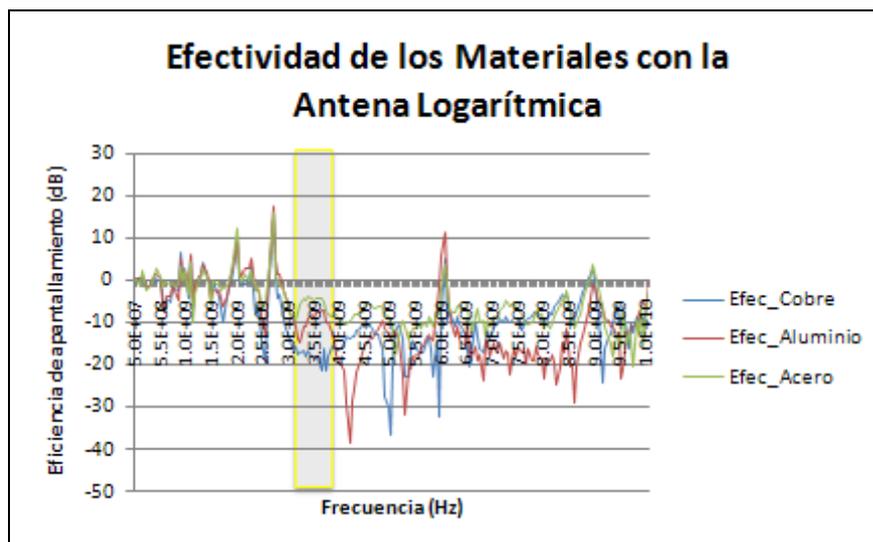


FIGURA 4-27: EFECTIVIDAD DE APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES CON LA ANTENA LOGARÍTMICA

A partir de las figuras anteriores, en la tabla 4-3 se muestran los valores de la eficiencia de apantallamiento de los materiales para la frecuencia de 3.5 GHz.

TABLA 4-3: EFICIENCIA DEL APANTALLAMIENTO DE LOS MATERIALES PARA 3.5 GHz

MATERIALES	TIPO DE ANTENA	
	MONOPOLO	LOGARÍTMICA
Con el cobre	-22.951 dB	-17.895 dB
Con el aluminio	-11.864 dB	-9.31 dB
Con el acero	-6.8 dB	-5.183 dB

De la tabla anterior podemos mencionar que el cobre posee la mayor eficiencia de apantallamiento seguido del aluminio y el acero. Por otro lado, en cuanto a las comparaciones entre los resultados de la antena omnidireccional y direccional, notamos que la segunda antena da resultados menores respecto a la primera, esto se debe a que el patrón de radiación de la antena logarítmica se dirige hacia la plancha metálica y es más estable la medición del parámetro de transmisión. Además, con la primera antena se obtuvieron mayores atenuaciones; debido a que la propagación de las ondas, dentro del laboratorio, ocasionaba reflexiones y; por eso, variaba demasiado el parámetro de transmisión.

La mayoría de los metales son buenos conductores eléctricos y para el experimento se escogió sólo a tres de ellos. La conductividad eléctrica se debe a la presencia de una banda de valencia no saturada de electrones en la estructura atómica o traslapada con

bandas superiores vacías; esto permite que los electrones de esta banda pasen fácilmente de un átomo a otro por efecto de un campo eléctrico [CUR2006]. En la tabla 4-4 se muestran los valores de conductividad para los materiales usados.

TABLA 4-4: CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES DE APANTALLAMIENTO

Fuente: "U-Cursos" [CUR2006]

METAL	CONDUCTIVIDAD (S/M) A TEMPERATURA AMBIENTE
Cobre	$6,0 \times 10^7$
Aluminio	$3,8 \times 10^7$
Acero inoxidable	$0,2 \times 10^7$

Según la tabla 4-3 y 4-4, existe una correspondencia con las mediciones y la teoría, ya que el cobre y el aluminio por ser los que poseen una mayor conductividad, presentan mayor eficiencia de apantallamiento a diferencia del acero. Esto se debe a que las ondas electromagnéticas generan en el material conductor corrientes parásitas, que a su vez producen un campo magnético alrededor del mismo, lo cual rechaza las ondas electromagnéticas de la fuente y nos permite conseguir un apantallamiento eficaz. Sin lugar a dudas el cobre es el mejor material de apantallamiento, pero es muy escaso y caro a diferencia del aluminio que es más liviano; y cada uno de estos metales posee sus propias áreas de aplicación que dependen del usuario final.

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

5.1 Conclusiones

Finalizado el presente proyecto, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- La etapa de simulación previa a la construcción de una antena microstrip es muy importante, ya que permite optimizar los recursos y mejorar el funcionamiento de la antena a ensamblarse. Para ello, es necesario contar con un buen programa de simulación que permita el diseño de estructuras en dos y tres dimensiones, brinde diferentes tipos de análisis, muestre los resultados gráficamente como en archivos de texto y posea una interfaz de fácil comprensión para el usuario.
- Existen diferencias entre los valores de la simulación y la caracterización de la antena microstrip logarítmica, debido a los siguientes factores: en el programa se configura un volumen de radiación ideal, no se consideraron las pérdidas en el cable coaxial que se utilizó para la alimentación de los elementos radiantes y las imperfecciones presentes en el ensamblaje de la antena.
- La antena microstrip logarítmica posee mayor estabilidad en las mediciones del parámetro de transmisión a diferencia de la antena monopolo, ya que con ésta oscilaban muchos los valores del parámetro de transmisión (S_{21}) debido a las reflexiones de las ondas; por ello se tuvo que utilizar el promedio para los resultados S_{21} .

- A mayor frecuencia de operación, las dimensiones físicas de la antena se van reduciendo y; por lo tanto, la construcción se dificulta porque se requiere de instrumentos o equipos con mayor precisión y tecnología.
- Se verifica que el cobre es el mejor material apantallador, seguido del aluminio y luego el acero para los campos eléctricos a 3.5 GHz. Como se mencionó en el primer capítulo, el material con mayor conductividad será el que mejor evite el acoplamiento capacitivo.

5.2 Recomendaciones

Se sugieren, a continuación, algunas recomendaciones a tener en cuenta sobre el presente proyecto:

- En el mercado nacional, los proveedores de los substratos para la fabricación de los circuitos impresos, desconocen el valor de la permitividad o constante dieléctrica que tienen los substratos. Por ello, se sugiere medir primero la permitividad del substrato para que en base a ello se realice con mayor exactitud el diseño (ver Anexo 5).
- Cuando se usa el programa HFSS tenemos varias marcas de substratos con iguales constantes dieléctricas y para obtener el resultado deseado a la frecuencia de diseño es necesario realizar la simulación con cada uno de ellos; pero de preferencia empezar por aquel substrato que posea la menor pérdida tangencial. Esto se hace porque en el mercado nacional no tenemos las marcas de substratos que aparecen en el programa.
- Al momento de soldar el cable coaxial para la alimentación de la antena microstrip, deben evitarse los restos de estaño y las protuberancias; es decir, la soldadura debe ser fina para no afectar a la radiación de los demás elementos de la antena.
- En las mediciones del parámetro de transmisión ambas antenas deben estar al mismo nivel de referencia (deben verse directamente); tratándose de adecuar la antena para que haya línea de vista hacia la otra.
- Se requiere un espesor mínimo de material, ya que para una frecuencia mayor menor debe ser su espesor. También se debe procurar que las láminas sean de una dimensión adecuada como para obstaculizar la propagación de ondas entre ambas antenas.

- El coaxial que se utiliza para la alimentación de la antena microstrip logarítmica debe ser doblado para que el conector SMA este hacia abajo y sea conectado al VNA. Esto se debe hacer con el martillo de goma porque sino se dañaría el recubrimiento del coaxial o en todo caso se puede usar un conector SMA con un codo y así se evita doblar el coaxial.
- Los resultados de las mediciones realizadas son aproximados porque, en primer lugar, en el laboratorio existían elementos que generaban ondas reflejadas; segundo, en las antenas construidas no se realizó ninguna adaptación de impedancias, aunque están cercanas a los 50Ω propios de los cables coaxiales; por último, las antenas para transmisión y recepción variaban en algunas características como en las pérdidas de retorno.

5.3 Trabajos Futuros

Se proponen a continuación diversos trabajos derivados del presente proyecto:

- Medir los parámetros de transmisión usando materiales prácticos para la implementación como: Pinturas conductoras, tejidos conductores, polímeros, etc. Y analizar el comportamiento físico e incluso químico en el caso de las pinturas.
- Realizar las mediciones al aire libre para tener mayor exactitud en los resultados considerando las posibles fuentes de interferencia en el ambiente electromagnético. Además, las mediciones se pueden realizar a diferentes distancias.
- Realizar un estudio de apantallamiento en las bandas de frecuencias de los servicios de comunicaciones personales o en bandas donde hayan servicios con posibles casos de interferencia; por ejemplo en 2.4 GHz.
- Diseñar e implementar una estructura para el apantallamiento de un equipo o de un recinto dependiendo de la frecuencia; por ejemplo, tejidos que sirven para aminorar las radiaciones hacia las personas o para aislar un lugar de las señales de radiofrecuencia, etc.

Bibliografía

- [APO2007] APONTE GUILLERMO, ESCOBAR ADOLFO, PINEDO CARLOS, ARIZABALETA GISELA. “Medición de Campos Electromagnéticos en la Ciudad de Cali, Colombia”. Información Tecnológica. 2007.
- [JUN2008] JUNG-SIM ROH, YONG-SEUNG CHI, TAE JIN KANG, SANG-WOOK NAM. “Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics”. Textile Research Journal, 78(9), pp. 825-835. 2008.
- [LEE2007] LEE, J., JANG, J., SOHN, S., LEE, S., & PARK, M. “Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Efficiency (SE) Characteristics of the ITO/Ag Multilayer Structure”. Molecular Crystals & Liquid Crystals, Vol. 470, pp.107-120. 2007.
- [MES2000] MESA, FRANCISCO. “Nociones Teóricas de Compatibilidad Electromagnética”. Universidad Politécnica de Sevilla, España. 2000.
- [ZOR2004] ZORAN, VRANIC. “A Contribution to Shielding Effectiveness Analysis of Shielded Tents”. Serbian Journal of Electrical Engineering. 2004.
- [ANT2008] Antena impresa.
URL:
<http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20081030FernandoGonzalez.pdf>
Fecha de consulta: 30-05-09
- [AST2005] Astronomos.
URL:
http://www.astronomos.cl/conocimientos/avanzado/antenas_pr%E1ctica.pdf
Fecha de consulta: 10-12-08
- [CEC2000] Comité Electrotécnico Cubano.
URL: www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/3_3.pdf
Fecha de consulta: 27-10-08
- [CRT2004] Comisión de Regulación de Comunicaciones.
URL: http://www.crt.gov.co/crt_2001-2004/documentos/biblioteca/Limites_radiacion_terminales.PDF.
Fecha de consulta: 06-10-08
- [CUR2006] U-Curso.
URL:

- https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2006/1/EL32A/1/material_docente/
Fecha de consulta: 01-07-09
- [CYP2006] Editorial Cypsela.
URL: http://www.cypsela.es/especiales/pdf213/feria_emc.pdf
Fecha de consulta: 29-09-08
- [DXZ2007] Dxzone. Calculadora para el diseño de antenas.
URL: <http://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump2.cgi?ID=16289>
Fecha de consulta: 15-05-09
- [ECE2007] Electrical and Computer Engineering. Presentación: “Parámetros de LPDA”.
URL: <http://ece.uprm.edu/~pol/ppt/LPDA.pps>
Fecha de consulta: 20-04-09
- [HIR2000] Hiru. URL: http://www.hiru.com/es/fisika/fisika_05000.html
Fecha de consulta: 02-04-09
- [ITZ2007] Itzamna. Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital.
URL:
<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/709/1/Buenrostro%20Rocha.pdf>
Fecha de consulta: 08-04-09
- [OND2005] Ondas. URL: <http://www.sc.ehu.es/sqwpolim/FISICA/Ondas.pdf>
Fecha de consulta: 08-04-09
- [PRO2007] Profeblog.
URL: <http://profeblog.es/rafa/wp-content/uploads/2007/03/ondas-3-05.pdf>
Fecha de consulta: 15-04-09
- [UCO2004] Universidad de Córdoba. Presentación: “Lista-de-Referencias-Apantallamiento-AST-2004”.
URL:
<http://www.uco.es/organiza/centros/eps/foro/documentos/Conferencias/AST/Apantallamientos/Lista-de-Referencias-Apantallamiento-A.S.T.2004.pdf>
Fecha de consulta: 03-12-08
- [UCO2007] Universidad de Córdoba. Presentación: “Tempest-castellano”.

URL:

<http://www.uco.es/organiza/centros/eps/foro/documentos/Conferencias/AST/Apantallamientos/Tempest-castellano.pdf>

Fecha de consulta: 22-10-08

[URE2004] Urel. Department of Radio Electronics.

URL:

<http://www.urel.feec.vutbr.cz/ra2008/archive/ra2004/abstracts/116.pdf>

Fecha de consulta: 03-12-08



Anexos

ANEXO 1: PROGRAMA DE SIMULACIÓN HFSS

ANEXO 2: SIMULACIÓN DE LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA

ANEXO 3: PLANOS DE LA ANTENA MICROSTRIP LOGARÍTMICA

ANEXO 4: EQUIPOS USADOS EN EL LABORATORIO

ANEXO 5: MÉTODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA PERMITIVIDAD DEL
SUBTRATO

