

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
EN INGENIERÍA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA ANECOICA  
PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA”**

**REALIZADO POR:  
PAULINA PATRICIA BRITO FLORES  
MÓNICA PATRICIA LÓPEZ CAMPOS**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2006**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado: “Diseño y Construcción de una Cámara Anecoica para la Facultad de Ingeniería Electrónica”. Ha sido realizado en su totalidad por las señoritas Paulina Patricia Brito Flores con CI: 1718073990 y Mónica Patricia López Campos con CI: 1717536633, bajo nuestra dirección.

---

Ing. Fabián Sáenz. MSc.

**DIRECTOR**

---

Ing. Rubén León. MSc.

**CODIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios, por darnos la fortaleza necesaria y la inteligencia para poder llevar a cabo nuestro proyecto.*

*A nuestros padres, por su ayuda incondicional, el amor y el apoyo que hemos recibido de ellos es invaluable para nosotras.*

*A nuestros hermanos, por ser compañeros de vida y estar siempre dispuestos a darnos una mano, a veces hasta dejando a un lado sus propias tareas.*

*A nuestros profesores, Ing. Fabián Sáenz e Ing. Rubén León, por dirigirnos, ayudarnos y escucharnos durante todo el proyecto, sin duda alguna son personas muy dignas de ser considerados amigos.*

*A la Ing. Anita Proaño, por su oportuna colaboración pudimos sustentar nuestros conocimientos.*

*Al Ing. Santiago Fajardo por su paciencia y colaboración, no solo nos acogió en su empresa sino que supo guiarnos con sus conocimientos y experiencia.*

*Al decano de nuestra querida facultad Tcrn. Ing. Xavier Martínez por su labor para conseguir parte de los recursos necesarios para nuestro proyecto de investigación.*

*A todos nuestros profesores que por sus consejos y compañía durante el desarrollo del proyecto se convirtieron en nuestros amigos; ustedes supieron guiarnos a lo largo de la carrera.*

*A nuestros compañeros y amigos, quienes de una u otra forma colaboraron o participaron en la realización de este proyecto.*

*A todas las personas que depositaron su confianza en nosotras, de todo corazón, MUCHAS GRACIAS.*

*Paulina y Mónica.*

## DEDICATORIA

*Lo que ayer fue una utopía hoy es una realidad. Este proyecto de grado marca una parte de nuestras vidas y comienzo de una nueva etapa, por esto se lo dedicamos a Dios, quien nos dio la fe, fortaleza, salud y esperanza para terminar este proyecto.*

*Dedicamos este trabajo a nuestras familias; especialmente a nuestros padres que siempre nos han brindado su apoyo y ayuda; estuvieron presentes en todos los momentos de nuestras vidas para guiarnos con amor incondicional y sacrificio, los cuales han sido la clave de todos nuestros logros y nos han motivado para seguir adelante. Su ejemplo de vida nos ha formado para enfrentar las adversidades, por ellos hemos aprendido a enfrentar la vida de mejor manera.*

*A nuestros hermanos porque siempre han estado dispuestos a ayudarnos y quienes constantemente nos han motivado para dar lo mejor de nosotras y ser un ejemplo en sus vidas. A nuestros familiares, quienes con su paciencia, ejemplo y generosidad han contribuido con nuestra formación.*

*Dedicamos también este trabajo a todas las personas que colaboraron directa o indirectamente en el desarrollo y culminación de este trabajo. A nuestros amigos, compañeros y profesores, quienes nunca dudaron que alcanzaríamos nuestra meta.*

*Paulina y Mónica*

## PRÓLOGO

La demanda de los equipos eléctricos y electrónicos que ha generado el adelanto tecnológico presenta un inconveniente, irradiar de forma intencional o no cantidades variables de energía electromagnética alrededor de su espacio circundante. Lo que conlleva a que la interacción de estos equipos produzca interferencia electromagnética, cuyas consecuencias son: mal funcionamiento, perturbaciones en las comunicaciones y riesgo para la salud.

Al ser las antenas parte fundamental y uno de los componentes más críticos de un sistema de comunicaciones, es importante que se conozcan las técnicas de medida de los parámetros de la antena, y que se tenga la certeza de que una vez aplicadas estas técnicas, las antenas trabajaran exactamente bajo dichos parámetros.

El lugar mas adecuado para realizar la medida de uno o varios parámetros de una antena es denominado campo abierto (OATS Open Area Test Site). Debido a la dificultad de encontrar un OATS ideal e independiente de las condiciones climáticas, existe como alternativa las cámaras anecoicas (recintos cerrados). Estas cámaras evitan las interferencias electromagnéticas externas mediante apantallamiento metálico y las reflexiones internas a través de un material absorbente de ondas electromagnéticas.

Este proyecto de grado contiene el diseño y construcción de una Cámara Anecoica para la Facultad de Ingeniería Electrónica, que trabaja en el rango de 2 a 3 GHz. del espectro radioeléctrico. El nivel de atenuación que se obtiene dentro de la cámara es de  $-40\text{dBm}$ , valor que nos garantiza que la incertidumbre de la medida está dentro de un rango aceptable.

El material absorbente de ondas electromagnéticas es inexistente en el Ecuador, por lo que se utilizó materiales locales tratados a base de carbón activado y poliestireno expandido para conseguir características de absorción.

Su finalidad es reforzar los laboratorios y afianzar los conocimientos de los estudiantes, dándoles la posibilidad de hacer prácticas con antenas y manipular los equipos disponibles del laboratorio.

Una cualidad de la cámara es que con ciertas adecuaciones se la puede utilizar para estudios de fenómenos acústicos en los cuales se requiere reducir el ruido, convirtiéndola en un laboratorio versátil.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.3 DESCRIPCIÓN .....	3
1.3.1 Definición de una Cámara Anecoica .....	3
1.3.2 Tipos de Cámaras Anecoicas.....	5
1.3.3 Equipos necesarios para la medición dentro de una Cámara Anecoica .....	7
1.3.4 Aplicaciones de las Cámaras Anecoicas .....	8
1.4 VENTAJAS DE UNA CÁMARA ANECOICA .....	10
<b>CAPÍTULO II SISTEMAS DE MEDIDAS DE ANTENAS Y CAMPOS DE MEDICIONES.....</b>	<b>12</b>
2.1 FUNDAMENTOS DE ANTENAS .....	13
2.1.1 Teoría de campos, campo lejano y cercano .....	13
2.1.2 Cálculo de Campos E y H en una Antena .....	17
2.1.3 Parámetros de una antena .....	21
2.1.4 Tipos de antenas .....	32
2.2 TIPOS DE ANTENAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO.....	33
2.2.1 Arreglo de dipolos Log periódico (LPDA Log periodic Dipole Array).....	33
2.2.2 Antena Espiral .....	38
2.2.3 Antena Horn (Corneta/Bocina).....	41
2.3 CAMPOS DE MEDIDAS DE ANTENAS .....	45
2.3.1 Emisiones radiadas .....	45
2.3.2 Susceptibilidad radiada.....	46
2.4 MEDICIÓN EN CAMPOS ABIERTOS Y CERRADOS.....	46
2.4.1 Mediciones en Campos Abiertos (OATS).....	46
2.4.2 Mediciones en Campos Cerrados .....	50
<b>CAPÍTULO III MATERIALES ABSORBENTES DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA .....</b>	<b>57</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS ELECTROMAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES.....	58
3.1.1 Materiales Dieléctricos .....	58
3.2 TIPOS DE MATERIALES.....	62
3.2.1 Sólidos .....	63
3.2.2 Líquidos .....	70
3.2.3 Gases.....	72
3.3 FORMAS DEL MATERIAL ABSORBENTE PARA MICROONDAS .....	72

3.3.1	Absorbente Piramidal .....	72
3.3.2	Cono Absorbente .....	76
3.3.3	Absorbentes Entrelazados para Microondas.....	76
3.3.4	Absorbente Dieléctrico Multicapa.....	77
3.3.5	Absorbente Dieléctrico Híbrido .....	77
3.4	<i>FORMAS DEL MATERIAL ABSORBENTE PARA BAJAS FRECUENCIAS</i> .....	77
3.4.1	Absorbentes de Ferrita.....	78
3.4.2	Absorbentes Híbridos .....	79
3.5	<i>DETERMINACIÓN DEL MATERIAL A UTILIZAR</i> .....	79
3.5.1	Elección del polímero .....	80
3.5.2	Elección de la pintura .....	81
3.5.3	Elección del componente de impregnación .....	82
3.5.4	Pruebas en el material.....	87
<b>CAPÍTULO IV CRITERIOS DE DISEÑO DE UNA CÁMARA ANECOICA.....</b>		<b>93</b>
4.1	<i>PARÁMETROS DE DISEÑO</i> .....	94
4.1.1	Diseño de una Cámara Anecoica Rectangular .....	94
4.1.2	Funcionamiento de la Cámara .....	95
4.2	<i>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO CON EL MÉTODO DEL TRAZADO DE RAYOS</i> .....	96
4.2.1	Técnica de las Imágenes .....	98
4.2.2	Trayectoria de los rayos.....	102
4.3	<i>CONSIDERACIONES DE DISEÑO</i> .....	103
4.3.1	Tamaño Básico de la Cámara .....	103
4.3.2	Rango de elevación de las antenas .....	105
4.4	<i>DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS ABSORBENTES</i> .....	107
4.4.1	Requerimientos del Absorbente.....	107
4.4.2	Diseño de las Pirámides.....	109
4.4.3	Determinación del área especular.....	114
4.5	<i>CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA</i> .....	120
4.5.1	Proceso de Tratamiento del Material.....	121
4.5.2	Construcción de la Jaula de Faraday .....	127
<b>CAPÍTULO V ADQUISICIÓN DE DATOS EN LA CÁMARA ANECOICA.....</b>		<b>139</b>
5.1	<i>SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y POSICIONAMIENTO</i> .....	140
5.2	<i>PRUEBAS EN EL ESPACIO LIBRE OATS</i> .....	142
5.3	<i>PRUEBAS EN LA CÁMARA ANECOICA DE LA FIE</i> .....	149
5.3.1	Determinación de la Antena Patrón.....	156
5.4	<i>COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</i> .....	156
5.5	<i>OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN</i> .....	157
<b>CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>159</b>
6.1	<i>CONCLUSIONES</i> .....	159
6.2	<i>RECOMENDACIONES</i> .....	161



<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>164</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>166</b>
<i>ANEXO 1 INFORME DE RESULTADOS DE LA PINTURA A BASE DE ÓLEO.....</i>	<i>166</i>
<i>ANEXO 2 INFORME DE RESULTADOS DE LA PINTURA TIPO LÁTEX .....</i>	<i>168</i>
<i>ANEXO 3 CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA LPD - 118/A.....</i>	<i>170</i>
<i>ANEXO 4 CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA CBS - 218/A.....</i>	<i>172</i>
<i>ANEXO 5 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA CBS – 218/A PARA 2GHz</i> .....	<i>174</i>
<i>ANEXO 6 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA CBS – 218/A PARA 3GHz</i> .....	<i>176</i>
<i>ANEXO 7 CÓDIGO DEL PROGRAMA PARA OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.....</i>	<i>178</i>
<i>ANEXO 8 CARACTERÍSTICAS PARA LA ADQUISICIÓN DE UNA ANTENA TIPO BOCINA.....</i>	<i>181</i>
<i>ANEXO 9 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO .....</i>	<i>183</i>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>186</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>191</b>

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

Existen diversos componentes dentro de un sistema de comunicaciones tales como: circuitos de microonda, antenas, entre otros. Siendo las antenas parte fundamental y uno de los componentes más críticos del sistema, por ende, un buen diseño de una antena puede ablandar los requerimientos de un sistema y mejorar su desempeño. Para el diseño y construcción, al igual que para la adquisición de una antena, es importante que se conozcan los parámetros que tiene la antena y bajo que técnicas de medida fueron obtenidos, a fin de que estas técnicas corroboren que la antena trabajará exactamente bajo dichos parámetros.

El lugar más propicio para realizar la medida de uno o varios parámetros de una antena o de un circuito de microonda es denominado campo abierto ideal, cuya sigla en inglés es OATS (Open Area Test Site). Este sitio, de acuerdo con la norma ANSI C63.4-1992, es un lugar abierto, se caracteriza por ser de superficie plana, de terreno nivelado y limpio, que debe estar libre de interferencias y obstáculos, con excepción de los que se requieren para realizar la medida. A pesar de que estas clásicas instalaciones de ensayo al aire libre OATS sean todavía una referencia de precisión de las medidas para un buen número de normas internacionales, sufren un problema endémico: las interferencias.

Debido a la dificultad de encontrar una zona libre de interferencias e independiente de las condiciones climáticas, aparecen para solventar este problema las cámaras anecoicas, debido a que simulan con gran exactitud las condiciones de propagación en el espacio libre, evitando así las interferencias. Por esto, se dice que las cámaras anecoicas tienen una misión bidireccional: atenuar las interferencias externas para evitar su influencia en el interior mediante un apantallamiento metálico, y atenuar los campos generados en el interior, que podrían afectar la medición mediante materiales absorbentes a las ondas electromagnéticas.

La creación de un laboratorio para el análisis de interferencia, levantamiento de características S y compatibilidad electromagnética de equipos de medida de RF, proporcionará a los alumnos la ventaja de corroborar prácticamente la teoría impartida en clases, además de que será una fuente de apoyo tecnológico para la Facultad de Ingeniería Electrónica.

## 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, en nuestro país no se dispone de un mecanismo que genere un ambiente físico donde se pueda medir una señal que dependa únicamente de la fuente principal de energía electromagnética y no de otras señales interferentes. De aquí nace la importancia de construir un laboratorio que simule la propagación en el espacio libre, pero que además asegure la no existencia de interferencias. Este laboratorio es generalmente llamado “Cámara Anecoica”, el cual es recubierto de materiales absorbentes y aislantes de ondas electromagnéticas para evitar atenuaciones de la señal, y además es aislado de las señales exteriores cumpliendo las características de una Cámara de Faraday.

Conjuntamente, la FIE dispone de equipos de medida de RF, los cuales permitirán determinar características importantes de circuitos de microonda, antenas y otros. Pudiendo así realizar análisis de interferencia (EMI) y análisis de compatibilidad electromagnética (EMC).

Dados estos antecedentes, se puede deducir que nuestra Facultad esta en la capacidad de construir tal ambiente ya que dispone del espacio físico y además de los equipos de medida necesarios para este fin. Esto beneficiará a los estudiantes, los cuales podrán comprobar, mediante la práctica, la teoría impartida en clases en referencia a las materias de Antenas, Radio Enlace Analógico y Digital. Y a nuestra Universidad, ya que será la pionera en la construcción de tal laboratorio y además que la convertirá en modelo de otras Instituciones.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La implementación de un laboratorio que determine diagramas de irradiación, respuestas en frecuencia, levantamiento de características S, entre otros; de equipos de microonda, antenas y demás; dará como resultado el ahorro de gastos de desplazamiento y condiciones adecuadas de medida. Además de que acreditará si estos equipos están cumpliendo con las características específicas para lo cual fueron construidos, y que la interacción de estos equipos no producirá interferencia electromagnética, evitando así mal funcionamiento de equipos, perturbaciones en las comunicaciones y riesgos para la salud humana.

Es evidente que la construcción de la Cámara Anecoica será de gran apoyo académico para los estudiantes de la Facultad, en especial en el área de Telecomunicaciones debido a que en la FIE no hay muchos laboratorios para el desarrollo de esta especialidad. Esto dará bases importantes en el sustento de las materias impartidas en esta área, además que ayudará a los alumnos a familiarizarse con equipos que seguramente necesitarán manipular en su vida laboral.

Por lo tanto, es innegable la importancia de tener un elemento con las características antes mencionadas para los sistemas de medición de circuitos de microonda y antenas, viéndose también la necesidad de que la FIE siga actualizando sus laboratorios en beneficio de los estudiantes y el buen nombre de la ESPE.

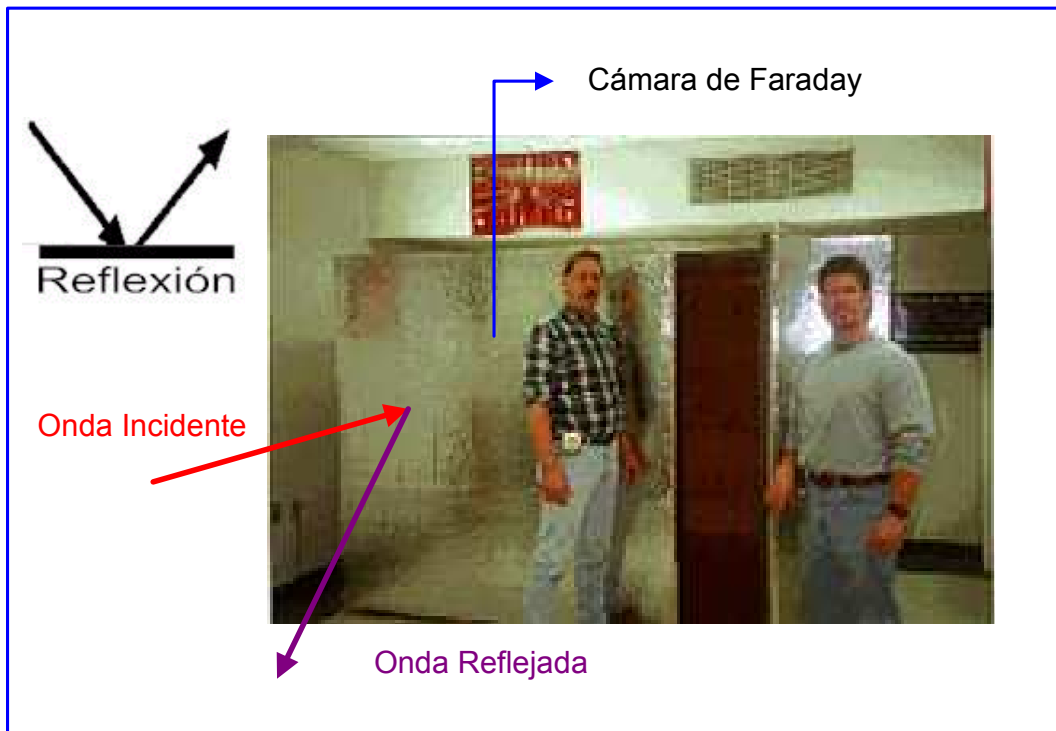
## 1.3 DESCRIPCIÓN

### 1.3.1 Definición de una Cámara Anecoica

La palabra anecoica literalmente significa “no eco”, su nombre se dio debido a que las primeras aplicaciones de estas cámaras se utilizaron para sonido, en los cuales los cuartos son forrados de materiales absorbentes de ondas sonoras. La industria Electromagnética decidió continuar con este nombre, debido a que la aplicación era casi parecida, la

diferencia radica en que se trata de absorber ondas electromagnéticas para poder obtener la señal tal y como se produce, por lo que el diseño de la cámara es diferente. Así que el concepto real sería que una Cámara Anecoica es aquel recinto que absorbe toda la energía (dependiendo el ancho de banda considerado) que incide sobre sus paredes, por lo tanto cualquier fuente energética situada en el interior debería responder como si se encontrara en el espacio libre. Esta consta de dos partes fundamentales: la envolvente faradizada y los materiales absorbentes de ondas electromagnéticas.

La base fundamental de una Cámara Anecoica es una Cámara de Faraday. Una cámara de Faraday es una estructura completamente metálica con la que se consigue una atenuación de los campos incidentes, como se puede observar en figura I.1. Este recinto faradizado se recubre interiormente de materiales absorbentes electromagnéticos para darle propiedades de absorción y convertirlo finalmente en una estructura que simula características de espacio libre, “Cámara Anecoica”.



**Figura. I.1. Cámara de Faraday**

La finalidad de los materiales absorbentes es “hacer transparentes” las paredes de la cámara a los campos electromagnéticos y evitar las posibles reflexiones indeseadas, como se puede observar en la figura I.2. Los absorbentes pueden ser de tipo ferrita, con mejores coeficientes de reflectividad a bajas frecuencias (30 – 1000MHz.) o tipo piramidal, con mejores reflectividades a altas frecuencias (1 – 40GHz.). Los materiales absorbentes tipo piramidal son generalmente fabricados de espumas (polímeros) impregnados con carbón.

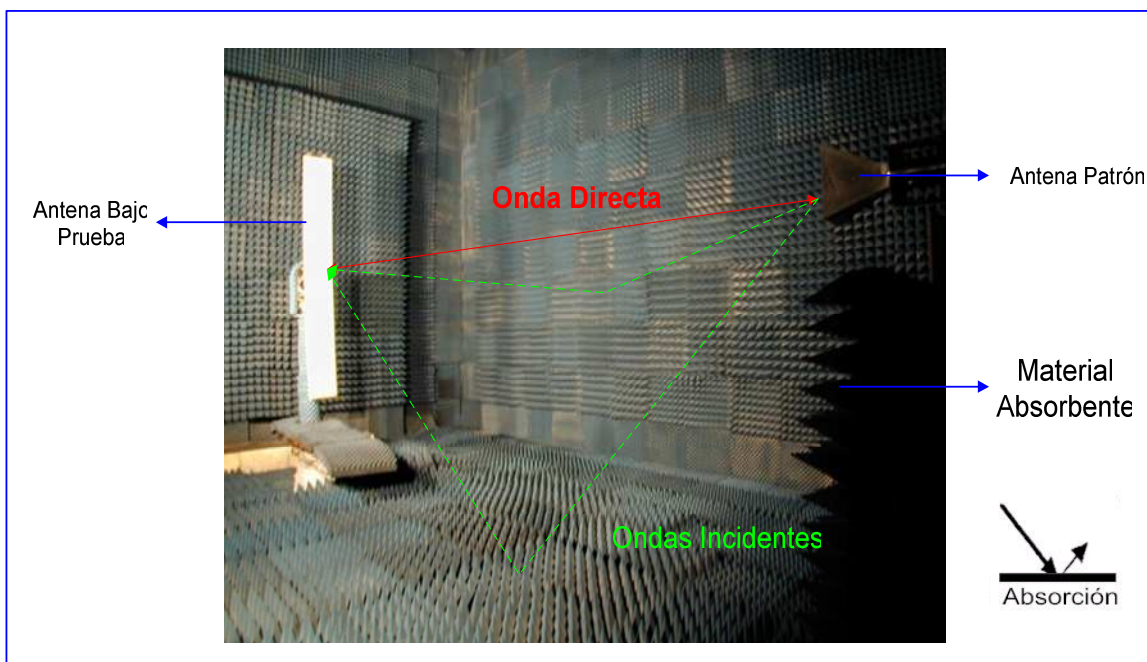
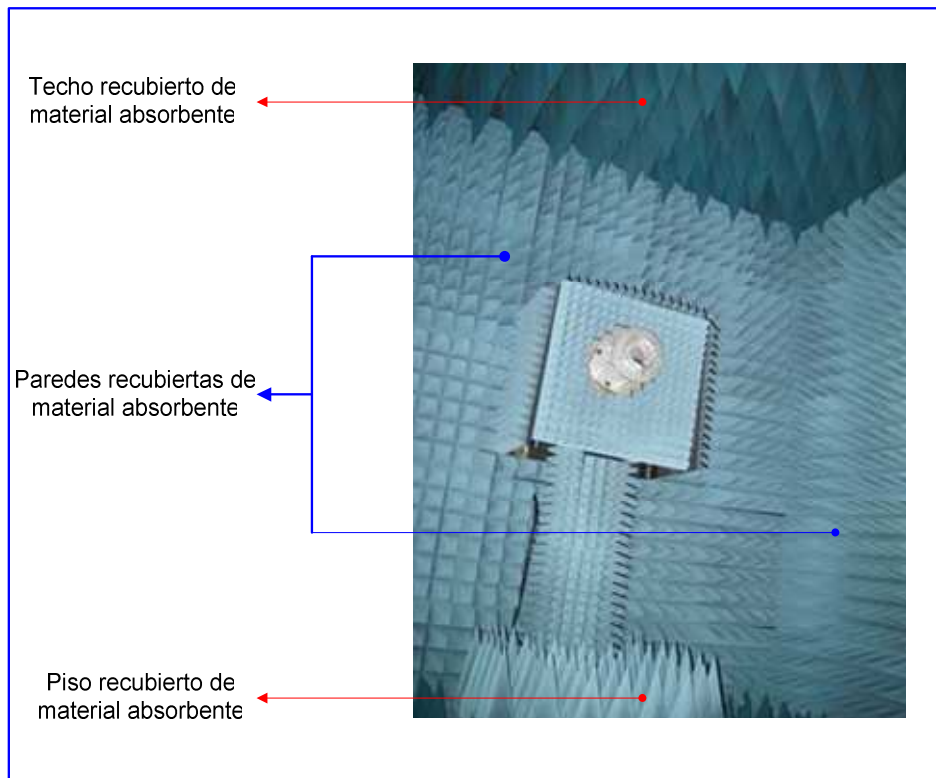


Figura. I.2. Interior de una Cámara Anecoica

### 1.3.2 Tipos de Cámaras Anecoicas

Existen dos tipos de Cámaras Anecoicas, las totalmente Anecoicas, y las Semi – Anecoicas, las cuales se diferencian por su estructura. Las primeras son totalmente recubiertas de material absorbente, es decir; las paredes, el techo y el piso están totalmente recubiertos por dicho material, como se indica en la figura I.3. Estas cámaras son fabricadas especialmente para realizar pruebas de inmunidad RF.



**Figura. I.3. Cámara Totalmente Anecoica**

Las segundas son recubiertas casi en su totalidad a excepción del piso. Están son fabricadas especialmente para realizar pruebas de emisión, donde se requiere que el piso sea conductor, como se indica en la figura I.4. Por lo que una Cámara Anecoica funcional debería poder ser totalmente Anecoica y Semi – Anecoica a la vez, para lograr este efecto, el piso debe poder ser removido fácilmente, lo que comúnmente se denomina piso falso.

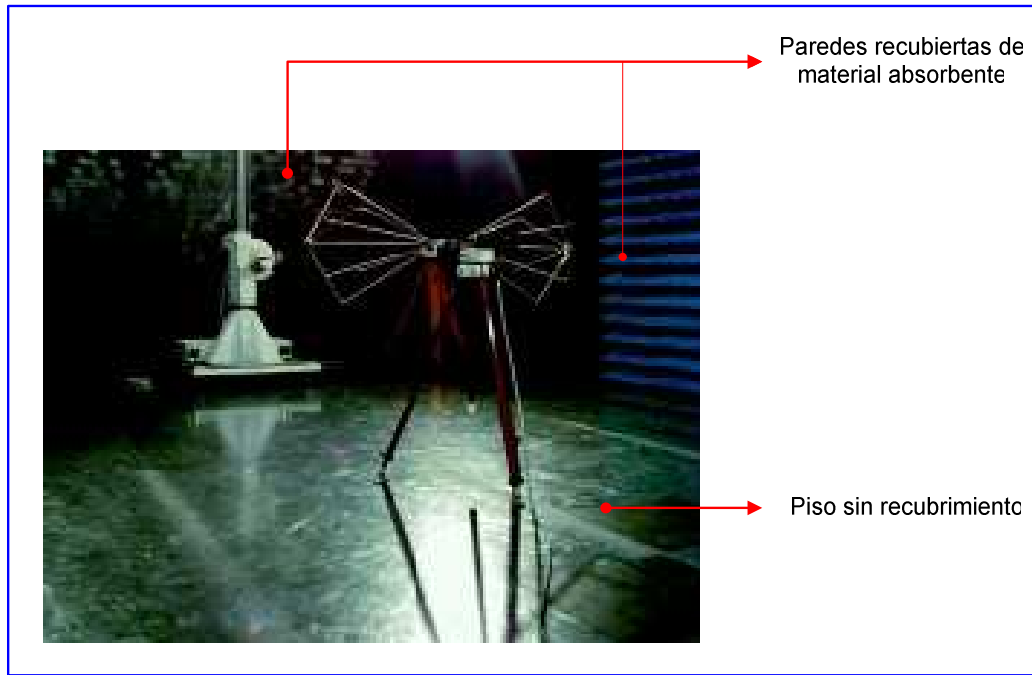


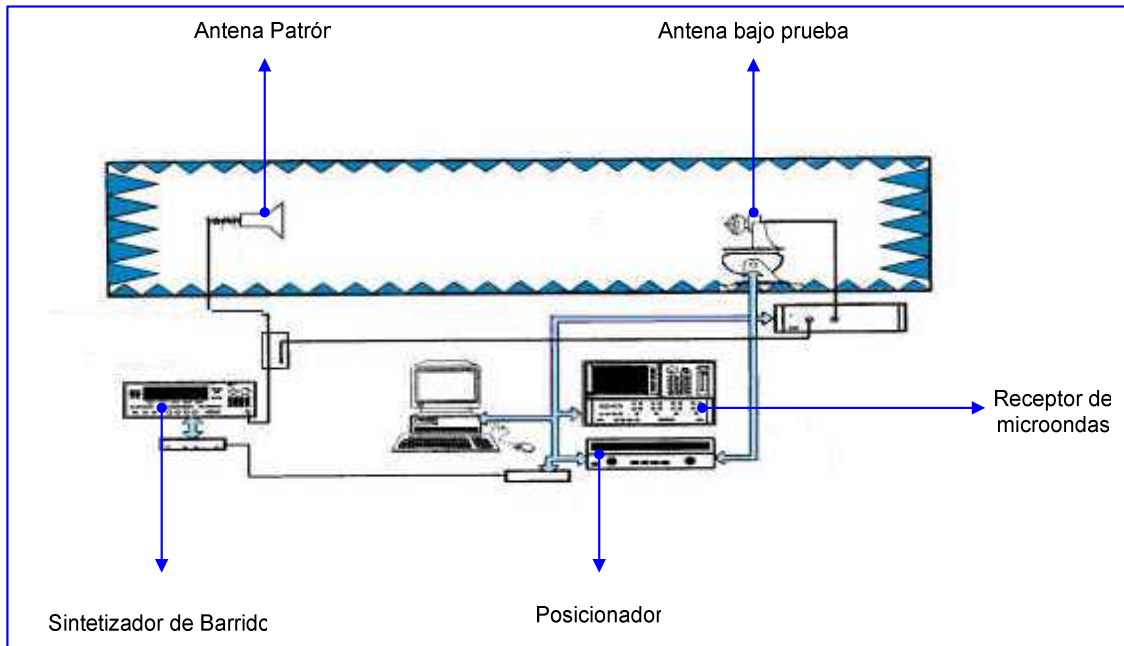
Figura. I.4. Cámara Semi – Anecoica

### 1.3.3 Equipos necesarios para la medición dentro de una Cámara Anecoica

Una Cámara Anecoica consta principalmente de dos antenas, una que será tomada como antena patrón, y otra que será tomada como antena de prueba. Estas antenas se colocan una frente a otra de manera que entre las dos se encuentren en línea de vista directa. La distancia entre las dos antenas debe cumplir la condición de campo lejano, al igual que la distancia entre las paredes, el techo y el piso con respecto a las dos antenas.

Además consta de un Sintetizador de Barrido, el cual emitirá las señales a la antena bajo prueba, un receptor de microondas, el cual captará las señales que esta recibiendo la antena bajo prueba y determinará las características de la misma, y un posicionador el cual dará movilidad a la antena en diferentes ángulos de la cámara. Estos equipos se pueden observar más claramente en la figura I.5.





**Figura. I.5. Equipos de Medición en una Cámara Anecoica**

En nuestro caso, la FIE tiene ya un equipo que incorpora al Sintetizador de Barrido y al Receptor de Microondas en uno, este equipo se denomina Analizador de Redes RF, el cual se utilizará en la construcción de la Cámara Anecoica para la Facultad. Este Analizador de Redes es de marca Agilent y de modelo 8714ET/ES. Su rango de frecuencias va desde 300 KHz a 3 GHz.

### 1.3.4 Aplicaciones de las Cámaras Anecoicas

Las Cámaras Anecoicas tienen varias aplicaciones en diferentes áreas. Dentro del área que nos compete, Telecomunicaciones, las aplicaciones que tienen son las siguientes:

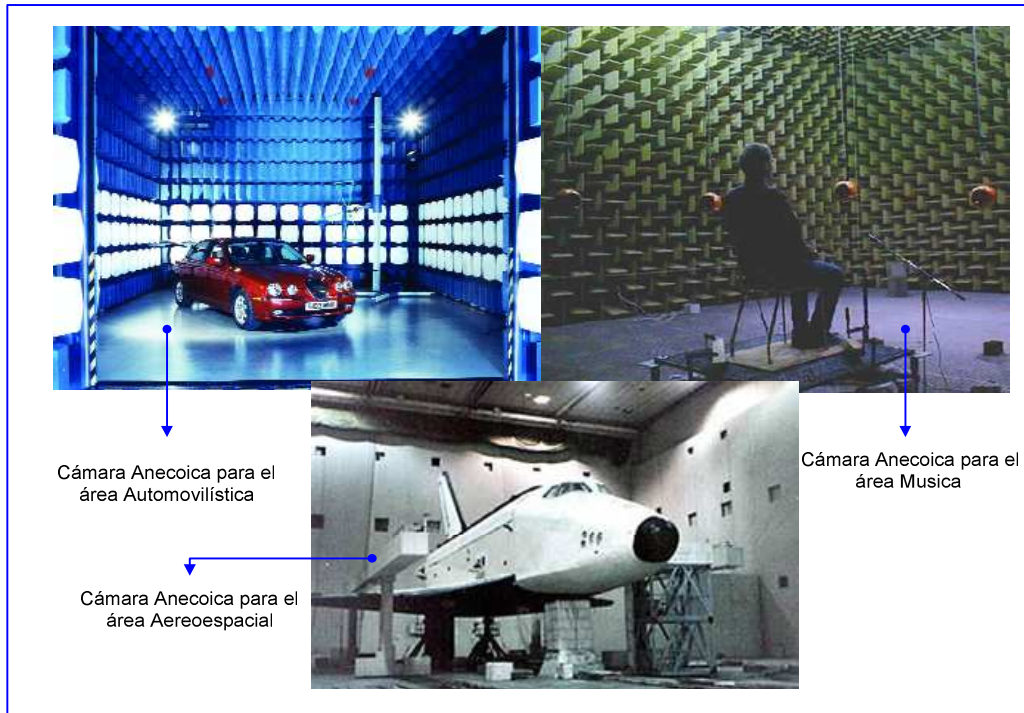
- Simulación de condiciones de propagación en el espacio libre.
- Determinación de los Diagramas de Irradiación, Ganancia, Impedancia de entrada, Respuestas en frecuencia, etc.
- Levantamiento de Características S de diferentes dispositivos.

- Análisis de Interferencia (EMI) y Análisis de Compatibilidad Electromagnética (EMC).

Existen otras zonas de aplicación, en las cuales las Cámaras Anecoicas funcionan de manera específica, y dando cumplimiento a los normas para cada una de estas áreas, por ejemplo:

- Aeroespaciales, en las que se utilizan estos tipos de Cámaras para la construcción de nuevos diseños que sean indetectables a los radares y evitar resonancia electromagnética.
- Médica, en la que se utiliza para medir el nivel de radiación de los equipos y determinar que estos niveles no afecten a los seres humanos.
- Musical, en la que utiliza para eliminar el ruido de los instrumentos y tener un nivel de sonido puro.
- Militar, para la construcción de aviones, y armas que sean indetectables a los radares y para el mejoramiento de sus equipos de radar.
- Automovilística, para determinar pruebas de inmunidad de radiación.
- Electrónica, para determinar el nivel de ruido de algunos electrodomésticos y de esta manera aplacarlos.
- Entre otros.

Algunas de estas aplicaciones se pueden observar de mejor manera en la figura I.6.



**Figura. I.6. Aplicaciones de una Cámara Anecoica en diferentes áreas**

#### 1.4 VENTAJAS DE UNA CÁMARA ANECOICA

Las ventajas que una Cámara Anecoica lleva consigo son muchas, algunas de estas ventajas las describiremos a continuación:

- Al poder obtener los diferentes parámetros de una Antena, se puede comprobar el funcionamiento de esta, de manera práctica, validando así los datos emitidos por las empresas expendedoras de estos productos. Y determinando que se encuentren en perfectas condiciones y que no emitan radiaciones perjudiciales para los demás elementos ni para los seres humanos.
- Al ser un recinto cerrado, que simula las condiciones de propagación en el espacio libre, no depende de las condiciones climáticas, aumentando así el tiempo de medición y pudiendo realizarlo en cualquier momento y sin ninguna preocupación.
- Debido a que se encuentra dentro de la Facultad ahorrará gastos de desplazamiento en busca de un lugar que se encuentre al aire libre para poder obtener condiciones de propagación aceptables.

- Por el hecho de cumplir las características de una Cámara de Faraday, evitará que penetren señales interferentes dentro del laboratorio que pudieran dar datos erróneos en la medición.
- Ya que la Cámara se encuentra recubierta por dentro de material absorbente, la señal de prueba no tendrá otras señales que vayan a atenuar la señal original.
- Como la cámara no depende de las condiciones climáticas, debido a que no se encuentra en el espacio libre, el mantenimiento de los equipos será mejorado y mayormente controlados, evitando así que estos se dañen fácilmente.
- Ayudará a que los alumnos se familiaricen con equipos nuevos, siendo esto una ventaja para su vida laboral, y que puedan comprobar mediante la práctica lo que se les dicta en clases referente a las materias de Radio Enlace Analógico y Digital, Antenas, entre otras.
- La FIE se convertirá en ejemplo de otras Instituciones que deseen realizar este tipo de laboratorios para comprobar el funcionamiento de sus equipos.

## CAPÍTULO II

### SISTEMAS DE MEDIDAS DE ANTENAS Y CAMPOS DE MEDICIONES

Algunos conocimientos sobre medidas electromagnéticas son requeridos para asegurar el diseño de una Cámara Anecoica, por lo que este capítulo tratara sobre las ondas electromagnéticas y el dispositivo para irradiar las mismas, como las antenas, por esto se realizará un breve estudio ellas.

Las ondas electromagnéticas resultan de la aceleración de cargas eléctricas. La medida de ondas electromagnéticas envuelve un gran número de dispositivos electrónicos, estos han sido clasificados como radiadores: intencionales y no intencionales. Dispositivos como Antenas corresponden a radiadores intencionales. Se presenta los campos que se generan cuando una antena comienza a radiar y en que campo se realizan las mediciones para obtener resultados fiables.

Se incluye la clasificación de las antenas según su forma. También se presentará los conocimientos básicos sobre los tipos de antenas utilizados para el proyecto de tesis. Se muestra los diagramas de radiación, para compararlos y poder ver cual de ellos es más directivo.

Los campos de medidas de las antenas son campos abiertos y cerrados, se determinará las características principales de estos sitios. Al final se podrá comparar las ventajas y desventajas de realizar mediciones en sitios abiertos y cerrados. Una Cámara Anecoica es una buena alternativa para realizar mediciones de emisiones de radiaciones de los equipos bajo prueba. Se presentará las principales pruebas que se llevan a cabo en estos sitios.

## 2.1 FUNDAMENTOS DE ANTENAS

La antena emplea el voltaje y la corriente de una línea de transmisión de los Campos Eléctrico (E) y Magnético (M) que provienen de una guía de ondas para lanzar un frente de onda electromagnético (EM) al vacío o a un medio local. La antena actúa como un transductor que permite igualar la línea de transmisión o la guía de onda al medio que rodea la antena. El proceso de lanzamiento se conoce como radiación y la antena de lanzamiento es la antena transmisora. Si una antena intercepta un frente de ondas, esta absorbe cierta cantidad de potencia de dicho frente de ondas y actúa como una antena receptora.

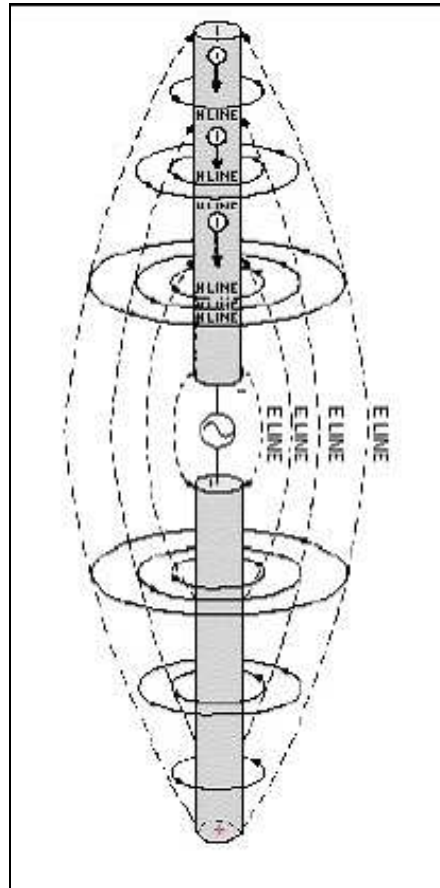
Los sistemas de Comunicaciones utilizan antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de televisión o radio, o bien transmitir o recibir señales en equipos portátiles. Actualmente el estudio de las antenas a avanzado para hacerlas más eficientes y reducir su tamaño, por otra parte, las antenas han derivado a otras aplicaciones, no sólo en el campo de las telecomunicaciones, sino también en el estudio científico como es el caso de los radiotelescopios.

Según la aplicación que se le quiera dar a la antena, el tamaño de esta estará relacionado con la banda de frecuencias para captar o transmitir la señal.

### 2.1.1 Teoría de campos, campo lejano y cercano

En términos simples, y sin ecuaciones matemáticas, se puede decir que el fenómeno de radiación es una consecuencia del movimiento acelerado de partículas cargadas. Es decir, al tener partículas cargadas eléctricamente que experimentan aceleración, se produce un campo eléctrico y magnético que se propaga en el espacio. Por eso, al tener corrientes que varían en el tiempo en un conductor, este conductor comienza a radiar.

En la figura II.1, se muestra uno de los tipos más básicos de antena, llamado dipolo simple. Al tener una fuente que es variable en el tiempo, resulta un movimiento de electrones a lo largo de la antena hacia uno y otro lado, lo cual genera campos eléctricos y magnéticos inducidos por este movimiento.



**Figura II.1. Antena dipolo con líneas de campo E y H**

Los campos radiados, asociados con la antena, cambian con la distancia y son asociados con dos tipos de energía: energía radiada y energía reactiva (o de inducción). Por otro lado, el espacio alrededor de la antena puede ser dividido en tres regiones:

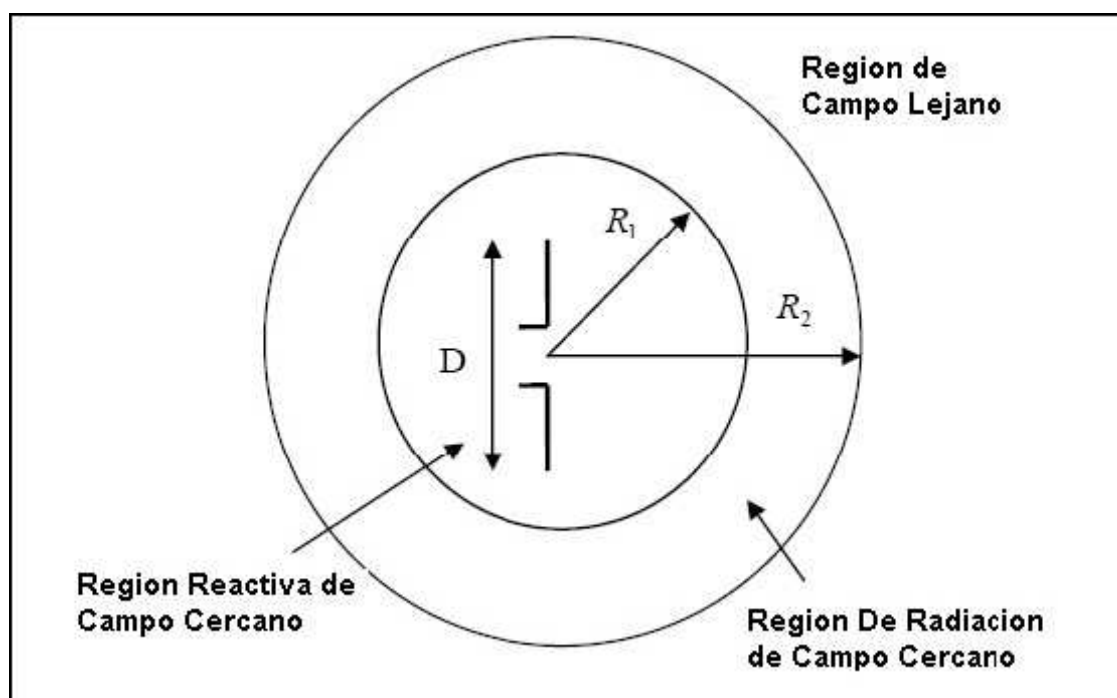


Figura II.2. Región de campos alrededor de la antena

Las tres regiones asociadas a los campos, mostradas en la figura II.2 son:

**2.1.1.1 Región reactiva de campo cercano.** Aquí, el campo reactivo es el dominante, la energía reactiva va y vuelve de la antena, esto aparece como reactancia. En esta región, la energía no es disipada, sino es energía que permanece guardada. 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.

Se toma esta región para distancias hasta  $R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ , donde  $R_1$  es la distancia desde la superficie de la antena,  $D$  es la dimensión del largo de la antena y  $\lambda$  es la longitud de onda. La longitud de onda, en una onda electromagnética, está dada por  $\lambda = c/f$ , donde  $c = 3 \times 10^8 [m/s]$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $f$  es la frecuencia de la onda.

**2.1.1.2 Región de radiación de campo cercano (Región de Fresnel).** Esta región se ubica entre la región reactiva de campo cercano y la región de campo lejano. El campo reactivo en esta región es pequeño y el campo radiado decrece rápidamente en función de la



distancia de la antena. Esta región se considera hasta aproximadamente una distancia  $R_2 = 2D^2/\lambda$  desde la superficie de la antena.

**2.1.1.3 Región de campo lejano (Región de Fraunhofer).** En esta región los campos reactivos ya han desaparecido y sólo quedan los campos de radiación. Estos campos de radiación decrecen en forma proporcional a la distancia, a diferencia de los campos reactivos que decrecen en forma proporcional al cuadrado o al cubo de la distancia desde la antena. La región de campo lejano se considera a partir de una distancia desde la antena  $R_3 = 2D^2/\lambda$ . El campo lejano se estudia como solución de onda plana, 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.

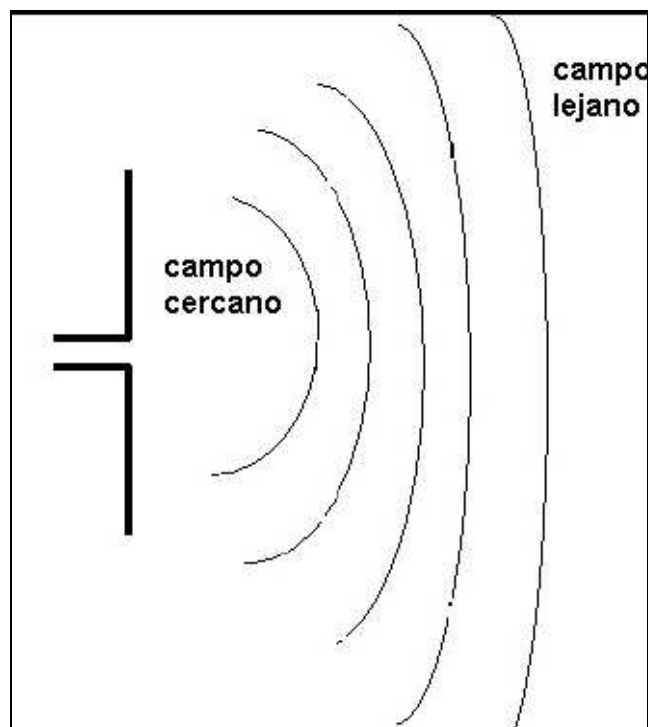


Figura II.3. Campo lejano como onda plana

## 2.1.2 Cálculo de Campos E y H en una Antena

Para calcular los campos magnético y eléctrico de una antena es necesario tener claro los conceptos básicos de la teoría electromagnética. A continuación se muestra un breve repaso de electromagnetismo.

**2.1.2.1 Ecuaciones de Maxwell.** Las primeras investigaciones en torno a los fenómenos eléctricos y magnéticos fueron realizadas por científicos Michael Faraday, André Marie Ampère y Carl Friedrich Gauss entre otros. Sin embargo, el escocés James Clerk Maxwell fue quien les dio forma cuantitativa y matemática a las explicaciones de estos científicos con una poderosa síntesis, las que hoy se conocen como Ecuaciones de Maxwell.

Ley de Ampere:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Ley de Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Ley de Gauss:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Donde las dos primeras ecuaciones provienen de forma experimental y las dos últimas están relacionadas con la constitución de los medios.

Hasta aquí se supone medios homogéneos e isotrópicos, es decir, que las ecuaciones físicas no cambian ante rotaciones ni traslaciones.

**2.1.2.2 Postulados del E.M.** Junto con las leyes de Maxwell, hay dos postulados importantes del electromagnetismo, la llamada ley de fuerza de Lorentz y el principio de conservación de carga eléctrica:

Ley de fuerza de Lorentz:

$$F = q \cdot \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$$

Conservación de carga:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

**2.1.2.3 Ecuaciones de Onda.** Tratando adecuadamente las ecuaciones de Maxwell junto a los postulados del electromagnetismo ya vistos y haciendo uso de álgebra vectorial, se obtienen las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético. Estas fórmulas se pueden encontrar como ecuaciones de Helmholtz.

Campo Eléctrico:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = j \omega \mu \vec{J} + \nabla \left( \frac{\rho}{\epsilon} \right)$$

Campo Magnético:

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = -\nabla \times \vec{J}$$

**2.1.2.4 Fórmula de transmisión de Friis.** Cuando una antena se utiliza para recibir potencia (en lugar de transmitirla) es necesario conocer la cantidad de potencia que puede captar. Para ello, se utiliza un parámetro característico llamado **área efectiva**, el cual permite calcular la potencia recibida en términos de la densidad de flujo de potencia alrededor de la antena:

$$P_R = A_{ef} |\vec{S}|$$

Donde:

$P_R$  Potencia recibida

$A_{ef}$  Área efectiva

$|S|$  Densidad de flujo de potencia

Para cualquier tipo de antena el área efectiva y la función de ganancia están relacionadas mediante la expresión:

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta, \phi)$$

Lo que demuestra que el área efectiva de una antena depende de su posición respecto a la dirección del flujo de la energía que recibe. La ganancia y el área efectiva de un tipo específico de antena se pueden medir experimentalmente. Para ello es necesario transmitir y recibir con dos antenas idénticas (del tipo que se desea caracterizar) y utilizar la fórmula de Friis.

La fórmula de Friis relaciona la potencia recibida por una antena con la potencia radiada por otra antena, considerando sus áreas efectivas ( $A_{ef1}$  y  $A_{ef2}$ ), la distancia entre ellas ( $r$ ) y la longitud de onda de operación ( $\lambda$ ):

$$P_R = P_T \frac{A_{ef1} A_{ef2}}{\lambda^2 r^2}$$

Cuando se usan antenas iguales para transmitir y recibir, el área efectiva de ambas antenas es igual  $A_{ef1} = A_{ef2}$ , por lo que la fórmula de Friis se reduce a:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{A_{ef}^2}{\lambda^2 r^2}$$

De tal manera que si fuera posible medir la potencia transmitida y recibida, entonces podemos calcular el área efectiva y la ganancia de la antena:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef} = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_R}{P_T}}$$

Donde:

$G$  Ganancia de la antena

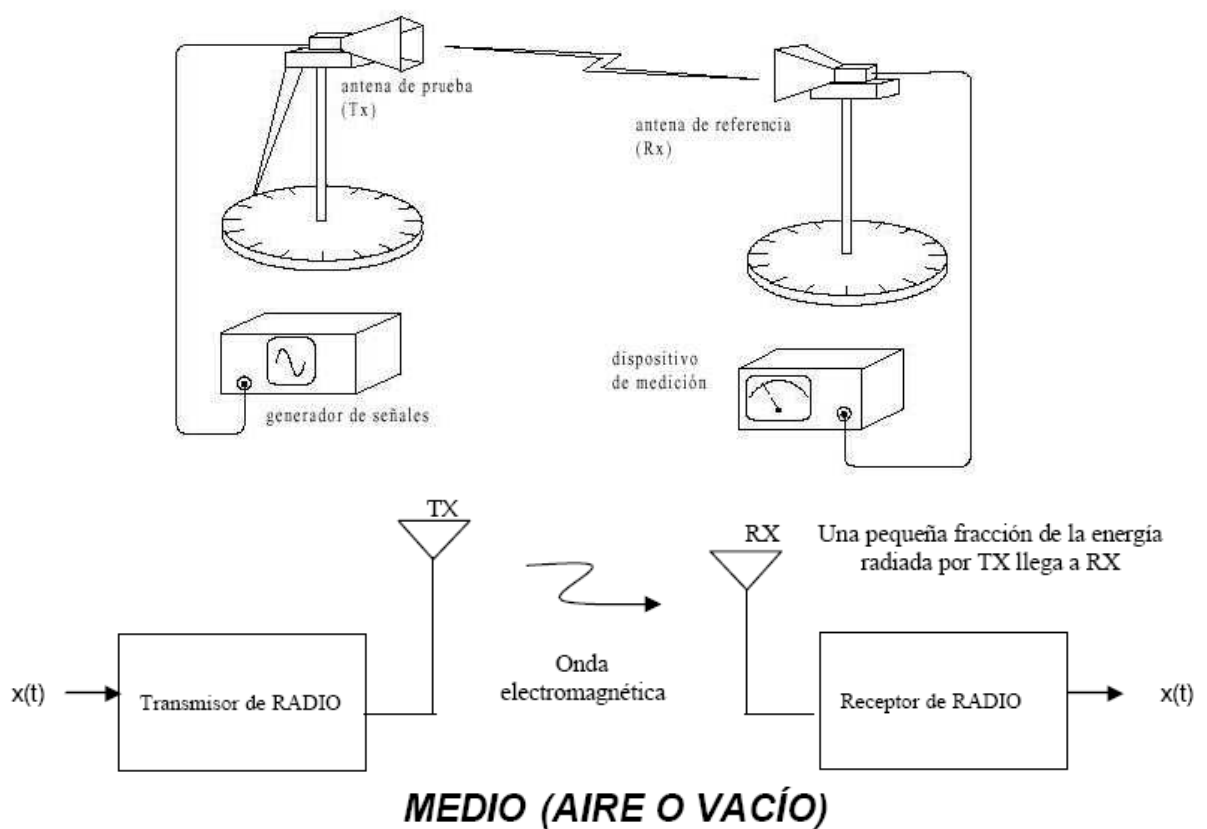


Figura II.4. Conexiones para estudio de las antenas

Se define pérdida básica de propagación entre antenas isotrópicas como:

$$L_e = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c_0}\right)^2$$

Tomando logaritmos, se obtienen las pérdidas en  $dB$

$$L_e(dB) = 10 \log \frac{P_T}{P_R} = 20 \log \left( \frac{4\pi 10^3 d(Km) 10^6 f(MHz)}{3 \cdot 10^8} \right)$$

$$L_e(dB) = 32,45 + 20 \log f(MHz) + 20 \log d(Km)$$

La pérdida total es:  $L_T = L_e + L_g + L_c$

Donde:

$L_e$  pérdidas en el espacio libre

$L_g$  pérdidas en las guías de onda

$L_c$  pérdidas en los circuladores

La potencia recibida en la antena receptor esta dada por:

$$P_R(dBm) = P_T(dB) + G_T(dB) + G_R(dB) - L_T(dB)$$

### 2.1.3 Parámetros de una antena

Los parámetros de una antena son susceptibles de ser medidos y definidos de acuerdo con el estándar del IEEE 145-1973. Estos permiten, desde el punto de vista de sistemas, tratar la antena como una caja negra. Se definen parámetros de tipo circuital y de tipo direccional. La mayoría de estos parámetros se definen en transmisión, pero son válidos también en recepción.

**2.1.3.1 Impedancia de entrada.** La impedancia de entrada de una antena se define como la impedancia presentada por una antena en los terminales, o la relación de voltaje y corriente en el par de terminales, o la relación de los componentes apropiados en el punto del campo magnético y eléctrico, o sea, la razón entre voltaje y corriente en los terminales de la antena.

Así, la impedancia de la antena puede ser escrita como:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$$

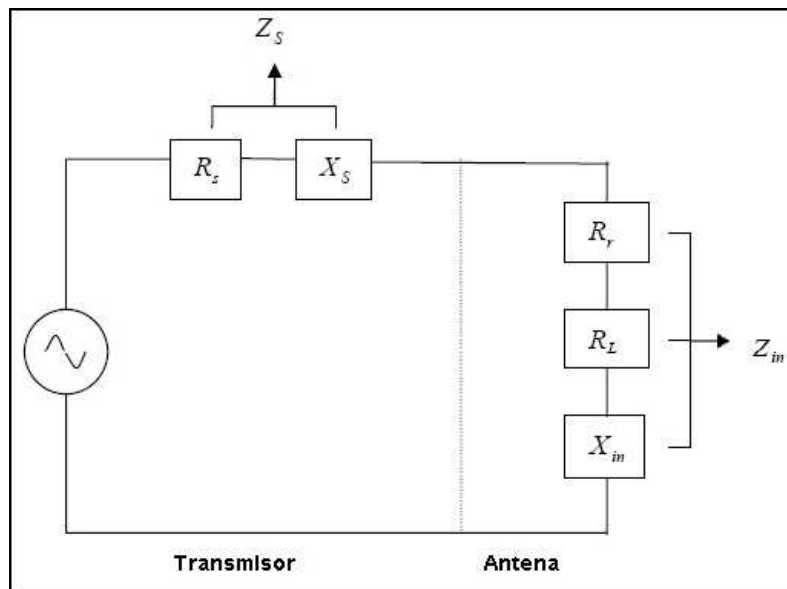
Donde  $Z_{in}$  es la impedancia de la antena en los terminales.

$R_{in}$  es la resistencia de la antena en los terminales.

$X_{in}$  es la reactancia de la antena en los terminales.

La reactancia de la antena  $X_{in}$ , representa la potencia guardada en el campo cercano de la antena, es decir, es provocado por la energía reactiva que va y vuelve y que no es radiada. La parte resistiva,  $R_{in}$  tiene dos componentes, una resistencia de radiación  $R_r$ , asociada a la resistencia a radiar de la antena y una resistencia  $R_l$ , asociada a las pérdidas de potencia en el conductor y en el dieléctrico.

La figura II.5 muestra un esquema con las impedancias del transmisor y de la antena.



**Figura II.5. Circuito equivalente de las impedancias de entrada**

**2.1.3.2 Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).** Para tener una buena eficiencia de transmisión en una antena, debe haber una máxima transferencia de potencia entre el transmisor (puede ser una guía de onda o una línea de transmisión) y la antena. Para que haya máxima transferencia de potencia, la impedancia de la antena  $Z_{in}$  debe ser adaptada con la impedancia de transmisión  $Z_s$  (impedancia adaptada significa, en este caso, que no produce reflexión de ondas).

De acuerdo al teorema de máxima transferencia de potencia, la máxima potencia puede ser transferida sólo si la impedancia del transmisor es el conjugado complejo de la impedancia de la antena.

Con esto, la condición de adaptación es:

$$Z_{in} = Z_s^*$$

Donde:  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$  (impedancia de la antena)

$$Z_s = R_s + jX_s \text{ (impedancia del transmisor)}$$

Si la condición de adaptación no es satisfecha, habrá potencia reflejada entre la antena y el transmisor, lo cual creará ondas estacionarias, las cuales pueden ser caracterizadas por un parámetro llamado **Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)**. También llamado ROE (Razón de Onda Estacionaria). El VSWR es definido como:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s}$$



Donde:

$\Gamma$  es llamado coeficiente de reflexión

$V_r$  es la amplitud de la onda reflejada

$V_i$  es la amplitud de la onda incidente

El VSWR es básicamente una medida de desadaptación entre la impedancia del transmisor y de la antena. A mayor VSWR, es peor la adaptación. El mínimo VSWR, el cual corresponde a una adaptación perfecta, es la unidad. En otras palabras, cuando no hay onda reflejada ( $|\Gamma| = 0$ ) hay una adaptación perfecta y  $VSWR=1$ .

**2.1.3.3 Directividad.** La idea de directividad viene dada por cuánto concentra su radiación una antena hacia una cierta “dirección preferente” respecto de otra dirección. En otras palabras, la directividad de una fuente anisotrópica es la razón entre la intensidad de radiación hacia una cierta dirección dada con respecto a la que tendría una fuente isotrópica.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P}$$

Donde:

$D$  es la directividad de la antena

$U$  es la intensidad de radiación de la antena por unidad de ángulo sólido en una dirección

$U_i$  es la intensidad de radiación de una fuente isotrópica

$P$  es la potencia radiada total

Además, la máxima directividad es dada por la relación:

$$D_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{\max}}{P}$$

Donde:

$D_{\max}$  es la máxima directividad

$U_{\max}$  es la máxima intensidad de radiación

La directividad es una cantidad adimensional y se expresa generalmente en decibeles (dB)

**2.1.3.4 Ganancia.** La ganancia de una antena difiere de la directividad por un factor, el cual se relaciona con la eficiencia de la antena. Como todas las antenas reales tienen algún tipo de pérdida disipativa, no toda la potencia que entra es radiada. Entonces, la ganancia de una antena es definida por:

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

Donde:

$U(\theta, \phi)$  = Densidad de potencia por unidad de ángulo sólido en la dirección  $\theta, \phi$ .

$P_{in}$  = Potencia total que entra a la antena por los terminales.

Otra forma de ver la ganancia en función de la directividad y la eficiencia viene dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Ganancia} = G = \eta \cdot D_{\max}$$

$$\text{Donde: } \eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}$$

Es la eficiencia de la antena.

La ganancia es el parámetro más usado para describir el desempeño de una antena práctica. Tanto la ganancia como la directividad pueden ser referidas a cualquier antena estándar, tales como dipolo de media onda o bien un radiador isotrópico.

La ganancia de una antena está normalmente dada en decibeles isotrópicos [dBi]. Es la ganancia de energía en comparación con una antena isotrópica, aunque también puede estar expresada en [dBd], que es la ganancia comparada con una antena dipolo. En este caso, se debe sumar 2.14 para pasar la ganancia de [dBd] a [dBi]. La ganancia de antena es la misma para recibir y transmitir.

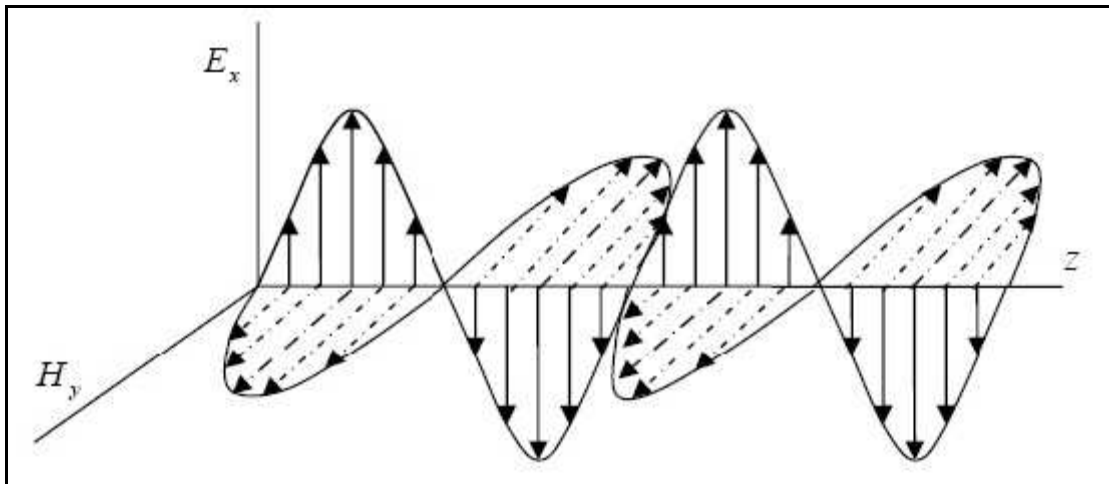
- **Antenas de baja ganancia**

De baja ganancia o antenas pequeñas eléctricamente pueden ser medidas en simples Cámaras Anecoicas rectangulares en el rango de frecuencias de microondas, pero se requiere un especial diseño de la cámara para frecuencias bajo 1GHz, debido a las propiedades absorbentes del material anecoico que debe ser usado para las frecuencias bajas.

- **Antenas de alta ganancia**

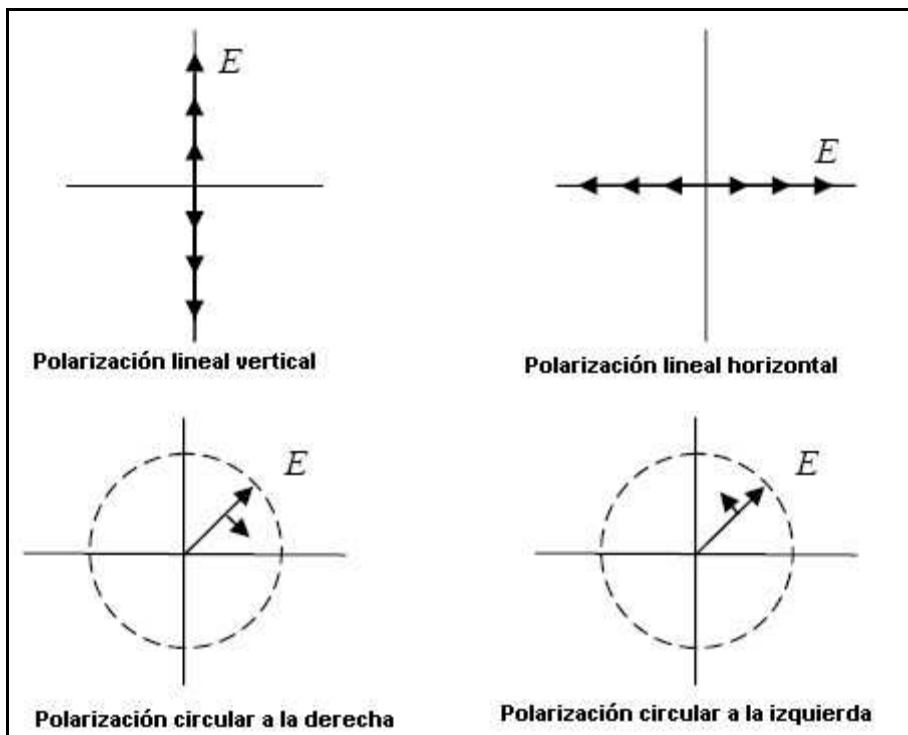
Las antenas de alta ganancia requieren extensiones de longitud muy largas al aire libre o el uso de antenas de rangos compactos en espacios internos.

**2.1.3.5 Polarización.** La polarización de una antena es la polarización del campo eléctrico de la onda radiada. Las antenas pueden ser clasificadas como linealmente polarizadas (LP) o circularmente polarizadas (CP). La polarización de la onda se describe como la variación del campo eléctrico en el tiempo en cuanto a dirección y magnitud. Según la polarización de la antena, esta podrá captar y/o radiar con una cierta polarización preferencial. La dirección del campo se toma en relación a un plano de tierra dado.



**Figura II.6. Onda linealmente (vertical) polarizada**

Algunos esquemas usados para describir los tipos de polarización más comunes se muestran en la figura II.6.



**Figura II.7. Esquemas típicos de polarizaciones**

Algunas antenas se caracterizan por su **CPL** (Cross-Polarization Level) que es una medida de polarizaciones no deseadas. Por ejemplo, una antena que tiene polarización horizontal, tendrá una cantidad de CPL dado por su cantidad de polarización vertical. Esta medida está generalmente dada en dB.

**2.1.3.6 Ancho de Banda.** El ancho de banda de una antena es definido como el rango de frecuencias en las cuales la antena tiene un buen desempeño, conforme a un estándar especificado. Este estándar es comúnmente tomado de  $VSWR \leq 2$  (ó  $|\Gamma| \leq 1/3$ ).

Otra definición es que el ancho de banda es el rango de frecuencias en los cuales las características de la antena tales como impedancia de entrada, polarización, ganancia, patrón de radiación y otras, son similares a las que tendría si operara a la frecuencia central. Según el ancho de banda de la antena (si es de banda ancha o banda angosta), puede ser caracterizado por las siguientes ecuaciones:

$$BW_{banda-ancha} = \frac{f_H}{f_L}$$

$$BW_{banda-angosta} (\%) = \left[ \frac{f_H - f_L}{f_C} \right] \cdot 100$$

Donde:

$f_H$  = frecuencia superior

$f_L$  = frecuencia inferior

$f_C$  = frecuencia central

Se dice que una antena es de banda ancha si  $f_H/f_L = 2$ .

En la figura II.8. se muestra en forma gráfica el concepto de ancho de banda en relación al VSWR.

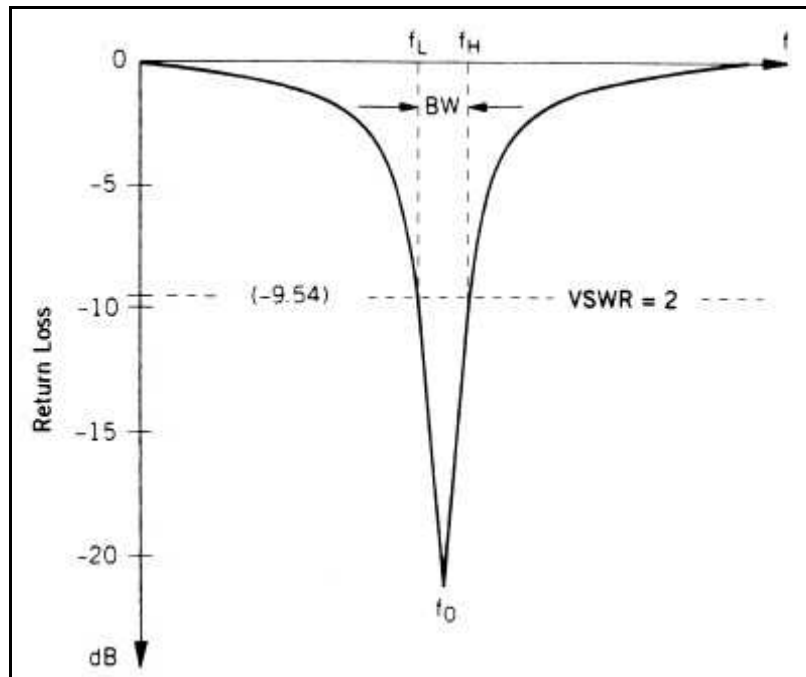


Figura II.8. Ancho de banda con VSWR=2

**2.1.3.7 Patrón de Radiación.** Las antenas no irradian uniformemente en todas las direcciones del espacio. Consecuentemente, resulta de gran interés dibujar la magnitud relativa de los campos como función de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  para un valor constante de  $r$ . La superficie resultante describe el **patrón de radiación** de la antena. Por otro lado, si se dibuja la densidad de potencia obtenemos el patrón de radiación de potencia. Los patrones de las antenas son comúnmente graficados en 2-D, aunque se pueden encontrar patrones en 3-D.

Los patrones son obtenidos moviendo una antena bajo prueba (una antena que va midiendo la intensidad de campo) manteniendo una distancia  $r$  constante y moviéndola según los ejes  $\theta$  y  $\phi$  en coordenada polares.

Al trabajar en 2-D, se encuentran dos patrones característicos para las antenas “diagrama E” y “diagrama H”.

El diagrama-E se obtiene moviendo la antena bajo prueba según  $\hat{\theta}$  y manteniendo  $r$  y  $\phi$  fijos. Mientras que el diagrama H se obtiene moviendo la antena bajo prueba según  $\hat{\phi}$  y manteniendo  $r$  y  $\theta$  fijos.

Un esquema con el sistema de coordenadas descrito es el siguiente.

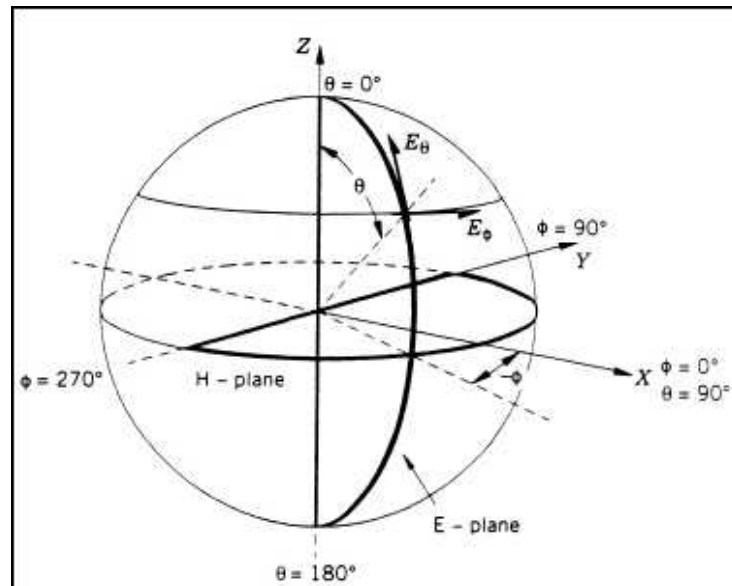


Figura II.9. Convención de coordenadas para el patrón de radiación de antenas

Por ejemplo, para una antena lineal con  $L=\lambda/2$ , se tendrán los siguientes diagramas de radiación en 2-D, mostrados en la figura II.10.

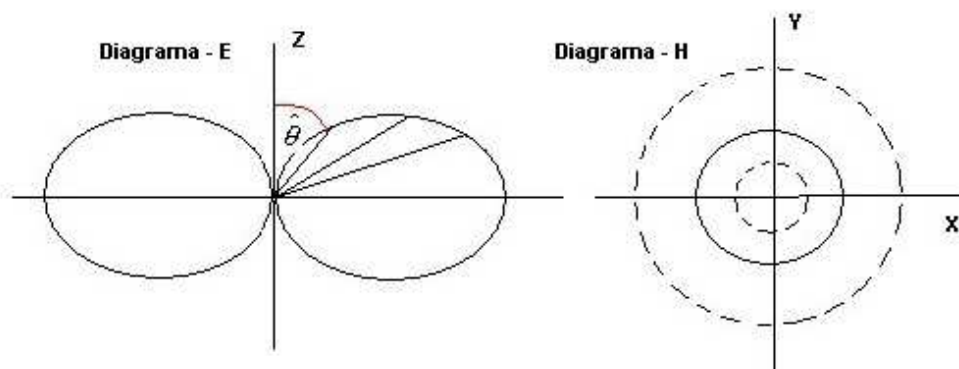


Figura II.10. Diagramas de radiación para de una antena lineal en 2-D

Con la ayuda de programas de simulación adecuados, tales como el HFSS de Ansoft se puede obtener las siguientes vistas computacionales en 3-D, figura II.11.



Figura II.11. Patrón de radiación en 3-D para distintos tipos de antenas

Para antenas que tienen directividad, es decir, direcciones preferentes de radiación, se tienen las siguientes definiciones, según la magnitud y dirección de sus lóbulos. Figura II.12.

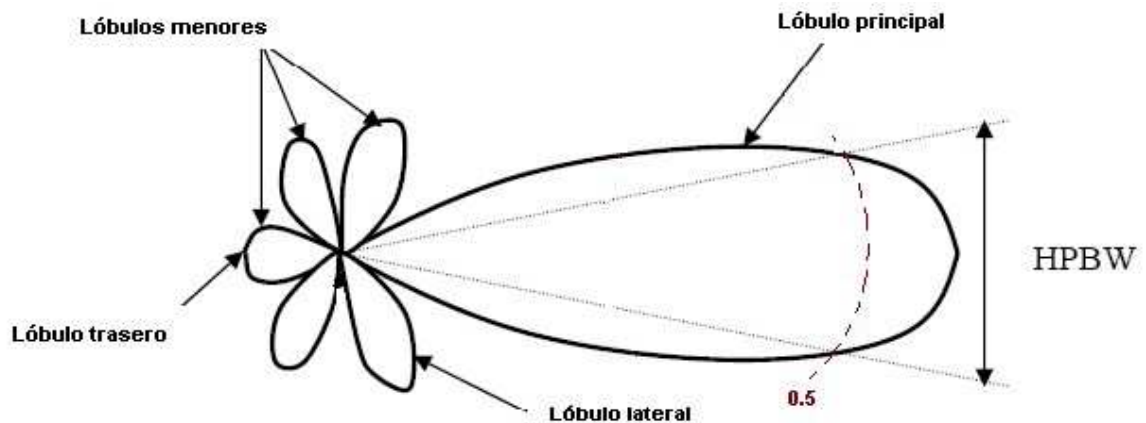


Figura II.12. Patrón de radiación para una antena genérica

**HPBW (Half Power Beamwidth):** Es el ángulo que se forma en el punto en que el lóbulo principal tiene la mitad de su potencia.

**Lóbulo principal:** Es el lóbulo contenido en la dirección de máxima radiación.



**Lóbulo menor:** Son todos los otros lóbulos que no son el lóbulo principal. Estos lóbulos representan la radiación en direcciones no deseadas. El nivel del lóbulo menor es expresado como la razón entre el lóbulo en cuestión y el lóbulo mayor. Se expresa en decibels.

**Lóbulo trasero:** Es el lóbulo menor que se encuentra diametralmente opuesto al lóbulo principal.

**Lóbulo lateral:** Son los lóbulos menores que se encuentran adyacentes al lóbulo principal.

Todos los parámetros vistos son válidos tanto en transmisión como en recepción. Esto es sumamente útil a la hora de medir las características de una antena, ya que basta con medir cómo funciona radiando para saber cómo capta la radiación electromagnética. Esto gracias al teorema de reciprocidad.

### 2.1.4 Tipos de antenas

Hay muchos tipos de antenas, cada una tiene distintas funciones según el uso que se le quiera dar. Algunos ejemplos de antenas son los siguientes:

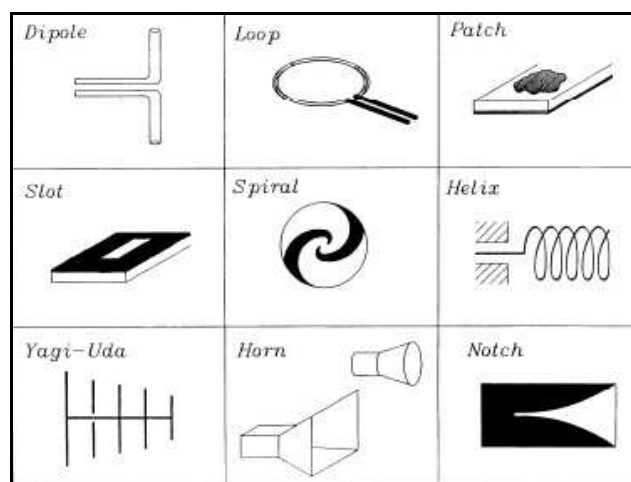


Figura II.13. Varios tipos de antenas

Además, existen distintas formas de clasificar las antenas, algunos ejemplos son:

Según su forma:

Antenas de cable: dipolo, loop, helicoidal

Antenas de apertura: Horn (de bocina), slot (ranura)

Antenas impresas: Patch (ranura), dipolo impreso, espiral.

Según su ganancia:

Alta ganancia: Antena parabólica

Media ganancia: Horn

Baja ganancia: dipolo, loop, slot, patch.

Según la forma del patrón de radiación:

Omnidireccional: dipolo

Direccional: Antena parabólica

Patrón con forma de abanico: Arreglo

Según ancho de banda:

Banda ancha: Yagi-Uda, espiral, helicoidal

Banda angosta: patch, slot.

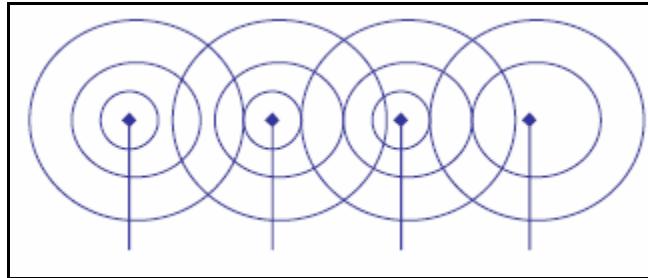
Posteriormente, se describirán brevemente los tipos de antenas que serán principalmente utilizados en el proyecto de tesis.

## **2.2 TIPOS DE ANTENAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO**

### **2.2.1 Arreglo de dipolos Log periódico (LPDA Log periodic Dipole Array)**

Los arreglos de antenas son una forma de conformar el patrón de radiación. Básicamente es el resultado de la interacción de patrones radiados por varias antenas.

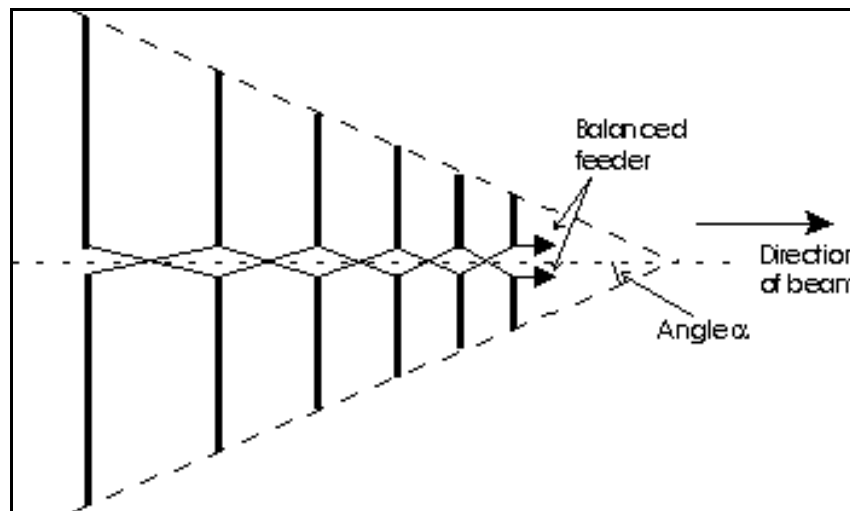
Antenas de varios elementos tales como las yagis, log periódicas, etc., son esencialmente arreglos de antenas simples (dipolos)



**Figura II.14. Arreglo de 4 elementos**

Se pueden espaciar las antenas cuidadosamente para tener el patrón de radiación deseado. Pueden usarse retardos de fases eléctricos para explorar o dirigir el haz, no requiriéndose posicionamiento mecánico.

La antena log periódica puede existir en varias formas. La más común es arreglo de dipolos log periódica (**LPDA**). Esta básicamente consiste de un número de elementos de dipolo. Estos disminuyen su tamaño desde atrás hacia adelante. La viga principal de la antena viene del frente más pequeño. El elemento en la parte posterior del arreglo donde los elementos son los más grandes es media longitud de onda en la frecuencia más baja de operación. Los espaciados de elementos también disminuyen hacia el frente del arreglo donde los elementos más pequeños son localizados. En la operación, en los cambios de frecuencia hay una transición lisa a lo largo del arreglo de los elementos que forman la región activa. Para asegurar que la fase de los diferentes elementos sea correcta, la alimentación de fase es invertida de un elemento al siguiente (próximo).



**Figura II.15. Arreglo de dipolos log periódica (LPDA)**

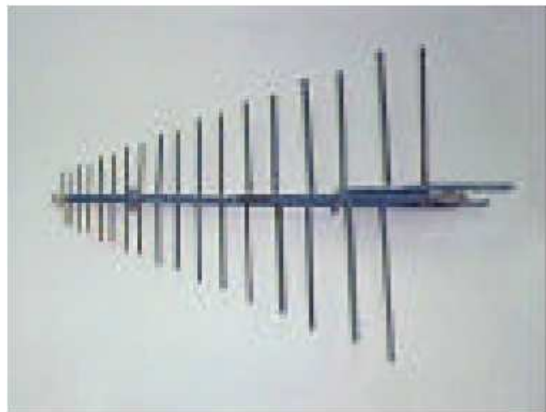
Es posible explicar la operación de un arreglo periódico en términos simples. La polaridad del alimentador es invertida entre elementos sucesivos, toma la condición cuando la antena está aproximadamente en medio de su rango de operación cuando la señal encuentra los primeros elementos juntos en términos de la longitud de onda de operación. Esto significa que los campos de estos elementos se cancelaran el uno al otro porque el sentido del alimentador es invertido. Entonces los progresos de señal bajo la antena alcanzan un punto donde el alimentador es revertido y la distancia entre los elementos dan un cambio de fase total de aproximadamente  $360^\circ$ . En este punto el efecto que es visto es el de dos dipolos en fase. La región en la cual esto ocurre es llamada la región activa de a antena.

La región activa puede consistir de más elementos. El número real depende del ángulo  $\alpha$  y un diseño constante, como se muestra en la figura II.15.

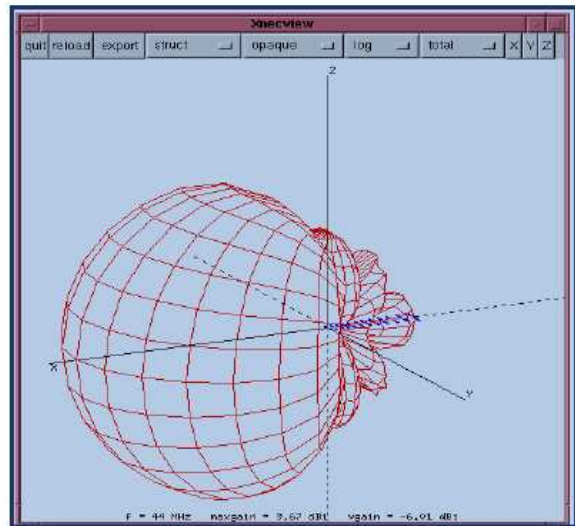
Los elementos fuera de la región activa reciben poca potencia directa. A pesar de eso, es encontrado que los elementos más grandes son resonantes debajo de la frecuencia de operación y son capacitivos. Estos son exactamente los mismos criterios que son encontrados en la Yagi. En consecuencia el elemento inmediatamente detrás de la región activa actúa como un reflector y aquellos del frente actúan como directores. Esto significa que la dirección de máxima radiación es hacia el punto de alimentación.

Una antena tipo arreglo de dipolos log periódica presenta las siguientes características principales:

- La impedancia es una función periódica de la frecuencia de operación
- Unidireccionalidad y gran ancho de banda
- El elemento más corto es  $< \lambda/2$  de la frecuencia más alta, mientras que el elemento más largo es  $> \lambda/2$  de la frecuencia más baja
- Ganancia inferior a una Yagi con el mismo número de elementos
- Funcionan como reflectores y se ubican a  $\lambda/4$  de la antena
- No se requiere que sea sólido. Pueden ser varillas o tubos.
- Los reflectores de esquina producen un diagrama más agudo. A menudo se combinan con Yagis en UHF.



a)



b)

Antenna Type	Radiation Pattern	Characteristics
<p>YAGI</p>	<p>Elevation:</p> <p>Azimuth:</p>	<p><i>Polarization: Linear Horizontal as shown</i></p> <p><i>Typical Half-Power Beamwidth 50 deg X 50 deg</i></p> <p><i>Typical Gain: 5 to 15 dB</i></p> <p><i>Bandwidth: 5% or 1.05:1</i></p> <p><i>Frequency Limit: Lower: 50 MHz Upper: 2 GHz</i></p>
<p>LOG PERIODIC</p>	<p>Elevation:</p> <p>Azimuth:</p>	<p><i>Polarization: Linear</i></p> <p><i>Typical Half-Power Beamwidth: 60 deg x 80 deg</i></p> <p><i>Typical Gain: 6 to 8 dB</i></p> <p><i>Bandwidth: 163% or 10:1</i></p> <p><i>Frequency Limit: Lower: 3 MHz Upper: 18 GHz</i></p> <p><i>Remarks: This array may be formed with many shapes including dipoles or toothed arrays.</i></p>

c)

Figura II.16. a) Antena LPDA, b) Patrón de radiación tridimensional de una Antena LPDA, c) Características de radiación de antenas tipo arreglo

### 2.2.2 Antena Espiral

Una espiral puede formarse a partir de cuatro espirales convenientemente rotadas.



**Figura II.17. Antena espiral equiangular plana**

La antena puede ser autocomplementaria o no, dependiendo de cuanto estén rotadas las diferentes espiras que la definen. Cuando el ángulo de rotación es de  $\pi/2$ , la antena es autocomplementaria.

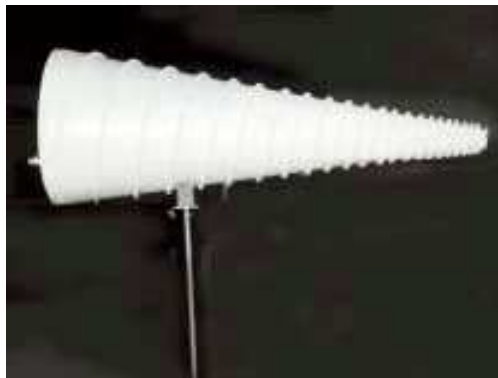
La espira debe truncarse cuando la longitud del brazo sea aproximadamente  $\lambda$ . Condición que lógicamente debe cumplirse a la frecuencia más baja de funcionamiento. El comportamiento de la antena puede mejorarse si los brazos de la espiral se terminan de forma gradual.

Un problema común de todas las antenas de ancho de banda extenso es alimentarlas correctamente dentro de todo el margen de frecuencias de funcionamiento. La antena espiral equiangular plana debe alimentarse de forma equilibrada, es decir, por cada uno de los brazos de la espiral debe circular una corriente de la misma amplitud. La línea de transmisión que permite cubrir grandes anchos de banda sin pérdidas por radiación es el cable coaxial, pero tiene el inconveniente de que se trata de una línea no equilibrada. Si se conecta directamente el conductor interno del coaxial a un brazo de la espira y el conductor

externo al otro brazo la alimentación será asimétrica, debido a la corriente que circulara por la parte externa del coaxial.

La espiral equiangular plana presenta un diagrama de radiación de campo del tipo  $\cos \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo que forma la normal al plano de la antena y la dirección de observación.

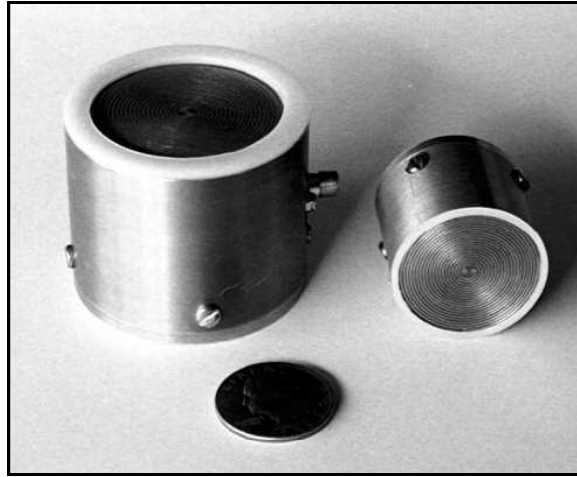
En ciertas aplicaciones es necesario disponer de una antena de banda ancha, pero con un diagrama de radiación unidireccional; por ejemplo, si se desea emplear como alimentador de un reflector. La característica de radiación bidireccional de la espiral equiangular plana puede eliminarse montándola sobre una cavidad; sin embargo, esta es una solución de banda estrecha y suele ser necesario introducir absorbentes dentro de ella para mejorar la respuesta en frecuencia.



**Figura II.18. Antena Espiral Cónica**

Una configuración de banda ancha que presenta un diagrama unidireccional es la **espiral cónica**. La antena se construye montando los dos brazos de la espiral sobre un cono. La geometría continúa siendo autoescalable y puede hacerse autocomplementaria. El ángulo que forma la generatriz del cono con el eje es típicamente de unos  $15^\circ$ . Las características son similares a las de la espiral plana, excepto que presenta un diagrama unidireccional en la dirección del vértice del cono. Se alimenta de la misma manera que una espiral plana.





**Figura II.19. Antenas espirales apoyadas en la cavidad (Cavity Backed Spirals)**

Las **antenas espirales con cavidad** son antenas de banda ancha diseñadas para EMC, vigilancia, hallazgo de la dirección, telemetría, y para aplicaciones aeronáuticas. Estas espirales pueden ser utilizadas como un componente de antena separado o como alimentadores de banda ancha para antenas que tienen platos reflectores.

Las antenas espirales representan una clase de antenas que trabajan sobre bandas multi-octava. Son compactas en tamaño, ligeras, pueden ser montadas sin ninguna salida de la superficie y son idealmente satisfactorias para plataformas aerotrasportadas. Son polarizadas circularmente las cuales toman en cuenta variaciones en el cabeceo, balanceo, y desvío del rumbo de la aeronave durante maniobras. La mayoría de sistemas de las aeronaves utilizan estas antenas. Estas antenas son también adoptadas en sistemas para embarcaciones, submarinos y vehículos con plataformas empalmadas o instalaciones fijas.

El funcionamiento se ha optimizado desarrollando técnicas de impresión del circuito para alcanzar alto grado de la capacidad de repetición de la antena, la misma que consiste de un elemento de banda ancha de radiación, balun, cavidad y cúpula protectora de baja pérdida, y se logra un tamaño más pequeño que el convencional por técnicas incorporadas de compresión de tamaño, modulación senoidal de los brazos del espiral extendido. Las radiaciones desviadas del balun han sido suprimidas cargando la cavidad con materiales absorbentes de ferrita. Esto asegura la transmisión perfecta con el nivel aceptable de desviación en los patrones de radiación. La cavidad trasera se ha cargado con absorbentes

tipo panel para suprimir modos de orden más altos y radiaciones traseras. Estas técnicas dieron lugar a funcionamientos de alta calidad con excelentes características de fase y amplitud que cubren varias bandas de frecuencias.

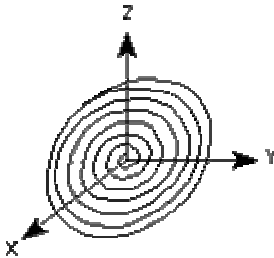
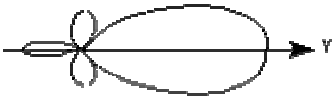
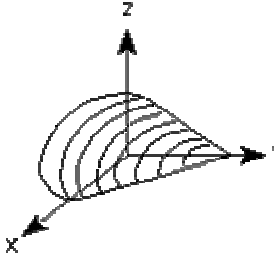

Antenna Type	Radiation Pattern	Characteristics
<p><b>CAVITY BACKED SPIRAL (Flat Helix)</b></p> 	<p>Elevation &amp; Azimuth</p> 	<p><b>Polarization:</b> Circular Left hand as shown</p> <p><b>Typical Half-Power Beamwidth:</b> 60 deg x 90 deg</p> <p><b>Typical Gain:</b> 2-4 dB</p> <p><b>Bandwidth:</b> 160% or 9:1</p> <p><b>Frequency Limit:</b> Lower: 500 MHz Upper: 18 GHz</p>
<p><b>CONICAL SPIRAL</b></p> 	<p>Elevation &amp; Azimuth</p> 	<p><b>Polarization:</b> Circular Left hand as shown</p> <p><b>Typical Half-Power Beamwidth:</b> 60 deg x 60 deg</p> <p><b>Typical Gain:</b> 5-8 dB</p> <p><b>Bandwidth:</b> 120% or 4:1</p> <p><b>Frequency Limit:</b> Lower: 50 MHz Upper: 18 GHz</p>

Figura II.20. Características de radiación de antenas espirales

### 2.2.3 Antena Horn (Corneta/Bocina)

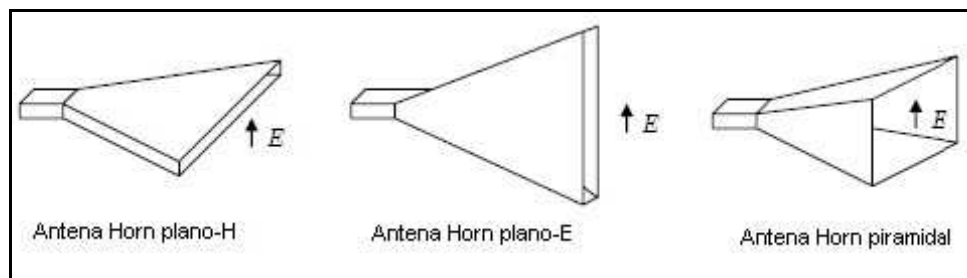
Las antenas tipo corneta o bocinas son antenas que se usan de forma generalizada a frecuencias de microondas. Básicamente, las bocinas son una transición entre una guía de onda y el espacio libre. Comúnmente usada como alimentador de antenas parabólicas.

La forma en que las bocinas se van abriendo responde a la necesidad de adaptar la impedancia de la guía de onda con la impedancia de espacio libre.

Se caracterizan por su alta ganancia, bajo VSWR, relativo ancho de banda grande, bajo peso y su facilidad de construcción y diseño.

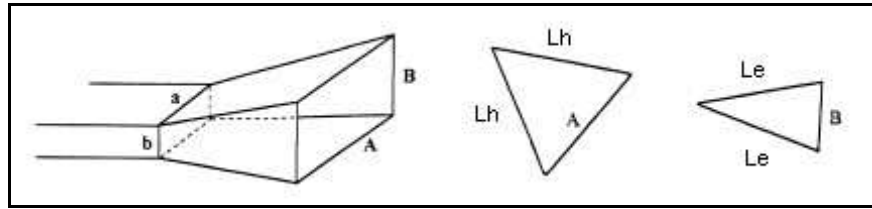
La apertura de las bocinas suele ser rectangular, circular o elíptica. El modo de alimentación de las bocinas es a través de una guía de onda que tiene la misma forma de la apertura. Para bocinas de forma rectangular, que son las más usadas, llamaremos plano E al plano vertical y plano H al plano horizontal. De acuerdo a esto, bocinas con un plano horizontal ancho en relación al plano vertical se denominan bocinas de plano H y las de plano vertical ancho en relación al plano horizontal se denominan bocinas de plano E. Las bocinas con ancho y alto similar se denominan bocinas piramidales.

Las bocinas de plano H, tienen un campo constante vertical y variable horizontalmente, las de plano E tienen campo horizontal constante y vertical variable. En tanto las de forma piramidal tienen un campo variable en ambos planos.



**Figura II.21. Antenas tipo bocina rectangular**

El cálculo de las ganancias de una antena bocina es bastante simple. Basta saber las medidas de construcción de esta y su frecuencia de operación. Para una antena piramidal, como lo muestra la figura II.22.



**Figura II.22. Medidas de una Antena horn piramidal**

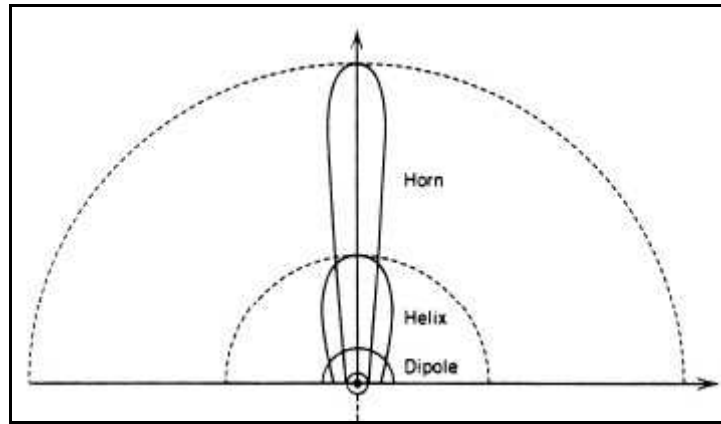
Donde  $L_e$  y  $L_h$  corresponden a las medidas de los lados de los triángulos que se forman en la apertura de la bocina. Se tienen las siguientes relaciones:

$$Ka = \sqrt{3\lambda_0 L_h} \quad , \quad Kb = \sqrt{2\lambda_0 L_e}$$

Y la medida de ganancia, con un buen grado de aproximación, queda definida por:

$$\text{Ganancia (en dB)} = 8.1 + 10 \log \frac{Ka \cdot Kb}{\lambda_0^2}$$

A modo de comparación, las ganancias de algunas antenas se muestran en la figura II.22.



a)

Antenna Type	Radiation Pattern	Characteristics
<p><i>HORN</i></p>	<p>Elevation: </p> <p>3 dB beamwidth = <math>56 \lambda^* / dz</math></p> <p>Azimuth: </p> <p>3 dB beamwidth = <math>70 \lambda^* / dx</math></p>	<p><i>Polarization: Linear</i></p> <p><i>Typical Half-Power Beamwidth: 40 deg x 40 deg</i></p> <p><i>Typical Gain: 5 to 20 dB</i></p> <p><i>Bandwidth: if ridged: 120% or 4:1 if not ridged: 67% or 2:1</i></p> <p><i>Frequency Limit: Lower: 50 MHz Upper: 40 GHz</i></p>
<p><i>HORN W / POLARIZER</i></p>	<p>Elevation: </p> <p>Azimuth: </p>	<p><i>Polarization: Circular, Depends on polarizer</i></p> <p><i>Typical Half-Power Beamwidth: 40 deg x 40 deg</i></p> <p><i>Typical Gain: 5 to 10 dB</i></p> <p><i>Bandwidth: 60% or 2:1</i></p> <p><i>Frequency Limit: Lower: 2 GHz Upper: 18 GHz</i></p>

b)

Figura II.23. a) Comparación de ganancias para distintas antenas, b) Características de radiación de antenas bocina (horn)

## 2.3 CAMPOS DE MEDIDAS DE ANTENAS

Las mediciones de antenas son extensamente estudiadas y utilizadas en toda la industria y en instalaciones de prueba. Estas mediciones envuelven esencialmente dos parámetros básicos.

- La distribución de la energía radiada en el espacio respecto a la antena, o la antena patrón respecto a su ganancia asociada.
- La antena acoplada a la línea de transmisión del alimentador de la antena o la impedancia de entrada.

La impedancia de entrada de una antena es influenciada por el ambiente físico adyacente a la antena. Las antenas irradian energía; y si la energía es reflejada hacia atrás en la antena, entonces la aparente impedancia de entrada cambia. Si el objeto reflejante es más grande que aproximadamente una longitud de onda de la antena, entonces las mediciones son bastante particulares de la impedancia de entrada verdadera. Es por todo esto que se debe tener en cuenta las condiciones iniciales para las mediciones con antenas.

### 2.3.1 Emisiones radiadas

Las mediciones de emisiones de dispositivos electrónicos se han transformado en una parte importante para traer un dispositivo electrónico al mercado. Las agencias gubernamentales especifican las emisiones máximas que un dispositivo electrónico puede radiar. Los niveles son muy bajos debido a la presencia de tantos dispositivos en un ambiente de oficina dado. La calibración cuidadosa del sitio donde se van a realizar las pruebas es esencial porque podrían ocurrir grandes errores con equipos costosos si los niveles especificados de emisión de energía no son conocidos.

Actualmente, estas mediciones son conducidas en sitios de áreas abiertas (OATS) o como alternativa sitios internos (indoors) tales como Cámaras Anecoicas. Estas mediciones envuelven la medida de la atenuación del sitio, que es la pérdida en la propagación entre el

dispositivo bajo prueba y la antena patrón. Sabiendo esta pérdida y usando un analizador de espectros, el nivel de la emisión radiada a una distancia dada puede ser determinado.

La apariencia de la medida, que es lo más importante en el diseño anecoico para EMI, del sitio atenuado debe estar en el mismo grado como si fuera medido en un OATS. Se debe considerar, en toda medida EMI, la incertidumbre asociada con las antenas utilizadas en las medidas y como deben calibrarse.

### **2.3.2 Susceptibilidad radiada**

La susceptibilidad radiada requiere la medida a ser conducida en una Cámara Anecoica porque se requiere altos niveles de potencia para generar los campos necesarios para pruebas de susceptibilidad de un elemento que contenga varios niveles de campo electromagnético, el diseño debe realizarse cuidadosamente para minimizar incertidumbre en las medidas. La uniformidad de iluminación del campo del dispositivo bajo prueba es el parámetro más crítico dentro de una medida de susceptibilidad.

## **2.4 MEDICIÓN EN CAMPOS ABIERTOS Y CERRADOS**

### **2.4.1 Mediciones en Campos Abiertos (OATS)**

Un open area test site es un sitio de pruebas para realizar mediciones de radiación de interferencia electromagnética de equipos bajo prueba (EUT). Es un terreno plano en un ambiente abierto, a una distancia suficientemente lejana de edificios, cerramientos, árboles, cables subterráneos, etc., para que no interfieran en las mediciones o sus efectos sean insignificantes. Este sitio debe tener un nivel suficientemente bajo de interferencia ambiental para permitir pruebas dentro de los límites requeridos. También debe existir una distancia suficientemente larga para permitir una adecuada separación entre la antena, el equipo bajo prueba, y estructuras cercanas que puedan reflejar, incluyendo la caja o cubierta del EUT.

Áreas abiertas o campos abiertos para pruebas son especificados por autoridades reguladoras, tales como CISPR (CISPR 16), donde se miden emisiones radiadas por equipos electrónicos domésticos y comerciales. Solo pueden ser usadas para pruebas de emisiones de inmunidad y susceptibilidad, que requieren cantidades substanciales de energía de radio frecuencia (RF) dentro de ambientes con interferencias inevitables para otros servicios.

En la figura II.24 se muestra el tamaño del área libre acorde a CISPR, ANSI C63.4 y ANSI C63.7, ( $X$  = Distancia desde la antena a el EUT)

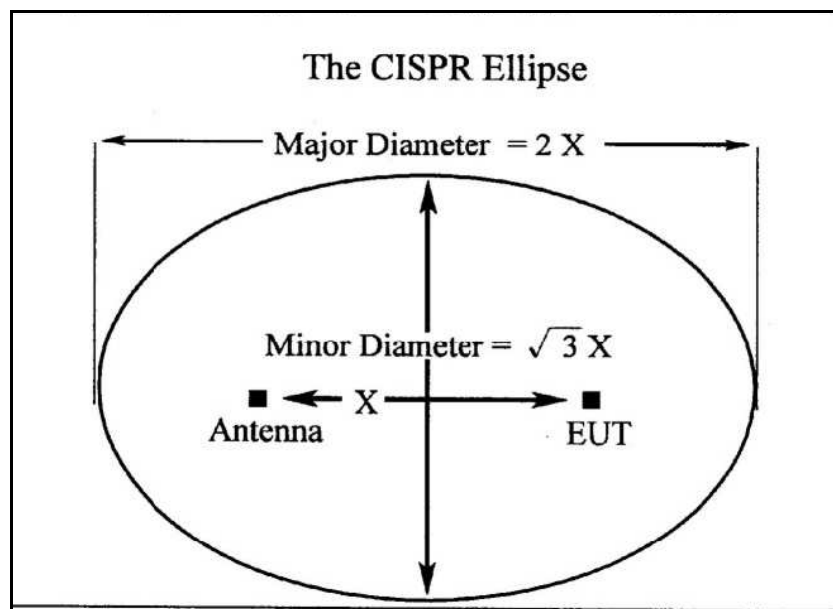


Figura II.24. Área libre de un OATS

La mayor desventaja de un campo de pruebas abierto es su falta de aislamiento del ambiente electromagnético, el cual puede en algunos sitios impedir el uso de algunas frecuencias. Los problemas con el ambiente electromagnético son a menudo mayores en las bandas de broadcast, que a menudo son la región de mayor interés, por lo que en muchos puntos de frecuencia en estas bandas las mediciones no serán posibles.



Otra desventaja de un OATS es que las pruebas dependen del clima, aunque en algunos casos este problema puede ser resuelto con una construcción no metálica, para recubrir el sitio, pero esto también implica aumentos en el costo.

La ventaja de un OATS cuando se compara a una cámara sin forrar o incluso con protección semi-anecoica, es su exactitud y repetición debido a su completa ausencia de reflexiones (excepto en el plano del piso). Para frecuencias UHF y mayores se pueden construir cámaras anecoicas, la profundidad del absorbente en las paredes limita la frecuencia más baja. Sin embargo, para frecuencias menores a 100 MHz las cámaras anecoicas no funcionan.

La falta de funcionamiento anecoico bajo los 100MHz resulta como consecuencia de la resonancia dentro de la cámara y aumenta la incertidumbre en la medida, anulando la ventaja de la Cámara Anecoica de poseer insignificante ambiente electromagnético.

Un OATS no debe ser costoso ni complejo, de hecho muchas organizaciones emplean los estacionamientos de la compañía con una malla de alambre asentada para proveer el plano de tierra. Como se muestra en la figura II.25.



**Figura II.25. Pruebas en OATS no complejos**

Las mediciones en campos abiertos envuelven poner los EUTs en un plato giratorio no metálico en el sitio de prueba de campo calibrado y midiendo el campo eléctrico para varias orientaciones de la antena, y con polarizaciones vertical y horizontal sobre el rango de frecuencia de quizás 30MHz-1GHz. La distancia del EUT a la antena es puesta a 3, 10 o 30 metros dentro de la región de campo lejano para las emisiones.

La condición para iluminación en campo lejano es dada por la siguiente expresión:

$$d \gg \frac{\lambda}{2\pi}$$

Donde  $d$  es la distancia desde la antena y  $\lambda$  la longitud de onda de radiación. Los OATs deben ser calibrados antes de las pruebas en orden a la cantidad de ambiente electromagnético del sitio.

En la figura II.26. se muestra un ejemplo de un sitio de pruebas en un campo abierto.



**Figura II.26. Prueba de calibración de antena**

### 2.4.2 Mediciones en Campos Cerrados

Los dispositivos eléctricos y electrónicos deben ser probados para certificar su calidad, acorde a los estándares. Muchas regulaciones conducen a un OATS para realizar pruebas de EMC, sin embargo estos sitios presentan muchos problemas para el ingeniero de campo debido a que las pruebas en áreas abiertas pueden ser retrasadas por el clima, ruido en el ambiente por frecuencias de broadcast, factores ambientales y posiciones remotas. Por lo que sitios de prueba como Cámaras Anecoicas, que simulan el espacio libre, son los sitios alternativos ideales. Los procedimientos de prueba son protegidos del ruido ambiental y eliminan disturbios del ambiente durante el proceso de prueba.

En la figura II.27. se puede apreciar las diversas señales que pueden interferir en las mediciones como consecuencias de reflexiones o señales emitidas por otros dispositivos. Se puede observar señales distorsionadas que entran en los sitios de medición si no poseen un correcto aislamiento, e inclusive estas señales pueden anularse unas a otras y provocar grandes niveles de ruido electromagnético ambiental.

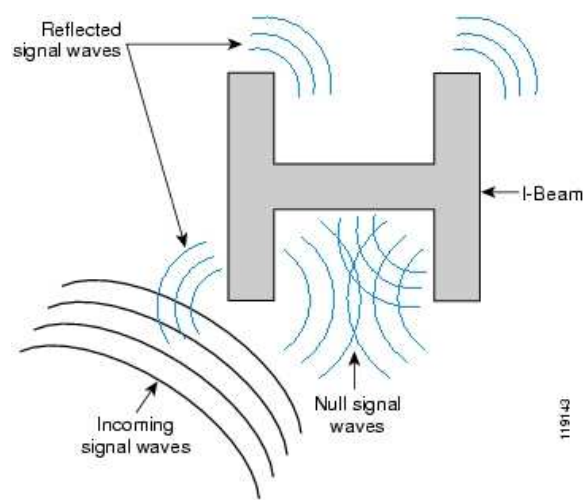
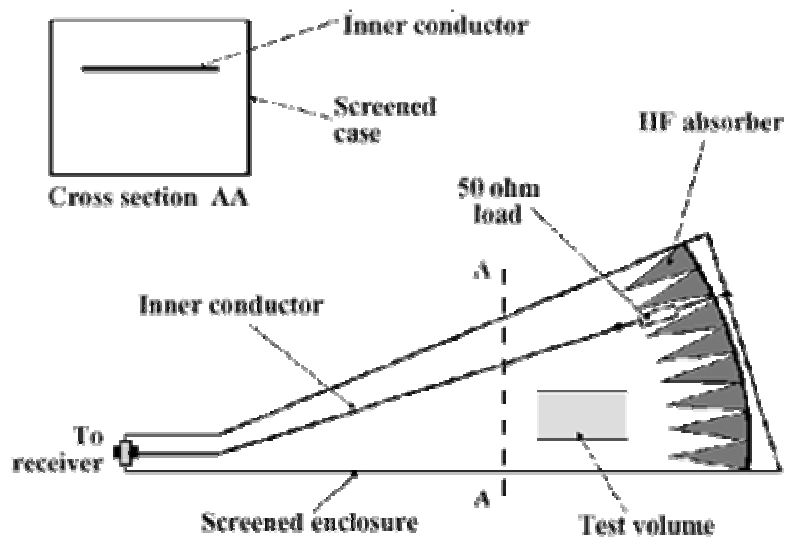


Figura II.27. Distorsión de la señal debido a reflexiones

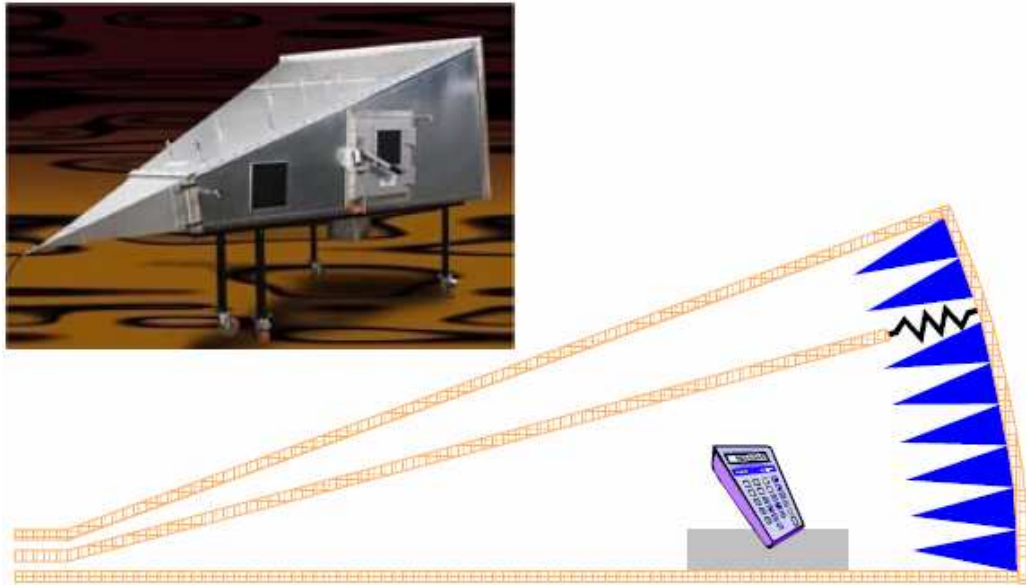
A continuación se presenta algunas alternativas para realizar mediciones de emisiones radiadas en sitios cerrados.

**2.4.2.1 Emisiones irradiadas en una célula ÍTEM.** Se puede utilizar una célula GTEM no solamente para medidas de susceptibilidad, sino también puede ser utilizada para medir emisiones irradiadas. Las Emisiones se miden en el punto de alimentación de la célula GTEM, en cada frecuencia del rango, y para los arreglos ortogonales del EUT. Las medidas entonces están convertidas por medio de un factor de la antena de GTEM en un valor de intensidad de campo. Así las emisiones pueden ser medidas sobre el rango de frecuencia de 30 MHz a 1 GHz.



**Figura II.28. Representación de una célula GTEM**

Las ventajas y las desventajas de una célula GTEM usada para las medidas de las emisiones son similares a las que se usan para pruebas de susceptibilidad. Es decir, ancho rango de frecuencias, falta de restricciones del tamaño, no necesita de un cuarto protegido, alta velocidad de medición, alto costo.



**Figura II.29. Células GTEM**

**2.4.2.2 Medidas irradiadas de las emisiones en un cuarto protegido.** Los cuartos protegidos sin forro pueden ser utilizados para medidas de las emisiones irradiadas, aunque tales pruebas se conforman sin estándares. La trayectoria directa del EUT a la antena que mide no es más larga que la trayectoria dominante como con medidas similares en un compartimiento anecoico o en un OATS, y es fijada una multiplicidad de trayectorias de reflexión para el piso, las paredes y el techo. El resultado de estas reflexiones es una enorme inexactitud de la medida, quizás 20 o 30 dB.



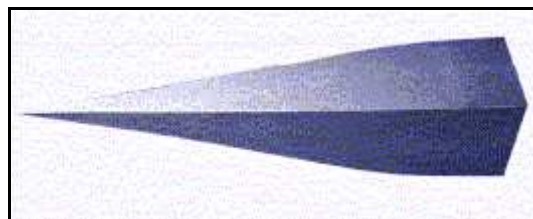
**Figura II.30. Cuarto cerrado para pre-cumplimiento de pruebas**

Se realizan pruebas bajo estas condiciones debido a que los cuartos protegidos son considerablemente más baratos que una cámara anecoica, y asegura un nivel de ruido ambiental aceptablemente bajo. Puede también ser discutido que el funcionamiento de las emisiones de RF de los EUTs cae en tres categorías con respecto a los límites precisados en estándares, estas son: muy buena, excediendo el límite por un margen grande; muy malo, fallando por un margen ancho; o frontera, estando muy cerca del estándar de la prueba línea del límite.

Para los primeros dos casos, pasando o fallando por un margen ancho, entonces tal prueba es aceptable, y solamente los casos de frontera necesitan ser probados en otro lugar. Tal prueba puede, por lo tanto, ser útil para el desarrollo o pre-cumplimiento de la prueba.

**2.4.2.3 Medidas irradiadas de las emisiones en una Cámara Anecoica.** Se puede pensar en usar un medio cuya impedancia intrínseca varíe gradualmente a lo largo del recubrimiento, desde la impedancia del medio izquierdo hasta la del medio a la derecha.

Esto se logra, por ejemplo, con una estructura piramidal como la de la figura II.31., que lleva la impedancia de campo desde el valor del aire al valor del material de la pirámide. Este tipo de pirámides se usan en las Cámaras Anecoicas.



**Figura II.31. Absorbente en forma piramidal**

En muchas aplicaciones es necesario probar equipos que emiten radiación electromagnética como si se hallaran muy lejos de cualquier objeto que pudiera dispersar la radiación y causar interferencias que modifiquen el comportamiento del equipo bajo prueba. Estas pruebas son esenciales para determinar el diagrama de radiación de antenas, las emisiones de equipos electrónicos que podrían causar interferencia, etc.

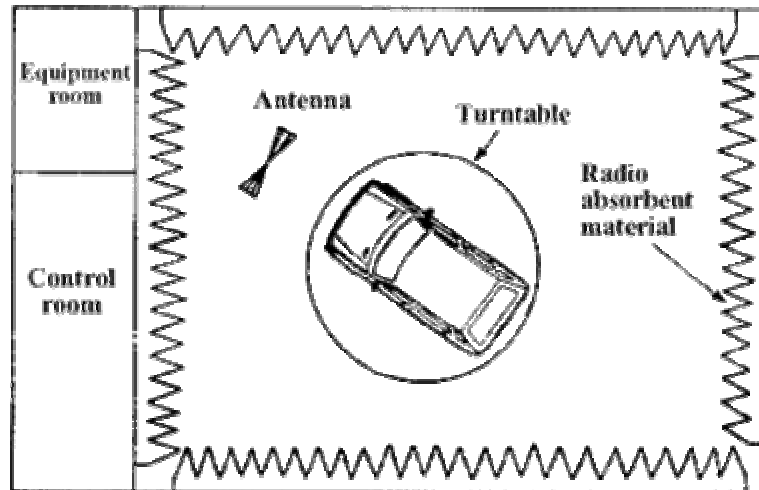
Para ello se usan cámaras cuyas paredes absorben completamente la radiación que les llega, sin producir ecos, por lo que se las llama *anecoicas*. En la figura siguiente se muestra el interior de una Cámara Anecoica con las paredes tapizadas con pirámides absorbentes.

Estas cámaras son diseñadas en tamaños diferentes y con distintos tipos de material absorbente para responder a las distintas normas de prueba para diferentes tipos de radiación (existen también cámaras anecoicas para sonido, que permite evaluar las propiedades acústicas de sistemas de audio).



**Figura II.32. Interior de una Cámara Anecoica**

Una Cámara Anecoica brinda muchas facilidades de medición de equipos eléctricos y electrónicos, siendo la mejor opción a un OATS. La cámara utiliza una placa giratoria para rotar una distancia determinada de EUT (generalmente 3, 10 o los 30m) delante de una antena de recepción o patrón.



**Figura II.33. Geometría general de una Cámara Anecoica**

Las mayores ventajas de los compartimientos anecoicos para las medidas de las emisiones son las facilidades de un sitio interno (indoors), inafectado por el clima, y el nivel de ruido del ambiente.

Las desventajas de tales instalaciones son su enorme costo, y una cierta inexactitud, comparado a un buen OATS, en frecuencias más bajas especialmente. Estas inexactitudes son debido a reflexiones de las paredes en las frecuencias debajo de 100 MHz para la mayoría de las cámaras (quizás 30 MHz para el mejor), dependiente de la profundidad del material absorbente de radio (RAM) alineado en las paredes.

Dependiendo del tipo de medición electromagnética a ser realizada, las cámaras pueden ser de diferentes formas. Estas pueden ser pequeñas que operan en el rango de frecuencias de microondas, o estructuras protegidas muy largas para conducir medidas de compatibilidad electromagnética en aviones bombarderos.

Las mediciones más comunes que se realizan en Cámaras Anecoicas son:

- Pruebas de las características S de las antenas
- Pruebas de radar (radar cross section)
- Pruebas de sistemas de circuitos microonda



- Pruebas de EMC
- Pruebas de EMI

En una Cámara Anecoica generalmente se realizan pruebas de las características S de antenas, en las cuales se utilizan antenas de pequeña abertura. Estas antenas típicas son tipo bocina pequeñas (horn), espirales, arreglo de dipolos log-periódica (LPDA), y antenas sinusoidales sobre la banda de frecuencia de 2 a 18 GHz. Las mas populares utilizadas como antenas patrón son las pequeñas tipo bocina debido a su buena directividad.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES ABSORBENTES DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

Una Cámara Anecoica simula el espacio libre, por lo que debe poder reducir significativamente las reflexiones dentro de ella para que las mediciones no se vean afectadas; por esta razón, es necesario que el material que se escoja sea el adecuado ya que de él dependerá su buen funcionamiento, es decir que las medidas que se hagan dentro de la Cámara sean las más óptimas.

En este capítulo se estudiará cada uno de los materiales absorbentes de Energía Electromagnética existentes en el mercado local, y se realizarán pruebas con cada uno de ellos: Los resultados que arrojen estas pruebas serán de gran ayuda al momento de elegir el mejor absorbente para su construcción.

Se debe tomar en consideración que a nivel industrial las Cámaras Anecoicas están hechas de materiales a base de espumas especiales cargadas de “humo negro” que hacen que la señal tenga pérdidas elevadas, en consecuencia, estas espumas también son pintadas con pinturas especiales, las cuales también deben tener características disipantes. Debido a que la construcción de nuestra Cámara es de tipo académico, se tendrá como objetivo que el material seleccionado sea lo más cercano al que se utiliza a nivel industrial.

Dentro de este capítulo también se analizarán algunos tipos de pinturas, que nos darán ciertas pautas para la selección de la más óptima, la cual acompañará al material absorbente dentro la Cámara.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS ELECTROMAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES

El estudio de las propiedades de los materiales es muy extenso, es por esta razón que para facilitar este estudio, generalmente, se clasifica a los materiales como: conductores, semiconductores y dieléctricos o no conductores.

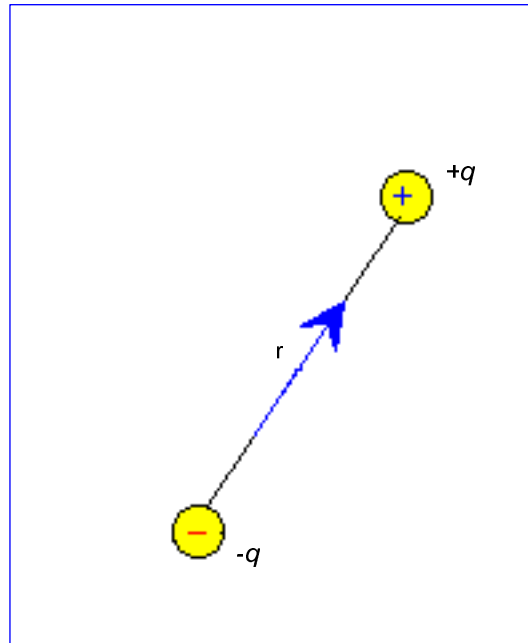
Para nuestra finalidad, nos centraremos en el estudio de los dieléctricos, debido a que los materiales que se utilizan dentro de la Cámara deben tener la capacidad de absorber las ondas electromagnéticas emitidas por la antena fuente. Por lo tanto, alguna propiedad conductiva del material produciría errores en las mediciones y el objetivo de la Cámara Anecoica sería anulado.

#### 3.1.1 Materiales Dieléctricos

En una región pequeña ocupada por un material dieléctrico, las cargas positivas y negativas se encuentran ligadas entre sí, esto significa que bajo la acción de un campo eléctrico los electrones no se encuentran lo suficientemente libres como para poder generar una corriente, sin embargo la fuerza que actúa sobre las cargas puede llegar a separarlas ligeramente.

Este hecho produce que el volumen tenga carga neta igual a cero, pero a la vez el campo eléctrico generado dentro de este sea igual al de un dipolo eléctrico. Por esta razón se realizará una introducción previa sobre dipolo eléctrico.

Un dipolo eléctrico es un sistema formado por dos cargas iguales pero de signos contrarios  $q$ , las cuales se encuentran separadas por una distancia  $d$ , tal como se muestra en la figura. III.1.



**Figura. III.1. Dipolo Eléctrico**

Para el par de cargas de la figura. III.1. se define también un momento dipolar  $p$ , el cual es un vector cuyo módulo es el producto de la carga  $q$  por la distancia de separación entre las cargas  $r$ , de dirección la recta que los une y su sentido negativo a positivo.

$$\vec{p} = q\vec{r}$$

Sobre un dipolo situado en un campo eléctrico actúa un par de fuerzas cuyo momento tiende a orientar al dipolo en la dirección del campo, como se indica en la figura. III.2., sin embargo, esta tendencia está contrarrestada por la agitación térmica de las moléculas. Por lo que para cada campo y cada temperatura, se tendrá una orientación media debido a que estas dos son contrapuestas.

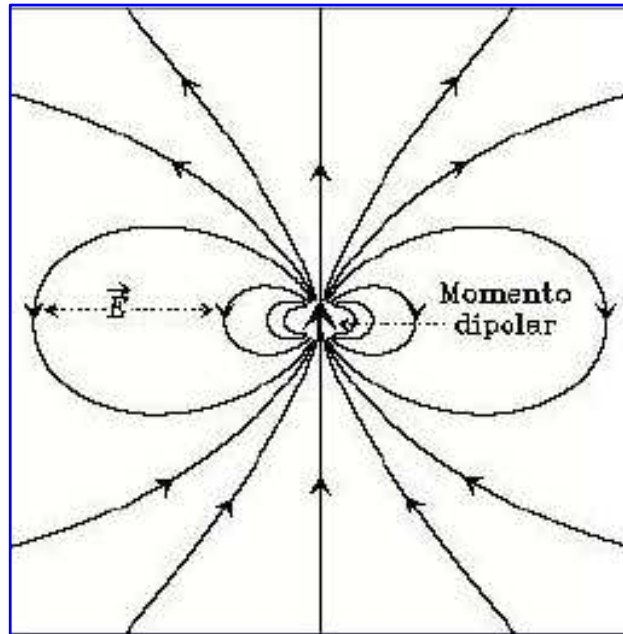


Figura. III.2. Momento Dipolar

Cuando los materiales dieléctricos se encuentran entre capas de material conductor, al momento de polarizarlos ellos pueden almacenar cargas, esta propiedad de la materia se describe como Constante Dieléctrica  $\epsilon_r$ .

La Constante Dieléctrica es la relación entre la permisividad del material con la permisividad del vacío, y define la polaridad de una sustancia. Esta guarda estrecha relación con el momento dipolar de cada una de las moléculas que conforman dicha sustancia.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

En la Tabla III.1 se presentan las constantes dieléctricas y el factor de disipación de algunos materiales.

<b>Materiales</b>	<b>Constante Dieléctrica</b>	<b>Factor de Disipación</b>
Resinas ABS	2,4 - 3,2	0,005 - 0,016
Acetato de Celulosa	3,5 - 7,5	0,01 - 0,06
Fluorcarbonos	2,1 - 3,6	0,0003 - 0,0015
PTFE, FEP	2,0	0,0002 - 0,0003
Nylon 6 y Nylon 10	3,5 - 3,6	0,04
Polipropileno	2,20 - 2,28	0,0002 - 0,002
Poliestireno, Tipo	2,45 - 4,0	0,0001 - 0,002
Siliconas	3,4 - 4,3	0,001 - 0,004
Poliestireno, Espuma	1,02 - 1,24	<0,0005
Goma Dura	2,95 - 4,80	0,007 - 0,028
Piroceramica 9606	5,58	0,0015
Cordierita	4,02 - 6,23	0,001 - 0,009
Forsterita	6,2 - 6,5	0,0002 - 0,0004
Alúmina	8,0 - 10,0	0,0001 - 0,0009
Glucina		
Cal Sódica Cristalizada	7,2	0,009
Borosilicato	4,1 - 4,9	0,0006 - 0,005
Cuarzo Fundido	3,8	0,00001
Mica, moscovita	5,4 - 8,7	0,0001 - 0,0004
Fluorgopita	6,5	0,0001 - 0,0003
Cristal de Mica enlazado	6,3 - 9,3	0,0011 - 0,0025
Nitruro de Boro	4,15	0,0002

**Tabla. III.1. Constante Dieléctrica y Factor de Pérdida de diferentes Dieléctricos**

Para que el material dieléctrico almacene energía, es necesario impedir que los portadores de carga como protones y electrones se muevan de un conductor a otro a través de él, es por esto que los materiales dieléctricos tienen siempre una alta resistividad eléctrica. En la siguiente tabla se pueden observar los valores de resistividad para algunos materiales.

Material	Resistividad Volumétrica $\Omega.m$
Acetato de Celulosa, molde	$10^8-10^{11}$
Epoxica, resina fundida	$10^{14}-10^{15}$
Metil metacrílico, fundido	$>10^{13}$
Mica	$10^{12}-10^{15}$
Nylon 6 y nylon 12	$10^{12}-10^{13}$
Fluorocarburos	$10^{13}->2 * 10^{16}$
Poliéster, resina fundida	$10^{12}$
Caucho, banda	$2 * 10^{13}$
Siliconas	$10^9-10^{11}$
Alúmina	$10^9-10^{12}$
Glucina	$>10^{13}$
Forsterita	$>10^{12}$
Coridierita	$>10^{12}$
Nitruro de Boro	$10^{11}$
Vidrio de cal sódica	$10^3$
Vidrio de Borosilicato	$10^{14}->10^{15}$

**Tabla. III.2. Resistividad de algunos Dieléctricos**

Los materiales que se utilizan para absorber campos eléctricos deben poseer alta resistividad eléctrica, alta resistividad dieléctrica y bajo factor de pérdida. Pero la constante dieléctrica debe ser baja para poder impedir la polarización y así no almacenar carga localmente en el material. Los materiales que ofrecen mejores características de absorción son los polímeros.

### 3.2 TIPOS DE MATERIALES

Los materiales se encuentran en la naturaleza en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Para la construcción interna de la Cámara, el principal material debe ser un sólido que presente buenas características dieléctricas, y que además tenga la propiedad de convertir energía electromagnética en calor, para evitar atenuaciones por reflexión dentro de la Cámara.

### 3.2.1 Sólidos

El tema de los materiales sólidos es muy extenso. Los materiales que se describirán son los que se utilizan en la fabricación del material que va dentro de una Cámara Anecoica, con el objetivo de conocerlos mejor para una futura selección del material correcto.

**3.2.1.1 Polímeros.** Los materiales son de tipo plástico, cuando se deforman debido a la acción de una fuerza y conserva la forma adquirida al momento de terminar dicha acción. Son materiales derivados de productos orgánicos de peso molecular elevado tales como: derivados del petróleo, carbón, gas natural, etc. Los cuales van adquiriendo plasticidad para poder moldearlos y darles diferentes formas (tubos, planchas, espumas, fundas, etc.).

Las espumas son polímeros que contienen espacios huecos, esto lo convierte en materiales absorbentes. Debido a su versatilidad, los polímeros son muy diversos en cuanto a características y usos. La siguiente tabla muestra las características principales de algunos polímeros que se endurecen con el calor.



MATERIAL	CONSIDERACIONES DE MAYOR APLICACIÓN	FORMAS COMUNES
Epóxicos	Tiene propiedades eléctricas buenas, bajas pérdidas, excelente estabilidad dimensional y excelente adhesión. Es fácil de utilizar, se mezclan sus dos componentes (catalizador y resina) en las proporciones exactas y luego se aplica según el uso que se requiera dar.	Fundido, moldes a presión, hilados, moldes de inyección, moldes de transferencia, láminas, filamentos, espumas, etc.
Poliésteres	Excelentes propiedades eléctricas y de bajo costo. Al igual que los materiales epóxicos, se utiliza para el mantenimiento de la temperatura en una habitación. No tiene el mismo comportamiento que los materiales epóxicos en el medio ambiente	Moldes comprimidos, hilados, moldes de inyección, moldes de transferencia, láminas. Miles de formas, debido a su maleabilidad, cuando se encuentra como espuma.
Siliconas (Rígidas)	Propiedades eléctricas excelentes, tiene una baja constante dieléctrica y una bajo factor de disipación.	Fundido, moldes de compresión, moldes de transferencia y láminas.
Poliuretanos (espumas rígidas)	Plástico de bajo espesor, excelentes propiedades eléctricas, la cual varía según el tamaño de su espesor. Diferentes campos de aplicación.	Fundido, y puede tomar varias formas dependiendo del uso que se le quiera dar.

**Tabla. III.3. Características de plásticos de endurecimiento térmico**



**Figura. III.3. Materiales que se endurecen con el calor**

Las características eléctricas de los polímeros de endurecimiento térmico de la tabla anterior son las siguientes:

MATERIAL	Epóxicos		Poliéster		Silicona		Poli- uretano
	Fibra de vidrio	Goma	Fibra de vidrio	Mineral	Fibra de vidrio	Mineral	Celulosa alfa
<b>PROPIEDADES ELÉCTRICAS</b>							
Resistividad del volumen, $\Omega$ .cm	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{15}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{10} - 10^{11}$
Resistencia dieléctrica V/mil	400	400	420-390	450-350	400-300	400-380	450-500
Constante dieléctrica, 60Hz	5.0	5.0	7.3	7.5	5.2	3.6	9.5
Constante dieléctrica, $10^3$ Hz	5.0	5.0	4.68	6.2	5.0	...	7.5
Constante dieléctrica, $10^6$ Hz	5.0	5.0	6.4	5.5	4.7	6.3	5.0-8.0
Factor de disipación, 60Hz	0.01	0.01	0.011	0.009	0.004	0.004	0.035
Factor de disipación, $10^3$ Hz	0.01	0.01	...	0.01	0.0035	...	0.025
Factor de disipación, $10^6$ Hz	0.01	0.01	0.008	0.015	0.002	0.002	0.25

**Tabla. III.4. Características eléctricas de plásticos de endurecimiento térmico**

Otra clase de polímeros son los termoplásticos, este tipo de materiales se los encuentra fácilmente en nuestro país, la siguiente tabla muestra las aplicaciones de algunos materiales de este grupo.

MATERIAL	CONSIDERACIONES DE MAYOR APLICACIÓN	FORMAS COMUNES
Policarbonatos	Excelente estabilidad dimensional, baja absorción del agua, baja dilatación. Buenas propiedades eléctricas, por lo general sirve para embalar paquetes electrónicos.	Moldes de aire, hilados, moldes de inyección, partes termoformadas, stock de varias formas, láminas.
Polietilenos y polipropilenos (poliols)	Excelentes propiedades eléctricas, especialmente para bajas pérdidas. Resistente químico pero débil a la dilatación provocada por un agente termal. La estabilidad termal incrementa según la densidad del material.	Moldes de aire, hilados, moldes de inyección, partes termoformadas, stock de varias formas, láminas, fibras y espumas.
Poliestirenos	Excelentes propiedades eléctricas, en especial para bajas pérdidas. Convencionalmente el poliestireno no se dilata con facilidad, a menos que este expuesto a altas temperaturas. En aplicaciones electrónicas se lo utiliza para absorción del ruido, en especial para aplicaciones de alta frecuencia. Los poliestirenos también son superiores en resistencia de varios tipos de radiación de los otros materiales.	Moldes de aire, hilados, moldes de inyección, moldes rotacionales, partes termoformadas, espumas.

**Tabla. III.5. Características y aplicaciones de los termoplásticos**



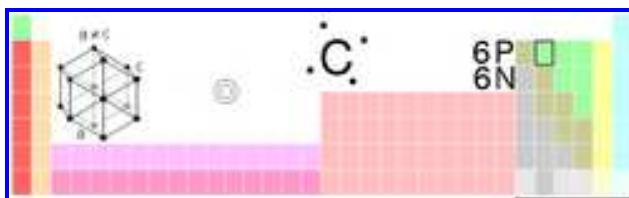
**Figura. III.4. Materiales Termoplásticos**

En la tabla siguiente, se puede visualizar las características eléctricas de algunos de los termoplásticos.

MATERIAL	Polycarbonato	Polietileno PE	Poliestireno PS
<b>PROPIEDADES ELÉCTRICAS</b>			
Resistividad del volumen, $\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{16}$	$10^{16}$	$10^{16}$
Resistencia dieléctrica V/mil	364	420-550	300
Constante dieléctrica, 60Hz	3.2	2.4	3.4
Constante dieléctrica, $10^3$ Hz	3.0	2.4	3.2
Constante dieléctrica, $10^6$ Hz	3.0	2.4	3.1
Factor de disipación, 60Hz	0.0009	<0.0005	0.0004
Factor de disipación, $10^3$ Hz	0.0021	<0.0005	0.0004
Factor de disipación, $10^6$ Hz	0.01	<0.0005	0.0004

**Tabla. III.6. Características eléctricas de los termoplásticos**

**3.2.1.2 Carbón.** El carbón sólo, sin ninguna aleación, es un no metal, aun cuando una variedad suya, el grafito, posea características conductivas y guarde ciertas semejanzas con los semimetales.



**Figura. III.5. Estructura química del Carbón**

Este elemento presenta una gran afinidad al momento de enlazarse con cualquier otro elemento, ya que forma configuraciones muy estables, lo que explica la inactividad de este elemento a temperatura ordinaria. Puede combinarse con elementos electropositivos y electronegativos de la misma forma.

El principal uso del Carbón es en como componente de hidrocarburos, en especial para petróleo y gas natural. El primero se utiliza como materia prima de polímeros y el segundo como fuente de energía.

Hay una clase de carbón que aunque se encuentre a temperaturas altas (hasta 3000°C) impide su reestructuración para dar grafito. Este tipo es carbón activado. Se lo utiliza principalmente para procesos de adsorción y para pruebas endoscópicas. Por ser un material poroso también sirve como absorbente. En nuestra aplicación su porosidad es un beneficio, nos ayudará a transformar la onda electromagnética en energía al momento de que esta haga fricción con el carbón.



**Figura. III.6. Carbón Activado en polvo**

La activación de carbón, solo en sus propiedades generales, es decir absorción se lo hace al elevar el elemento a una temperatura de 110°C por lo menos por 2 horas. Esto se lo hace mediante hornos industriales, y de este modo conseguimos deshidratar el carbón para que funcione.



**Figura. III.7. Horno Industrial**

**3.2.1.3 Grafito.** El grafito es un elemento derivado del carbón. Es de color grisáceo, blando y untuoso al tacto, buen conductor al calor y de la electricidad y muy resistente a los reactivos químicos, procesos que se utiliza para electroerosión. Se lo utiliza en la fabricación de lápices al combinarlo con arcilla, electrodos, crisoles refractarios y sustancias lubricantes y en galvanoplastia. Las pinturas anti-radar utilizadas en aviones o en el camuflaje de vehículos militares están basadas igualmente en el grafito intercalando las capas de pinturas con otros elementos.



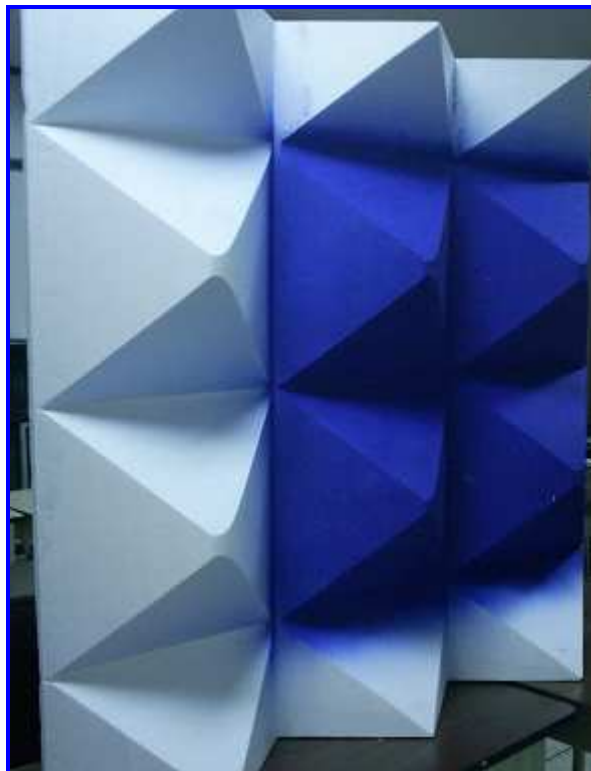
**Figura. III.8. Grafito en polvo**

### 3.2.2 Líquidos

Al igual que en los sólidos, el estudio está orientado a las pinturas que posiblemente se podrán utilizar dentro de la Cámara, y además que sean de fácil acceso, es decir que sean materiales locales.

**3.2.2.1 Pintura de Óleo.** Este tipo de pintura esta compuesta principalmente de materia orgánica, en el cual uno de sus ingredientes principales es el carbón de huesos amorfos. Es cremoso, soluble en aceite y absorbente de luz.

En el mercado local, esta tipo de pintura solo se lo encuentra en cantidades pequeñas y a costos elevados. En la figura. III.9. se muestra un tipo de polímero impregnado con esta pintura de óleo.



**Figura. III.9. Poliestireno impregnado con pintura de óleo azul**

Las Cámaras Anecoicas son pintadas con pinturas que contengan material absorbente, el principal es el carbón. Las características técnicas de las pinturas no es fácil de encontrar en nuestro país, por este motivo se analizó una muestra de óleo en el laboratorio de la Universidad Central del Ecuador, Anexo 1. El resultado arrojado por esta prueba fue que la pintura de óleo tiene 5034.4 mg/Kg. de carbón orgánico.

**3.2.2.2 Pintura de Látex.** Este tipo de pintura esta compuesta en su mayoría de materia inorgánica. Sus principales componentes son resina, carbonato de calcio y pigmentos. Es soluble en agua.

En nuestro mercado, se lo adquiere fácilmente, es un material que rinde en grandes proporciones y su costo es cómodo en relación a otros tipos de pinturas. En la figura. III.10. se puede observar esta pintura impregnada en una plancha de poliestireno.



**Figura. III.10.** Poliestireno impregnado con pintura látex



Las pruebas realizadas a esta pintura, Anexo 2., dio como resultado 2955.9 mg/Kg. de carbón orgánico. Se necesita la cantidad total de carbón, es decir carbón orgánico más carbón inorgánico, pero en Ecuador no se realizan pruebas de carbón inorgánico. Por esto, nos guiaremos solo de la cantidad de carbón orgánico de las muestras de pintura para elegir a una de ellas.

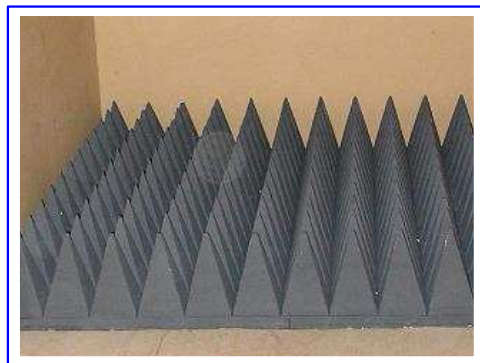
### 3.2.3 Gases

A bajas temperaturas y expuesto a pequeños campos eléctricos, los gases prácticamente no son elementos conductivos. La ionización por partículas o por campos eléctricos puede ionizar los gases e incrementar así su conductividad eléctrica. Por lo tanto, los elementos en este estado no pueden darnos garantías de que no sean materiales conductores o absorbentes.

## 3.3 FORMAS DEL MATERIAL ABSORBENTE PARA MICROONDAS

### 3.3.1 Absorbente Piramidal

**3.3.1.1 Espuma Sólida.** La mayoría de fábricas que elaboran productos para la construcción de Cámaras Anecoicas prefieren la espuma sólida. Este material es un sólido (polímero) impregnado de carbón, el cual se aplica para el recubrimiento interno de las Cámaras y en especial para frecuencias entre 1 a 40 GHz.



**Figura. III.11. Geometría estándar de un absorbente piramidal**

Este producto es utilizado para reducir las ondas reflejadas por la antena fuente, para que la antena bajo prueba reciba la señal directa sin atenuaciones. Se lo encuentra en diferentes variedades de espesor que dependen de la frecuencia de trabajo de las antenas. En la siguiente tabla, se muestra el desempeño de las pirámides absorbentes a nivel industrial.

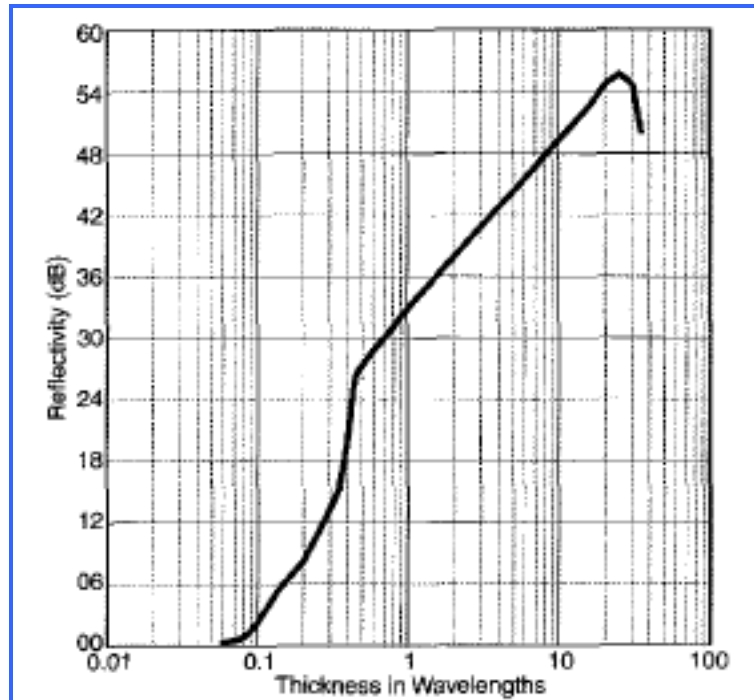
Tipo	Altura, cm.	Peso, Kg.	Picos por pieza	Reflectividad normal incidente. GHz									
				0,12	0,3	0,5	1	3	6	10	18	36	50
P-4	10,9	1,4	144					30	35	42	50	50	50
P-6	15,2	1,6	100					32	40	45	50	50	50
P-8	20,3	2	64				30	37	45	50	50	50	50
P-12	30,5	2,7	36					35	40	45	50	50	50
P-18	45,7	5,4	16			30	37	40	45	50	50	50	>45
P-24	64	7,7	9		30	35	40	45	50	50	50	50	>45
P-36	91,4	10,9	4		35	37	42	50	50	50	50	50	>45
P-48	121,9	17	2	28	35	40	50	50	50	50	50	50	>45
P-72	182,9	23	1	33	40	45	50	50	50	50	50	50	>45

**Tabla. III.7. Desempeño de los absorbentes (Nota: Las dimensiones de la base son de 0.61m x 0.61m)**

Al inicio, el producto es negro y usualmente es pintado con pintura de látex azul para mejorar el factor de reflexión de la luz. La pintura suele tener problemas a frecuencias mayores a 95 GHz, porque se degrada, alrededor de 5 dB, la reflectividad del absorbente.

La espuma absorbente es instalada generalmente utilizando un adhesivo de sensible presión. Donde, la superficie de la cámara es pintada con el adhesivo y se reviste con el absorbente. En el mercado se puede encontrar varios tipos de estos adhesivos, pero es recomendable utilizar un adhesivo que sea compatible con el material que se vaya a utilizar.

El funcionamiento electromagnético de las pirámides, está especificado por la reflectividad en -dB. Generalmente, esta información se encuentra en tablas de espesor versus frecuencia de operación (Tabla. III.3.) en el rango de -30 a -50 dB. Una buena reflectividad del absorbente esta alrededor de -33 a -40 dB. La figura. III.12. muestra el funcionamiento típico de un material piramidal.



**Figura. III.12. Desempeño de la reflectividad de un absorbente piramidal**

Otra propiedad importante dentro del funcionamiento electromagnético del material tiene que ver con el ángulo de incidencia de la señal principal que emana la antena fuente, este relaciona la reflectividad que se produce por esta señal. La industria desarrolló un gráfico en el cual se puede obtener la reflectividad que tiene el absorbente según el ángulo de incidencia de la antena y el espesor del material, figura. III.13.

Mientras más directiva sea la antena fuente mejor resultados tendrán las pruebas en las otras antenas. Es por esto, que los mejores ángulos de incidencia de la antena fuente se encuentran en el rango de  $60^\circ$  a  $70^\circ$ . Sin embargo se puede diseñar para ángulos de incidencia menores a este rango.

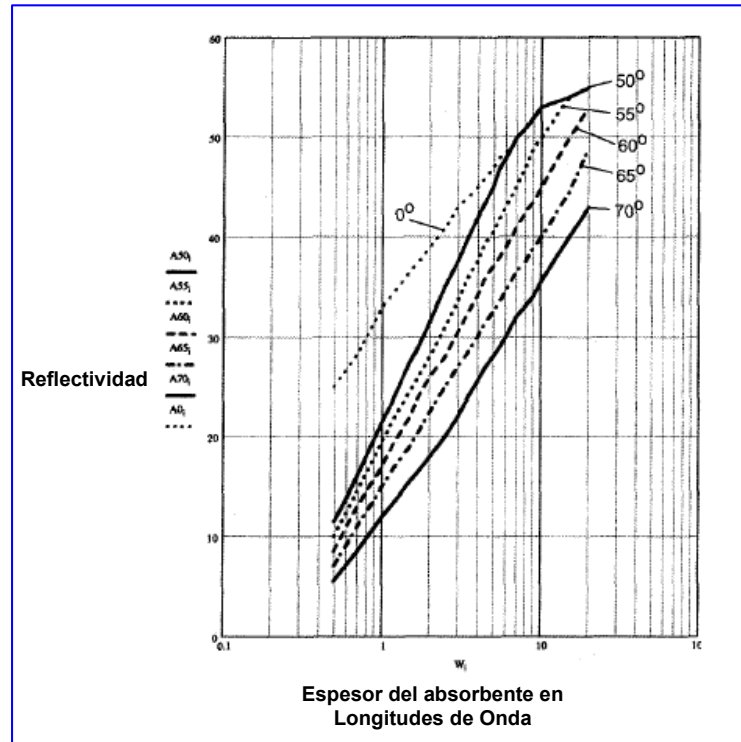


Figura. III.13. Desempeño del absorbente piramidal según el ángulo de incidencia de la antena fuente

**3.3.1.2 Absorbente Piramidal Hueco.** Hay dos formas de absorbentes piramidales huecos que se pueden utilizar. El más común es un producto hecho con espuma absorbente de fino espesor que envuelve a una pequeña pirámide de espuma sólida. Este tipo de material es muy comercializado en Europa.

El otro diseño de este producto se hace recubriendo una capa delgada de un metal con una capa plástica y enlazando este con la pirámide absorbente para darle soporte. Este diseño se puede observar en la siguiente figura. III.14. Ambos diseños proveen buena resistencia la fuego, y se los utiliza para frecuencias menores a 1GHz, donde los materiales absorbentes deben proporcionar un mejor funcionamiento.

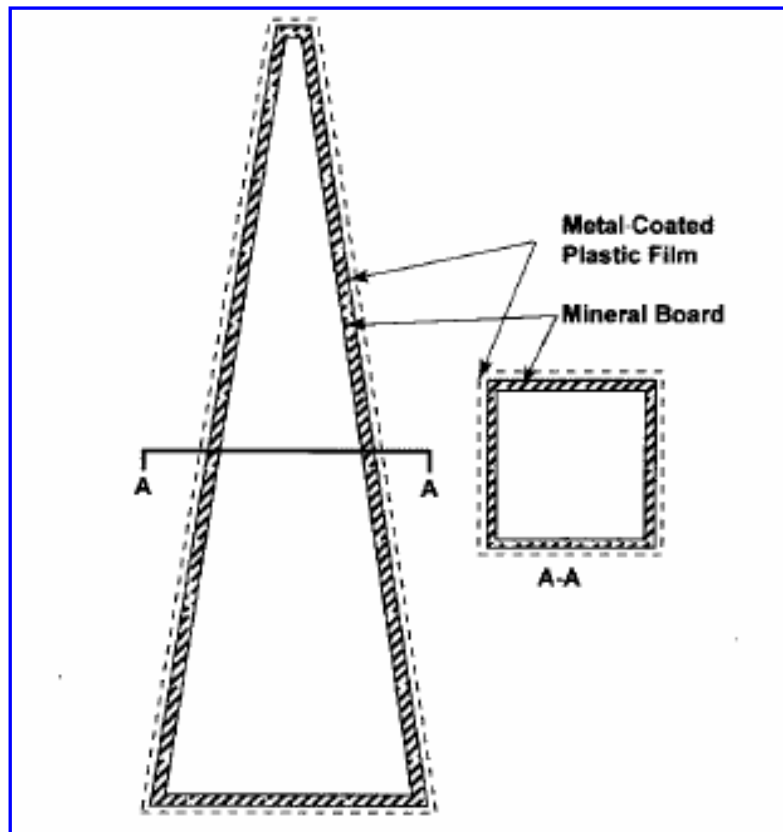


Figura. III.14. Construcción del absorbente con capa metálica

### 3.3.2 Cono Absorbente

Otra forma que el material puede tener es cónica. Este producto tiene la misma geometría que el material piramidal, una misma dirección y forma uniforme en toda la plancha. Esta se utiliza especialmente cuando se requiere guiar la energía a una pared específica. La reflectividad es la misma que en el material piramidal del mismo espesor, donde el campo eléctrico es perpendicular a los conos.

### 3.3.3 Absorbentes Entrelazados para Microondas

Otro absorbente para microondas se realiza con el entrelazamiento de la espuma, es decir junta varios tipos de espesor dentro de una misma plancha. Esto le da mayor funcionamiento al material, debido a que hay más probabilidades de reflexión sobre el absorbente y mayor pérdida de energía.

### 3.3.4 Absorbente Dieléctrico Multicapa

El absorbente dieléctrico multicapa es formado de láminas uniformes de espuma tratada. El espesor de las capas y la carga de carbón varían, dependiendo del espesor del producto. Este material se utiliza para aplicaciones de laboratorio.

### 3.3.5 Absorbente Dieléctrico Híbrido

El absorbente multicapas es muy eficiente debido a que provee bajas pérdidas de la señal. Este proporciona un 33% más material dieléctrico que un material piramidal del mismo espesor. Por lo tanto, una combinación de estos dos materiales puede ser muy aplicable para frecuencias menores a 1GHz. Estos híbridos dieléctricos consisten de un material piramidal propiamente cargado acoplados a capas sucesivas de dieléctrico. El absorbente piramidal pasa cierta cantidad de energía al dieléctrico y de este modo disipan mayor cantidad.

## 3.4 FORMAS DEL MATERIAL ABSORBENTE PARA BAJAS FRECUENCIAS

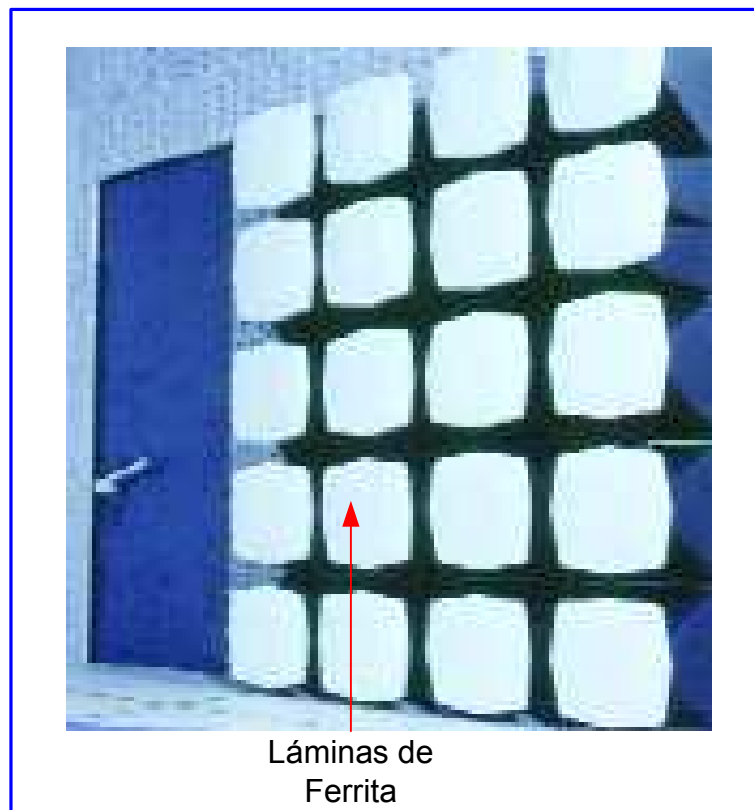
Hay una gran demanda para pruebas en el rango de frecuencias de 30 a 1000 MHz, por lo que se ha desarrollado una serie de materiales que optimicen esta aplicación. El material más común la lámina de ferrita. Estas se han utilizado para bajas frecuencias desde los años 40. El incremento de volúmenes ha hecho que las tejas de ferrita vayan evolucionando.

Las láminas utilizadas para el revestimiento de las Cámara Anecoicas tienen dos tipos de geometrías. La más común es una cerámica lisa que tiene un espesor alrededor de 6mm y una base de 100mm<sup>2</sup>. El otro es un molde cuadrículado de 2.5cm de espesor aproximadamente. Este material es muy pesado, y normalmente es instalado sobre paneles de madera sujetos a las paredes de la Cámara. Las instalaciones de este tipo de material

son mucho más grandes que las de un absorbente piramidal. La ventaja de este material es que tiene un muy buen retardo de combustión, y un simple sistema contra incendios sería suficiente en este tipo de locaciones.

### 3.4.1 Absorbentes de Ferrita

Los absorbentes de Ferrita, como se observa en la figura. III.15., son una nueva opción ante los materiales tradicionales para Cámaras Anecoicas, como es el caso de las espumas absorbentes. Una característica importante de este tipo de material es su espesor, debido a que es pequeño y esto favorece a la reducción de tamaño de la Cámara. Además este material es inmune al fuego y a la humedad, lo que hace que sea más versátil en relación a las espumas. Sin embargo, su desventaja es que solo provee una solución para la banda de frecuencias de 30 a 1000 MHz.



**Figura. III.15. Láminas de Ferrita dentro de una Cámara Anecoica**

Cuando una onda electromagnética que viaja a través del espacio libre se encuentra con un medio diferente, la onda será reflejada, transmitida o absorbida. La magnitud de señal reflejada es el principal interés dentro de una Cámara Anecoica. Para las láminas de Ferrita, el espesor se ajusta para que las ondas reflejadas y las ondas existentes cancelen la resonancia que se produce, y la cual es factor de pérdida dentro de las Cámaras. Esta resonancia esta en función de la frecuencia y depende de las propiedades eléctricas del material de ferrita.

Los absorbentes de ferrita cuadrículados son cerámicas fundidas. Esto le da al material un mejor funcionamiento debido a que muestra una mayor tolerancia entre cada lámina de ferrita. Este tipo de material utilizado, ya sea absorbentes de ferrita cuadrículados o láminas de ferrita, ha tenido un gran éxito para bajas frecuencias y esto lo hace el material preferido por los fabricantes.

### **3.4.2 Absorbentes Híbridos**

Los Absorbente Híbridos es la combinación de láminas de ferrita con absorbentes dieléctricos de diferentes formas. Una de las combinaciones más utilizadas es láminas de ferrita con absorbentes piramidales. Este tipo de combinación da mayor versatilidad a las Cámaras Anecoicas, en especial a lo que a pruebas de Compatibilidad Electromagnética se refiere, debido a que su banda de frecuencias se amplía (30MHz a 18GHz). En la mayoría de construcciones se utiliza híbridos porque es funcional, el espacio de construcción se reduce al utilizar ferrita y la frecuencia aumenta al utilizar espuma piramidal.

## **3.5 DETERMINACIÓN DEL MATERIAL A UTILIZAR**

El material que se utiliza dentro de una Cámara Anecoica como se describió ya en este capítulo, depende de la frecuencia de trabajo. En nuestro caso esa frecuencia es de 2 a 3 GHz, por lo tanto el material debe ser diseñado para microondas. Para estas señales, generalmente, el material es un polímero de forma piramidal impregnada de carbón.



### 3.5.1 Elección del polímero

El polímero que se utiliza a nivel industrial, generalmente, es el polietileno. Este presenta mejor constante dieléctrica, 2.4. Sin embargo este material es difícil de manipular manualmente, por lo que las fábricas utilizan máquinas especiales para darles la forma piramidal. Esto lo que hace poco útil para la Cámara Anecoica de la FIE, debido a que su construcción es manual.

De todos los polímeros descritos anteriormente, el poliestireno fue el material elegido. Este material ofrece una buena constante dieléctrica, lo cual nos garantiza una buena absorción, además de ser fácil de manipular y no se deforma con facilidad.

Después del polietileno, es el que presenta una mejor constante dieléctrica, 3.1. Es muy versátil y es el material más barato del mercado. En el Ecuador hay varios lugares que producen este material, el lugar que nos distribuyó el producto fue la fábrica POLIEXPANDIDOS S.A. localizada en la ciudad de Quito.



**Figura. III.16. Planchas de poliestireno en forma piramidal**

La figura. III.16. es una plancha de poliestireno con cortes piramidales, semejante a las planchas que se hacen industrialmente. Las formas piramidales que estas planchas presentan no se realizan, por este motivo se hizo un molde previo para los cortes de las planchas en dicha forma.

### 3.5.2 Elección de la pintura

Como se dijo anteriormente en este capítulo, mientras más carbón contenga la pintura mejor absorbente se vuelve. Según las pruebas realizadas a los dos tipos de pinturas (óleo y látex), la pintura en base de óleo era la mejor, sin embargo, esta pintura tiene un problema y es que en el Ecuador solo se la encuentra en cantidades pequeñas, lo que la hace ineficaz en el proceso de construcción.

El siguiente producto elegido para la construcción de la Cámara Anecoica es la pintura Látex. Pero para que esta pintura sea realmente efectiva, se la mezcló con 0.5Kg de carbón activado por litro. Esto quiere decir que este producto final es mejor que la pintura en base de óleo y por lo tanto, semejante a las que utilizan industrialmente.

El resultado de mezclar carbón con la pintura látex, nos dio un producto espeso y de color gris, que al secarse en el polímero se puede observar partículas de carbón impregnadas en la parte exterior de este. Como se indica en la figura. III.17.



**Figura. III.17. Planchas de poliestireno pintadas con la pintura Látex mezclada de carbón**

### 3.5.3 Elección del componente de impregnación

El componente de impregnación en las planchas del polímero es carbón, en el Ecuador hay dos tipos de carbón que se pueden conseguir: Grafito y Carbón Activado. El grafito es un material que tiene la propiedad de conducción, por lo que se asemeja a los semiconductores. Por lo tanto para la Cámara Anecoica este material no nos sirve porque se necesita que el material no sea conductor.

El Carbón Activado, es un material no conductor. Por lo que se eligió este material para el acompañamiento de las planchas. El problema de este, es que no viene activado y para que sus propiedades eléctricas y químicas funcionen hay que activarlo.

Para cada proceso de utilización de este material, el proceso de activación es diferente. Para que sus propiedades dieléctricas se activen, es necesario elevar el carbón a una temperatura de 110°C por dos horas como mínimo. Este paso se lo hizo en un horno industrial. Como se indica en la figura. III.18.



**Figura. III.18. Carbón Activado dentro de un Horno Industrial**

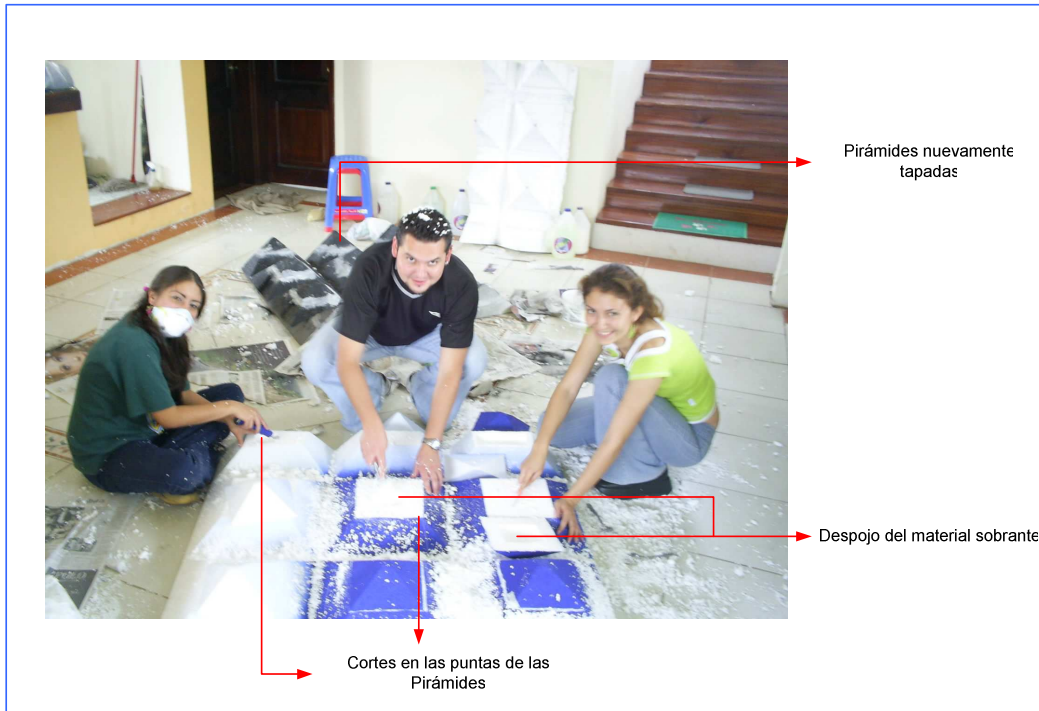
La impregnación del Carbón Activado con el material fue hecho manualmente. Por esto se probó varias formas antes de llegar al producto que se pondría dentro de la Cámara Anecoica. La primera prueba de impregnación fue hacer huecos pequeños a la plancha de poliestireno y mezclar el carbón con agua, de tal manera que al sumergir la plancha en el agua, esta absorbiera la mayor cantidad de Carbón posible. Como se observa en la figura. III.19.



**Figura. III.19. Plancha de poliestireno dentro de una piscina de Carbón Activado**

El resultado de la prueba no fue el esperado, debido a que el carbón no se impregnaba lo suficiente dentro de la plancha de poliestireno. Por esto se descarto este proceso.

El segundo proceso de impregnación del carbón fue mucho más elaborado, y comprendía en quitar las puntas de las pirámides, sacar el material sobrante de las planchas de poliestireno, rellenarlas de carbón y al final taparlas con las puntas nuevamente. Como se indica en las figuras siguientes.



**Figura. III.20. Cortes de las puntas de las pirámides y despojo del material sobrante**



**Figura. III.21. Impregnación del carbón dentro de las planchas de Poliestireno**



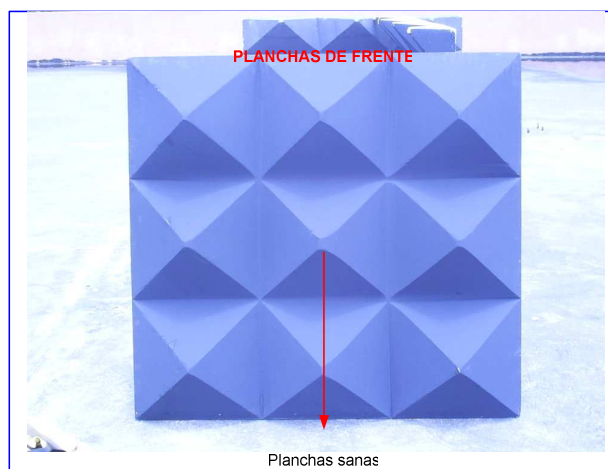
**Figura. III.22. Cubrimiento de las planchas de Poliestireno impregnadas con carbón**



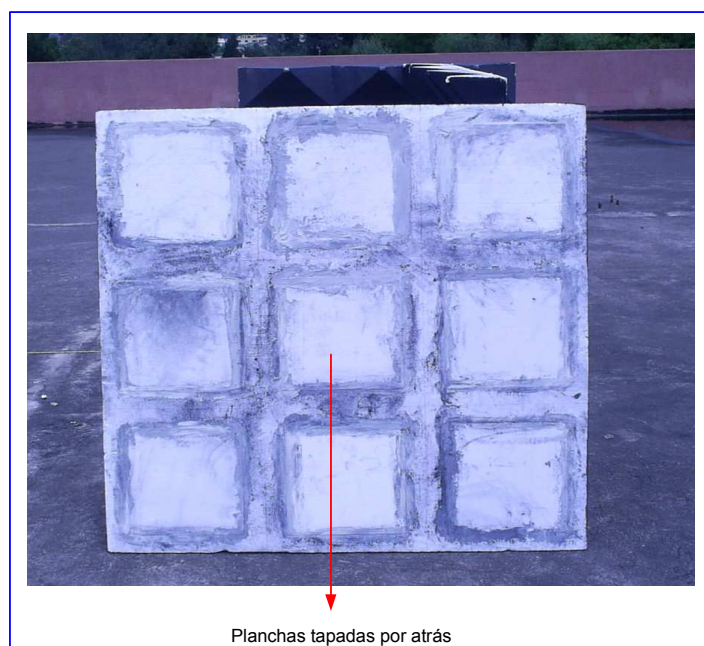
**Figura. III.23. Plancha de poliestireno impregnada con carbón**

La figura. III.23. muestra la plancha de poliestireno terminada con este proceso de impregnación. La impregnación de carbón fue un éxito, sin embargo estéticamente la plancha de poliestireno no estaba bien. Por lo que optamos por sacar el material de

poliestireno sobrante por atrás de la plancha para que los cortes no se notaran. El producto final fue el siguiente.



**Figura. III.24. Plancha de poliestireno final (vista frontal)**



**Figura. III.25. Plancha de poliestireno final (vista trasera)**

### 3.5.4 Pruebas en el material

Para corroborar que el material elegido fue el correcto se realizaron pruebas en el espacio libre con dos antenas, una transmisora y una receptora. Para saber cual era el mejor absorbente, se ponía una plancha en el medio de las dos antenas y de este modo ver cual material absorbía más señal.

Primero se realizó las pruebas en el espacio libre sin planchas entre la señal que se propagaba desde la antena fuente hasta la antena bajo prueba.



**Figura. III.26. Posición de las antenas en el OATS**



Los datos tomados en el espacio libre se muestran en la tabla. III.8

Número de Muestras	Atenuación (dBm)
1	-17,86
2	-17,74
3	-17,92
4	-18
5	-17,69
6	-17,61
7	-17,98
8	-17,54
9	-17,94
10	-17,92
<b>Promedio (dBm)</b>	<b>-17,82</b>

Tabla. III.8. Datos de la atenuación de la señal sin interferencias

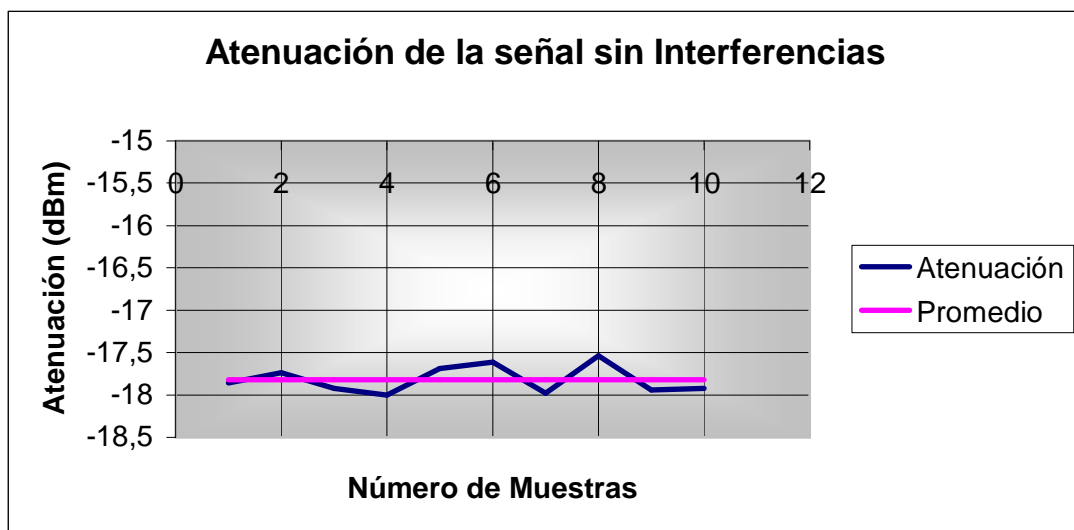


Figura. III.27. Atenuación de la señal en el espacio libre sin interferencias

Tomados los datos de la señal sin interferencias, se puso un panel de poliestireno impregnado de carbón en medio de la señal, y este fue el resultado:

Número de Muestras	Atenuación (dBm)
1	-22,15
2	-22,62
3	-21,88
4	-21,58
5	-21,59
6	-22,31
7	-21,81
8	-22,48
9	-21,61
10	-22,16
<b>Promedio (dBm)</b>	<b>-22,019</b>

Tabla. III.9. Datos de la atenuación de la señal con plancha de carbón

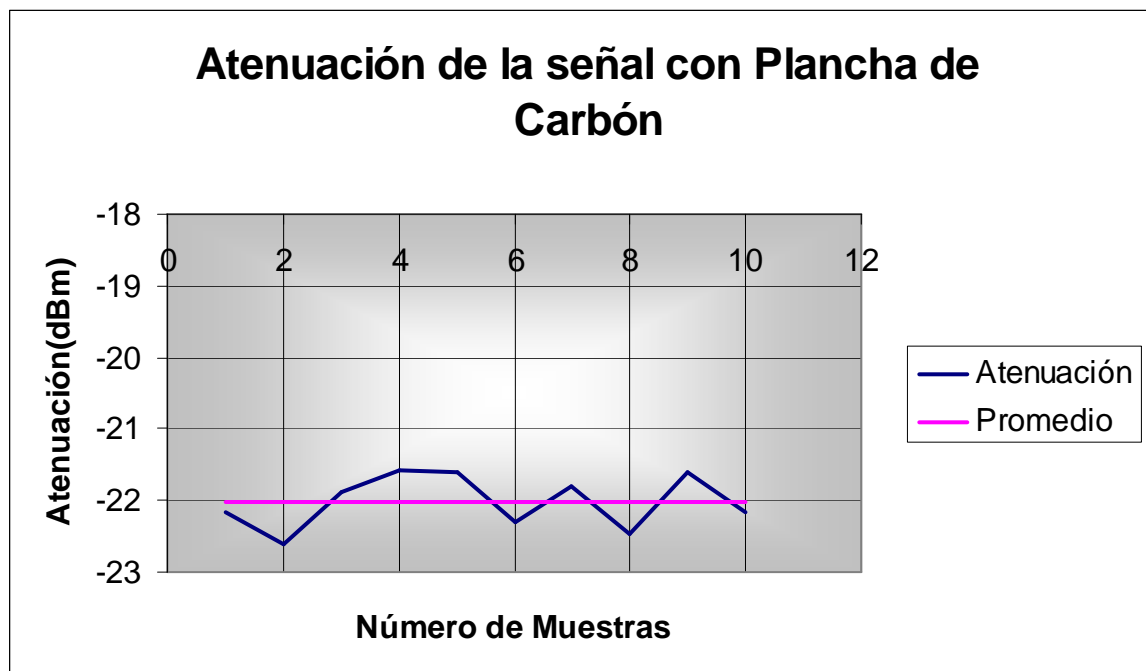


Figura. III.28. Atenuación de la señal con plancha de Carbón

Para corroborar que el carbón activado era mejor que el grafito, se colocó una plancha de grafito en la mitad de las dos antenas y la tabla. III.10. muestra los resultados.

Número de Muestras	Atenuación (dBm)
1	-18,17
2	-17,92
3	-18,75
4	-18,61
5	-17,97
6	-17,61
7	-18,35
8	-17,99
9	-17,97
10	-18,55
<b>Promedio (dBm)</b>	<b>-18,189</b>

Tabla. III.10. Datos de la atenuación de la señal con plancha de Grafito

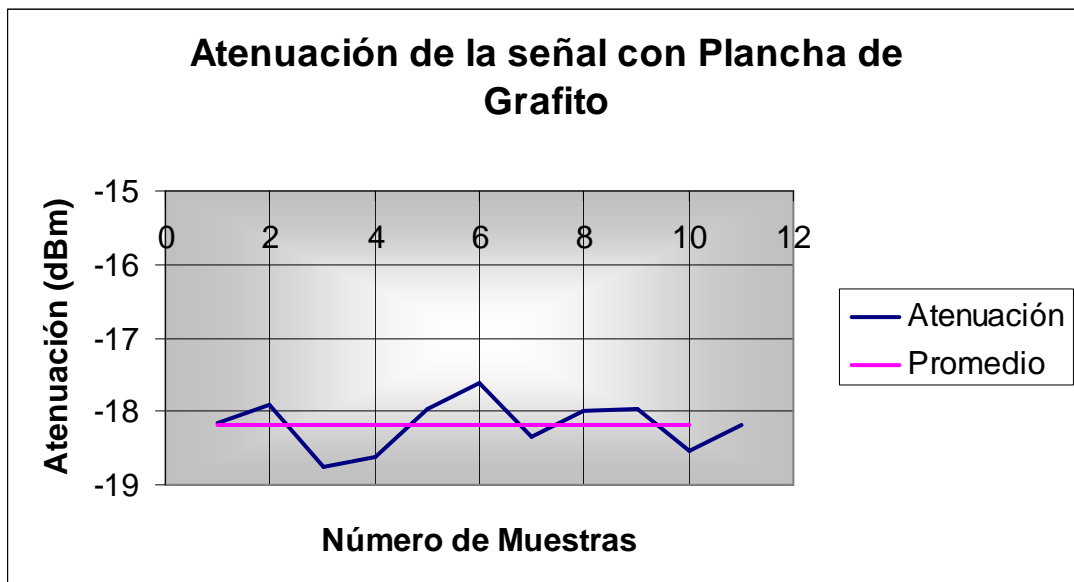


Figura. III.29. Atenuación de la señal con plancha de Grafito

Para simular lo que sucedería dentro de una Cámara Anecoica se cubrió la antena bajo prueba con varias planchas de poliestireno rellenas de carbón como se muestra en la siguiente figura.



**Figura. III.30.** Antena bajo prueba cubierta de varias planchas de poliestireno impregnado de carbón

Número de Muestras	Atenuación (dBm)
1	-24,75
2	-24,87
3	-25,08
4	-24,17
5	-24,66
6	-24,45
7	-24,47
8	-24,91
9	-24,57
10	-24,55
<b>Promedio (dBm)</b>	<b>-24,648</b>

**Tabla. III.11.** Datos de la atenuación de la señal con varias planchas de Carbón



Figura. III.31. Atenuación de la señal con varias planchas de poliestireno rellenas de carbón

La tabla. III.11. muestra la comparación entre cada una de las señales atenuadas por los diferentes tipos de material. En la tabla se puede observar que las planchas con poliestireno rellenas de carbón activado son las que atenúan más a la señal, en  $-6.828$  dBm de promedio. Por lo que se concluye que este material es mejor absorbente que los demás.

Material de Interferencia	Promedio de Atenuación (dBm)	Relación de Atenuación (dBm)
Aire	-17,82	0
Plancha de Carbón	-22,019	-4,199
Plancha de Grafito	-18,189	-0,369
Cerramiento de Carbón	-24,648	-6,828

Tabla. III.12. Comparación de los datos obtenidos con los diferentes materiales

El diseño del material que se pondrá dentro de la Cámara Anecoica depende de varios parámetros, uno de estos es la frecuencia de trabajo. Por tanto se ampliará este tema en el capítulo IV.

## CAPÍTULO IV

### CRITERIOS DE DISEÑO DE UNA CÁMARA ANECOICA

El diseño de Cámaras Anecoicas para microondas empezó en gran parte empíricamente en los 50s. Cuando los conceptos se pusieron más prácticos, comercialmente se desarrolló absorbentes anecoicos de gran rendimiento poniéndose disponibles en los 60s. Al mismo tiempo que el rendimiento mejoró. Entonces fue posible diseñar cámaras usando técnicas de geometría óptica **GO**, también conocidas como trazado de rayos. Esto dio como resultado en una variedad de estándares de diseños de cámaras que son comúnmente disponibles en aproximadamente una docena de fábricas de cámaras en todo el mundo.

Desde los 80s, una nueva clase de cámaras se ha desarrollado. La demanda para mediciones internas (es decir en indoors), en bajas frecuencias (30-1000MHz) ha resultado en una línea de cámaras de ferrita/híbrido. Claro que con la desventaja que esta última requiere técnicas de diseño mucho más elaboradas en el orden de optimizar el rendimiento.

A pesar de la existencia de fábricas dedicadas a la producción de paneles absorbentes, en nuestro país no existen fábricas para este propósito, por lo que gran parte de nuestro proyecto fue realizado en base a pruebas con diferentes materiales y sus mejoras, obteniendo resultados muy aceptables, la importación de estos materiales estandarizados, llevaría mucho tiempo e involucraría una gran inversión de dinero.

El diseño de la Cámara está estrechamente relacionado con el tipo de pruebas que se realizara en la misma, el diseño que se presenta en este documento es el de una Cámara rectangular para realizar pruebas de mediciones con antenas en el rango de 2-3 GHz. Es

importante conocer los criterios de diseño y como estos son implementados en la construcción de la Cámara.

Si bien la construcción involucró un periodo largo de tiempo, las fotografías presentadas en este capítulo muestran el gran trabajo realizado e ilustran todas las etapas de construcción, desde el proceso de tratamiento de los paneles absorbentes hasta la edificación de la estructura de madera.

#### 4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Los siguientes factores necesitan ser considerados en el diseño general de una Cámara Anecoica:

- Tipo de mediciones a ser realizadas
- Frecuencia de operación
- Espacio disponible
- Geometría de la cámara
- Método de recepción para las pruebas
- Costo

##### 4.1.1 Diseño de una Cámara Anecoica Rectangular

El diseño de una cámara rectangular para *mediciones de antenas* es determinado por los siguientes factores:

- 1.- Ecuación de campo lejano  $2D^2 / \lambda$ , explicada en el capítulo II.
- 2.- La menor y la mayor frecuencia de operación de la antena patrón.

### 3.- La incertidumbre permitida en las mediciones de la antena.

La directividad de la antena patrón y el funcionamiento del absorbente piramidal de las paredes, determinan el nivel de señal extraña que asigna la incertidumbre de la medida.

#### 4.1.2 Funcionamiento de la Cámara

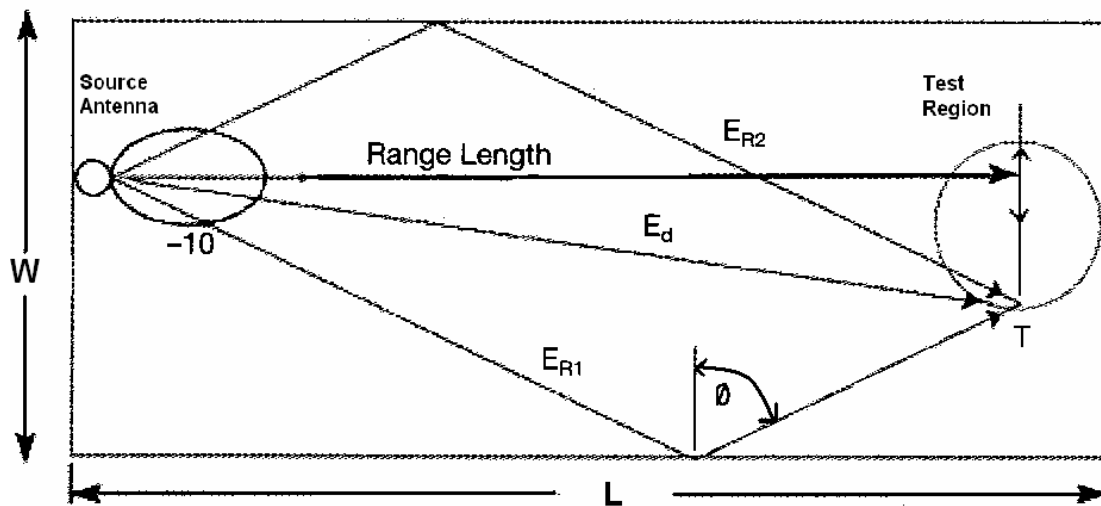


Figura. IV.1. Ilustración de una Cámara Anecoica

La figura IV.1. presenta varios términos envueltos en un diseño de Cámara Anecoica utilizando el método del trazado de rayos (Ray-tracing). El método de diseño es vinculado a los procesos usados para probar la Cámara.

Cuando una Cámara esta siendo probada, primero, un campo de prueba o indagación corre transversalmente de un lado al otro de la Cámara y a través del centro de la región de prueba, como se muestra en la figura anterior representada por la línea T.



En orden con la prueba, se detecta una fuente de energía extraña, energía reflejada desde las paredes, ésta obliga a cambiar su fase con respecto a su trayectoria directa. En el caso de la prueba transversal, solamente energía reflejada desde las paredes laterales será detectada porque todas las otras superficies están en paralelo con el movimiento de la prueba.

Debe ser considerada la energía reflejada desde las superficies para determinar la cantidad de energía reflejada que alcanza la región de prueba vía estas superficies.

También debe ser considerada la directividad de la antena fuente o patrón, porque el nivel de iluminación sobre las paredes laterales esta en función del ángulo fuera (angle off) del lóbulo principal de la antena patrón.

#### **4.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO CON EL MÉTODO DEL TRAZADO DE RAYOS**

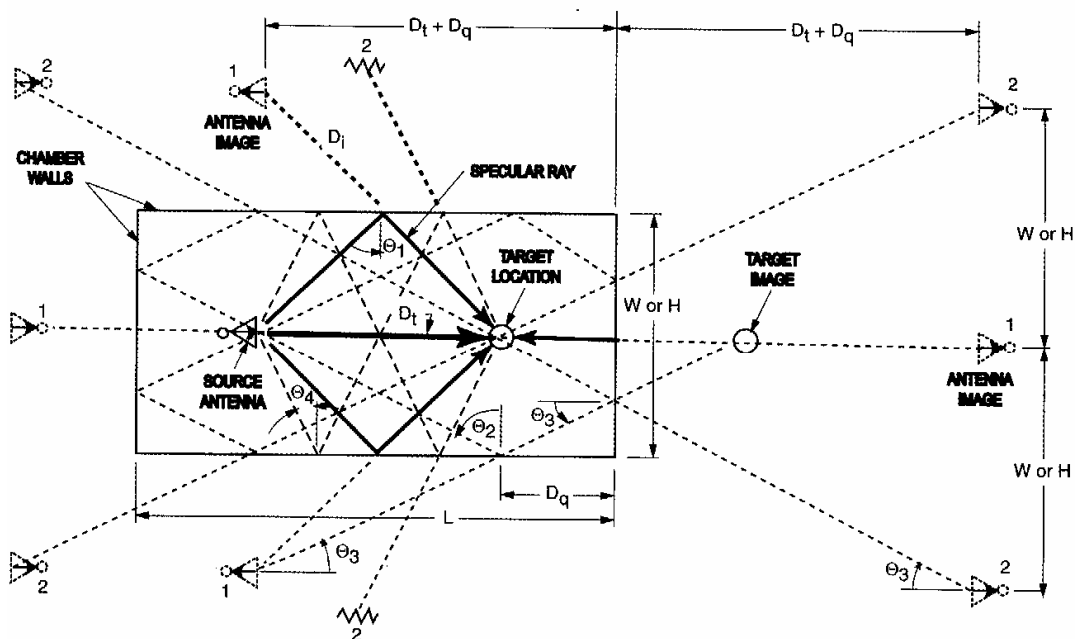
- Este procedimiento puede ser usado para estimar el peor caso de nivel de señal reflejada en la región de prueba.
- Es el método convencional para definir el *ángulo de incidencia* cuando el fabricante del absorbente mide el coeficiente de reflexión del absorbente.
- El tamaño de la habitación se determina por el tamaño de la antena bajo prueba y el rango de frecuencias.

En base al espacio disponible para la construcción de la Cámara, se impusieron las siguientes dimensiones, las mismas que cumplen con el requerimiento de diseño:

Dimensiones : Ancho :  $W = 3m$   
 Largo :  $L = 4.8m$   
 Alto :  $A = 2.6m$   
 Diametro maximo de la AUT :  $0.2m$   
 Frecuencia de operacion mayor :  $3GHz$   
 Frecuencia de operacion menor :  $2GHz$

Estas dimensiones facilitan la ubicación del material absorbente en las paredes dentro de la Cámara, debido a que las medidas de las planchas disponibles en el mercado son de  $1.20m * 1.20m$ .

La antena patrón y la antena bajo prueba están situadas en el eje longitudinal de la Cámara, la energía puede ser propagada desde la antena patrón a la región de prueba por muchos trayectos, porque el absorbente en las paredes de la Cámara no esta perfectamente absorbiendo. Varios de estos trayectos se muestran a continuación.



Detailed ray-tracing design.

Figura. IV.2. Ilustración de múltiples trayectorias dentro una Cámara Anecoica

Los rayos más importantes que están alcanzando la región de prueba son dibujados con líneas sólidas. El primero es el *rayo de la trayectoria directa* desde la antena patrón a la región de prueba. Los siguientes en importancia son los *rayos especulares con reflexión simple* desde las paredes laterales, incluyendo el techo y el piso.

El hecho de que los rayos actuales serán posiblemente refractados en la superficie del absorbente es ignorado. También es ignorado cualquier cambio en la fase causado por la velocidad de propagación en el absorbente, el cual es mas lento que en el espacio libre.

El rayo especular de la pared del final directamente iluminado por el lóbulo principal de la antena patrón, es una reflexión simple, es decir, solo un rebote.

Finalmente los *rayos de dos saltos* que golpean ambas, las paredes laterales y la pared del final, son descompuestos en factores.

#### 4.2.1 Técnica de las Imágenes

Cada uno de los rayos reflejados puede ser analizado como si hubiese venido de una *imagen de la antena patrón*. Estas imágenes son dibujadas con líneas punteadas en la figura IV.2. El número por cada antena imagen indica el número de *reflexiones especulares* asociadas con esta.

Las imágenes asociadas con *reflexiones de un solo salto* son simplemente la imagen del reflejo de la antena patrón en la pared que el rayo golpea, es decir, como si pudiese ver su reflejo en un espejo.

Las imágenes asociadas con las *reflexiones de doble salto* son formadas por, primero tomando la antena imagen en una pared lateral y luego buscando la imagen de esta imagen en una extensión de la pared del final de la Cámara.

Este proceso puede ser continuado hasta el infinito para explicar otros rebotes múltiples. Aquellas imágenes y rayos reflejados asociados son de magnitud más pequeña que los rayos que están presentados en la figura, porque *el rayo es atenuado cada vez más en cada punto de reflexión*.

**4.2.1.1 Ventajas del concepto de Imagen.** Una ventaja del concepto de Imagen es la facilidad con la que los rayos pueden ser dibujados. La línea uniendo cada imagen de primer orden (salto simple) con la antena real es perpendicular a la respectiva pared, y la antena real y su imagen son equidistantes de la pared. Similarmente, imágenes de primer orden son representadas en otras paredes o extensiones de otras paredes para formar las imágenes de segundo orden (doble salto). Observando la figura IV.2. podemos ver que una línea directa dibujada desde cada imagen a la ubicación del blanco (antena bajo prueba) define la dirección de incidencia sobre el blanco y define el punto de reflexión especular en la pared. Esto provee una geometría simple para calcular el ángulo de incidencia en el absorbente. Se puede apreciar que la imagen de doble salto en la parte derecha baja de la figura IV.2. permite un calculo del ángulo

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \arctan(W/(D_i + 2D_q)) \\ \theta_3 &= \arctan(3m/(2.2m + 2(1m))) \\ \theta_3 &= 35.6\text{grados}\end{aligned}$$

Donde:  $D_i$  es la longitud del rango entre las dos antenas (R)

$D_q$  es la distancia desde la AUT hasta la pared posterior.

El ángulo de incidencia  $\theta_2$  es el complemento de  $\theta_3$ , por lo tanto  $\theta_2 = 54.5\text{grados}$

Otra ventaja es que ecuaciones simples de propagación en el espacio libre pueden ser usadas para calcular las contribuciones del campo desde cada antena imagen al blanco,

asumiendo que las paredes de la Cámara no existen. El blanco es iluminado por un grupo de antenas imágenes. Cada antena imagen es supuestamente excitada, con menos potencia que la antena por la cantidad de pérdidas en la pared.

Los rayos de simple salto pueden ser construidos fácilmente en la figura IV.2. sin el recurso del uso de imágenes de antenas. Si cualquiera, la antena patrón o el blanco, están fuera del eje de la Cámara, entonces el concepto de imagen se transforma en mucho más útil para dibujar incluso los rayos de un solo salto.

Si las paredes de la Cámara estuvieran reflejando perfectamente, entonces cada antena imagen sería excitada con la misma señal de potencia que la antena patrón. Sin embargo, las antenas imagen son tratadas como si fuesen excitadas con menos potencia que la antena patrón por un factor solo igual al coeficiente de reflexión del absorbente en el punto cuando el rayo refleja desde la pared.

Para las imágenes de dos saltos, los coeficientes de reflexión del absorbente son encontrados en cada punto de reflexión sobre la pared, y los dos valores de decibeles distintos son sumados para encontrar la potencia total de la imagen.

Una consideración adicional es el efecto de la directividad de la antena patrón sobre los rayos reflejados. La antena patrón es alineada para que la cresta de su lóbulo principal esté dirigida hacia el centro de la región de prueba. El patrón de radiación de la antena ilumina las paredes con amplitudes de señal más débiles. Las antenas imagen tienen el mismo patrón de radiación que la antena patrón, y el ángulo desde el eje del agujero de vista de la imagen para el respectivo rayo es el mismo para cada antena imagen como para la antena patrón. La ganancia de la antena, en decibeles respecto a la cresta del patrón de radiación es algebraicamente sumada a la reflectividad de la pared.

Un factor final a ser considerado es la *diferencia de la longitud de trayectoria* entre el rayo de trayectoria directa y las trayectorias reflejadas. El factor de propagación  $P$  a ser aplicado para cada rayo reflejado es:

$$P = 20\log(D_t/D_i) \quad (\text{dB})$$

Donde  $D_i$  = distancia de la imagen, desde la respectiva imagen a la ubicación del blanco.

$D_t$  = distancia desde la antena patrón a la ubicación del blanco.

El factor de propagación  $P$  es sumado a la ganancia de la antena  $G$  y al coeficiente de reflexión de la pared  $R$ , para encontrar la amplitud de cada rayo reflejado que alcanza la ubicación del blanco. Cada factor es expresado en decibeles y es un número negativo. Expresado como una ecuación se tiene:

$$T = R + G + P \quad (\text{dB})$$

Donde  $T$  = potencia total de cada rayo de las multitrayectorias que alcanzan el centro de la región de prueba en decibeles respecto a el rayo directo.

$R$  = coeficiente de reflexión del rayo especular donde este refleja desde el absorbente.

Si más de un rebote fuera del absorbente es involucrado, entonces  $R$  es la suma del coeficiente de reflexión en cada reflexión especular.

$G$  = ganancia del patrón de radiación de la antena

$P$  = propagación (o longitud de trayectoria) en decibeles respecto a el rayo directo.

### 4.2.2 Trayectoria de los rayos

En la siguiente figura, se puede apreciar las multi-trayectorias que se producen dentro de una Cámara Anecoica, la señal que irradia la antena patrón puede tomar varios posibles caminos para alcanzar la región de prueba.

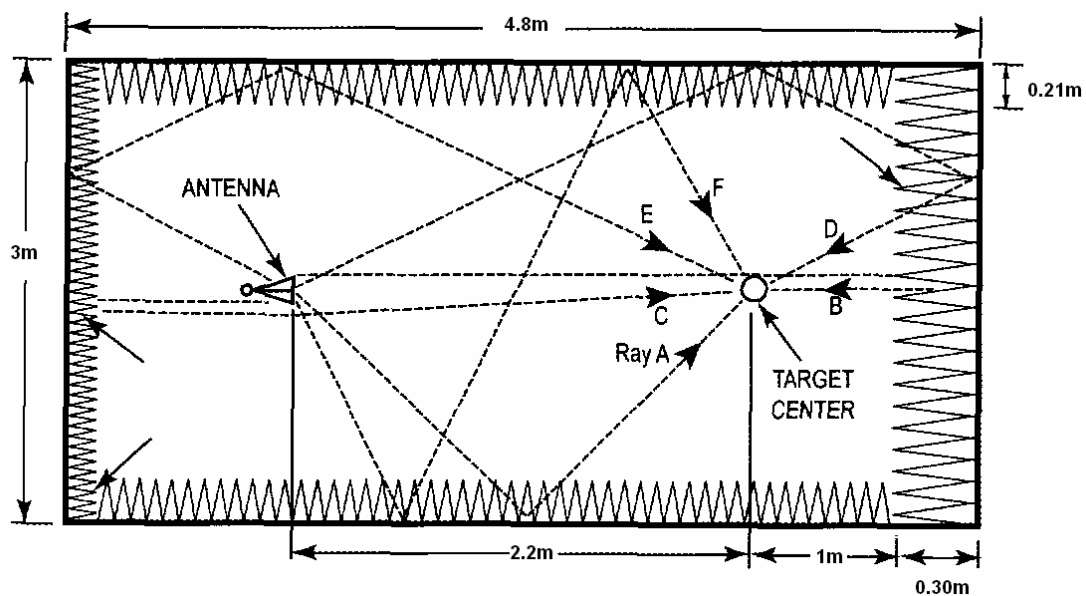


Figura. IV.3. Rayos de multi-trayectoria

Los Rayos **A**, **B** y **C** involucran solamente una reflexión saliendo de la respectiva pared, pero los rayos **D**, **E** y **F** involucran reflexiones saliendo de dos paredes. Solamente un único rayo de cada tipo es dibujado. Habrá tres rayos adicionales para el rayo **A** y rayos **D**, **E** y **F**. Esto es, el rayo **A** es presentado reflejado saliendo de una pared lateral, y habrá otros rayos similares reflejados saliendo de otra pared lateral, del techo y del piso.

Rayo	Numero de Rayos	Numero de rebotes
A	4	1
B	1	1
C	1	1
D	4	2
E	4	2
F	4	2

**Tabla. IV.1. Número de rayos considerados en el diseño de la Cámara**

Los rayos que involucran tres o más reflexiones no son dibujados, porque serán de amplitud insignificante.

También no son dibujados los rayos de múltiples rebotes que no pueden ser dibujados en un plano horizontal o vertical. Por ejemplo, un rayo podría golpear alto en una pared lateral alrededor de medio camino desde la antena al blanco, entonces el rebote sube al techo y luego al blanco. Tales rayos de doble rebote podrían ser comparables en magnitud a los rayos de doble rebote que ya están dibujados.

### 4.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

#### 4.3.1 Tamaño Básico de la Cámara

El parámetro  $D$  es el tamaño de la apertura del elemento bajo prueba AUT. Dado este valor y la frecuencia de operación más alta, la longitud del rango mínima  $R_{\min}$  de la Cámara es determinada.

Para este diseño se tomó el diámetro mayor de las antenas disponibles, el cual es 0.20m.



$$D = 0.20m$$

$$f_H = 3GHz \rightarrow \lambda = 0.10m$$

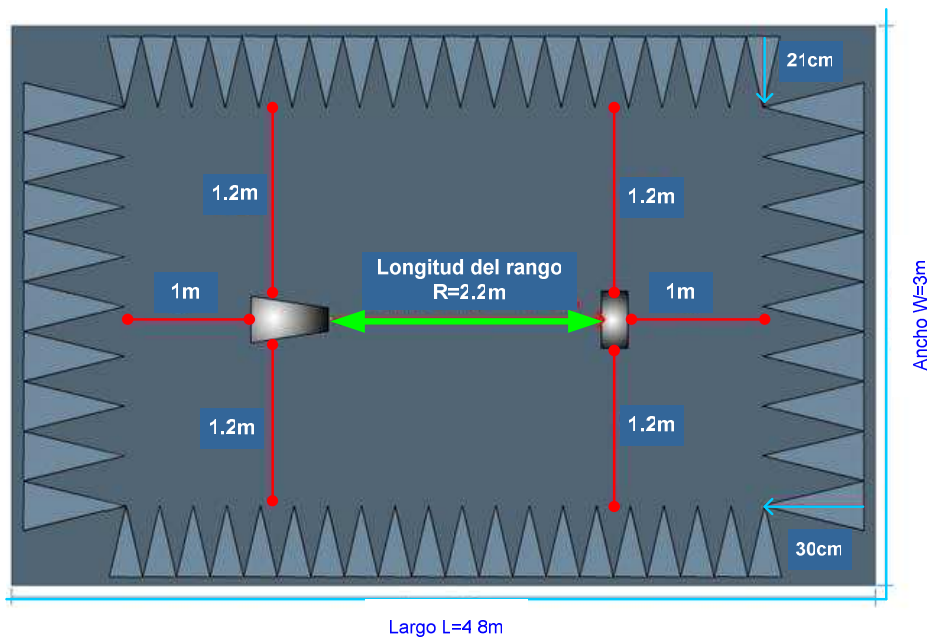
$$f_L = 2GHz \rightarrow \lambda = 0.15m$$

Para reemplazar estos datos en la ecuación de campo lejano, se utiliza la mayor frecuencia y se obtiene:

$$R_{\min} = 2D^2/\lambda$$

$$R_{\min} = 0.8m$$

Cada antena dentro de la Cámara tiene que cumplir las condiciones de campo lejano con cada uno de sus frentes y entre ellas. Por esto y para facilitar su construcción se asignó la distancia desde la antena hacia la pared posterior como  $R = 1m$ . La distancia desde la antena hacia las paredes laterales, el techo y el piso es de  $R = 1.2m$ . Y la longitud del rango entre las dos antenas es de  $R = 2.2m$ .



b

**Figura. IV.4. Tamaño básico de la Cámara Anecoica**

El siguiente parámetro es el ancho de la Cámara  $W$ , el cual debe ser

$$W > R/2$$

$$3 > 2.2/2$$

$$3 > 1.1$$

Esta es la relación de apariencia de la Cámara necesaria para que el ángulo de incidencia en las paredes adyacentes y el techo este en el orden de <60 grados.

Este último requerimiento determina el ángulo de llegada del frente de onda incidente a los materiales de la pared lateral, el piso, y el techo. Esto influye en la cantidad de atenuación experimentada por la señal dispersada dentro de la región de prueba

El diámetro de la región de prueba puede estar en el orden de  $W/3$ . En nuestro diseño el ancho es  $W = 3m$ , por lo que el diámetro de la región de prueba es de  $1m$ .

La región de prueba es el volumen de prueba o zona de silencio, sobre el cual la reflectividad de la Cámara es especificada, y debe ser mayor en diámetro que la antena a ser probada AUT.

$$1m > 0.2m$$

#### 4.3.2 Rango de elevación de las antenas

Para elegir el rango de la longitud de la elevación de las antenas, se debe:

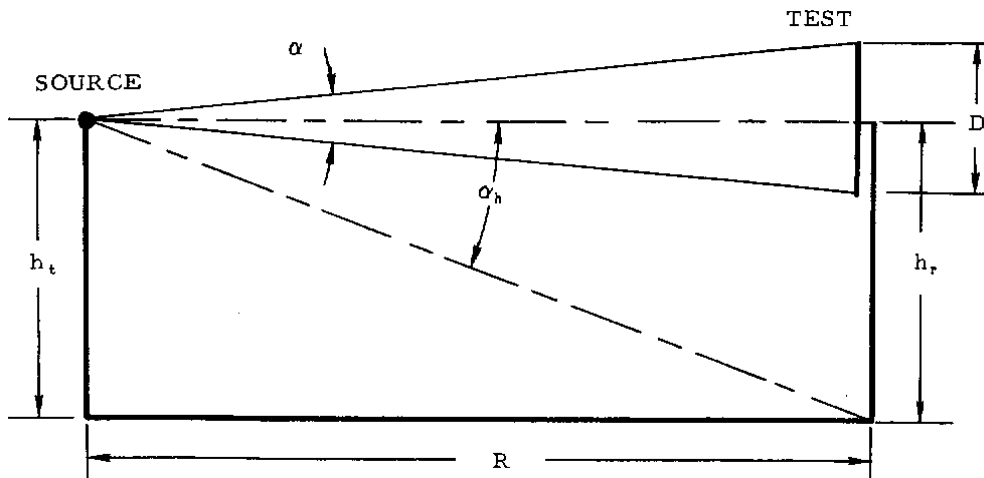


Figura. IV.5. Elevación de las antenas

- Determinar la longitud del rango mínimo  $R_{\min} = 2D^2/\lambda$ , para este diseño se estableció un  $R_{\min} = 1m$
- Determinar el máximo diámetro de la antena patrón

$$d \leq 0.37 \lambda R/D$$

$$d \leq 0.37 * 0.15m * 1m/0.2m$$

$$d \leq 0.28m$$

- Otro criterio para el rango de elevación es

$$h_r \geq 4D$$

$$h_r \geq 0.8m$$

$$h_r = \text{altura del AUT}$$

$$h_t = \text{altura de la antena patrón}$$

Esto asegura una buena iluminación cuando va disminuyendo el ancho del lóbulo y un mínimo rango de reflexiones. Esto verifica que el primer nulo del diagrama de radiación de la antena patrón no caiga mas abajo que la base de la torre de la antena prueba.

- Para asegurar que la variación de amplitud vertical a través de la apertura de prueba no afecte la medición, debido a las reflexiones provenientes del piso, se recomienda que la elevación de la antena bajo prueba  $h_r$  cumpla con:

$$h_r \geq 3.3D$$

$$h_r \geq 0.66m$$

- Para este diseño se eligió  $h_r = h_t = 1.2m$ , cumpliendo así con los requerimientos.

## 4.4 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS ABSORBENTES

### 4.4.1 Requerimientos del Absorbente

Teniendo determinado el tamaño de la Cámara, el siguiente paso es determinar el forro anecoico requerido para alcanzar la reflectividad deseada o nivel de energía reflejada en la región de prueba.

Un requerimiento común para Cámaras de pruebas con microondas es que la reflectividad máxima sea -40dB en la frecuencia de operación mas baja.

Se debe obtener una reflectividad en el rango de -30dB a -40dB, para que la incertidumbre de la medida sea aceptable. Por lo que en el diseño se tomo como referencia una reflectividad de -30dB.

Y conociendo el valor del ángulo de incidencia, obtenido mediante el método de trazado de rayos  $\theta_2 = 54.5 \text{ grados}$  acudimos a la siguiente grafica para obtener el espesor del material absorbente

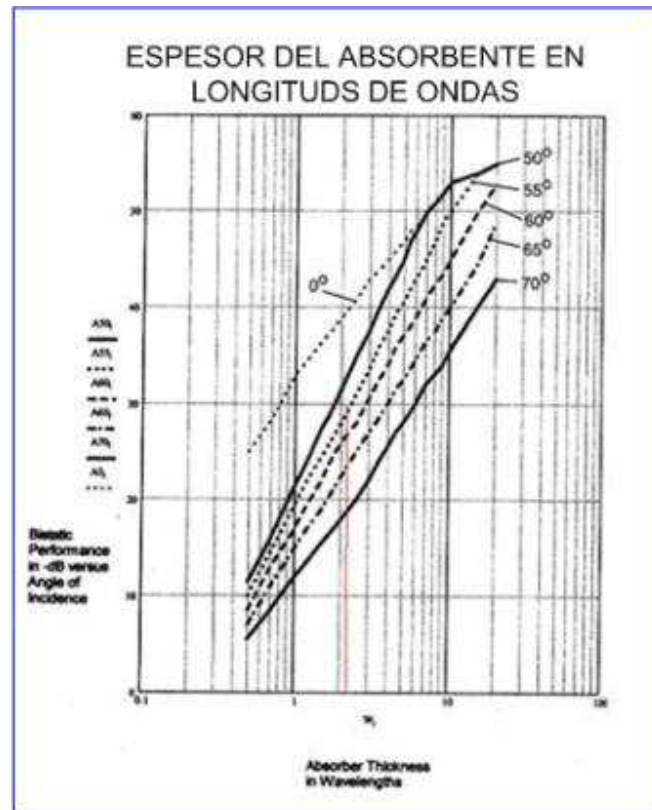


Figura. IV.6. Curvas para encontrar el espesor del absorbente

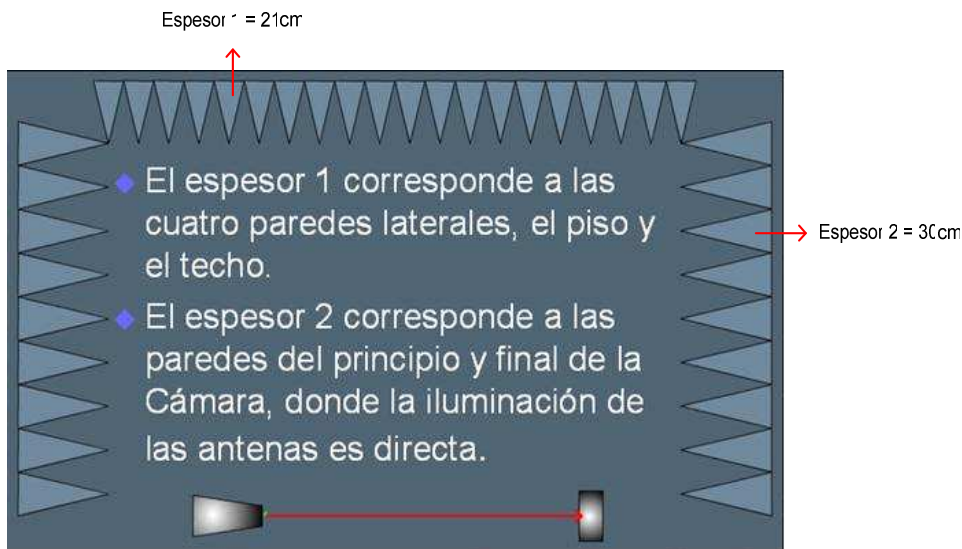
En base a la grafica se puede concluir lo siguiente:

- El factor es de 2.1 longitudes de onda
- Frecuencia de operación alta  $f = 3GHz \rightarrow \lambda = 10cm$

$$\text{Espesor } l = 21 \text{ cm}$$

- Frecuencia de operación baja  $f = 2\text{GHz} \rightarrow \lambda = 15\text{cm}$

*Espesor 2 = 30 cm*



**Figura. IV.7. Espesor de los paneles absorbentes**

#### 4.4.2 Diseño de las Pirámides

El espesor determinado en los cálculos anteriores fue de 21cm para 3GHz y de 30cm para 2GHz. Ahora lo que necesita determinarse es el número de piezas en cada plancha de base  $0.61\text{m} * 0.61\text{m}$  para poder referirnos a la siguiente tabla:

Type	Height, cm (in.)	Weight, kg (lb)	Tips per piece	Normal Incidence Reflectivity, GHz									
				0.12	0.3	0.5	1.0	3.0	6.0	10.0	18.0	36	50
P-4	10.9(4.3)	1.4(3)	144					30	35	42	50	50	50
P-6	15.2(6)	1.6(3.5)	100					32	40	45	50	50	50
P-8	20.3(8)	2.0(4.5)	64				30	37	45	50	50	50	50
P-12	30.5(12)	2.7(6.0)	36				35	40	45	50	50	50	50
P-18	45.7(18)	5.4(12)	16			30	37	40	45	50	50	50	>45
P-24	61(24)	7.7(17)	9		30	35	40	45	50	50	50	50	>45
P-36	91.4(36)	10.9(24)	4		35	37	42	50	50	50	50	50	>45
P-48	121.9(48)	17(38)	2	28	35	40	50	50	50	50	50	50	>45
P-72	182.9(72)	23(50)	1	33	40	45	50	50	50	50	50	50	>45

Tabla. IV.2. Funcionamiento del absorbente piramidal

Como en la tabla de funcionamiento del absorbente piramidal se necesita saber el valor de la masa de cada plancha, a continuación se realiza los correspondientes cálculos.

Las planchas encontradas en el mercado local, tienen una densidad de 14kg/m<sup>3</sup>. Y las dimensiones de estas planchas son de 1.20m \* 1.20m \* 0.24m para las planchas de *espesor 1* y de 1.20m \* 1.20m \* 0.33m para las de *espesor 2*.

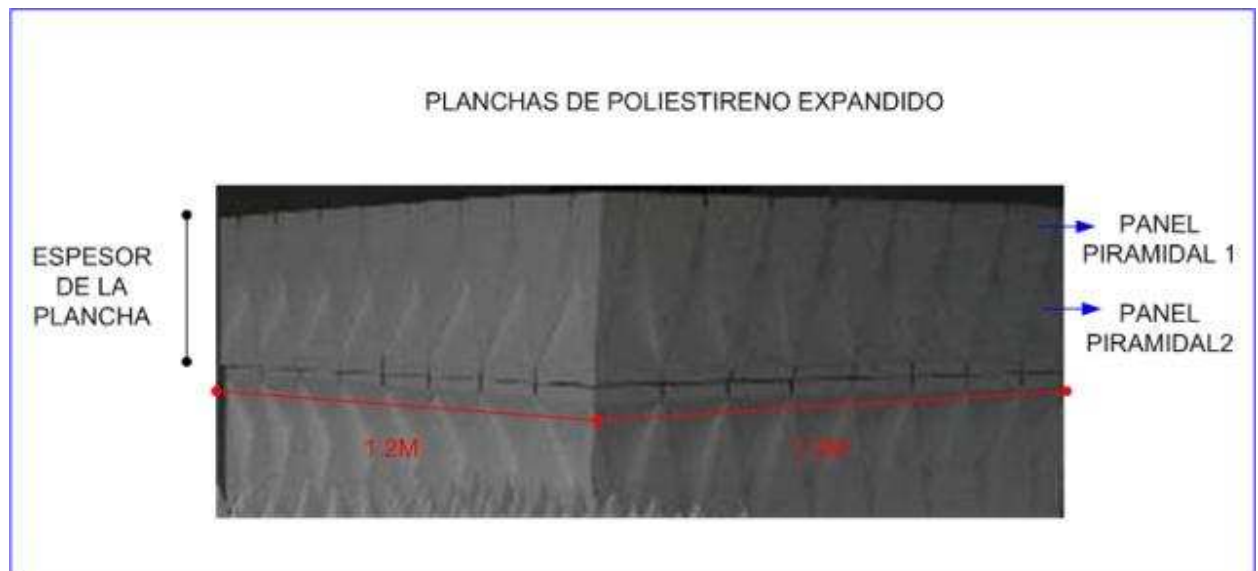


Figura. IV.8. Las planchas de poliestireno expandido contienen dos paneles piramidales

- Para las planchas de  $1.20 * 1.20 * 0.24$ , el volumen es:

$$V_{P1} = base * altura * espesor$$

$$V_{P1} = 1.20m * 1.20m * 0.24m$$

$$V_{P1} = 0.356m^3$$

Para no desperdiciar material, cada una de estas planchas de poliestireno contiene dos paneles piramidales, por lo que cada panel tiene un volumen de  $0.173m^3$ .

- Para las planchas de  $1.20 * 1.20 * 0.33$ , el volumen es:

$$V_{P2} = base * altura * espesor$$

$$V_{P2} = 1.20m * 1.20m * 0.33m$$

$$V_{P2} = 0.475m^3$$

Al igual que las planchas anteriores, cada una de estas contiene dos paneles piramidales, por lo tanto el volumen de cada panel es de  $0.238m^3$ .

- La masa de cada panel piramidal de menor espesor es:

$$m_{P1} = \delta_p * V_{P1}$$

$$m_{P1} = 14Kg / m^3 * 0.173m^3$$

$$m_{P1} = 2.422Kg$$

- La masa de cada panel piramidal de mayor espesor es:

$$m_{P2} = \delta_p * V_{P2}$$

$$m_{P2} = 14Kg / m^3 * 0.238m^3$$

$$m_{P2} = 3.332Kg$$



La masa de carbón que se utiliza en las planchas de menor espesor es de 2.5Kg y para las de mayor espesor es de 3.5Kg. Consiguientemente la masa total de cada panel es de:

$$\begin{aligned} m_{T1} &= m_{P1} + m_{C1} \\ m_{T1} &= 2.422Kg + 2.5Kg \\ m_{T1} &= 4.922Kg \\ c / \text{panel } m_1 &= 2.461Kg \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{T2} &= m_{P2} + m_{C2} \\ m_{T2} &= 3.332Kg + 3.5Kg \\ m_{T2} &= 6.832Kg \\ c / \text{panel } m_2 &= 3.416Kg \end{aligned}$$

Los valores de masa y de espesor del material se asemeja al *tipo P-8* y *P-12* de la tabla I.

Estos valores no son exactos, debido a que estos datos son dados a nivel industrial y nosotros estamos construyendo las pirámides. Es por esto que en nuestro análisis utilizamos la aproximación y comparación con la tabla ya existente en la industria, y que se la encontró en libros, ya que en nuestro país no existe una industria dedicada a fabricar exclusivamente materiales absorbentes de ondas electromagnéticas.

En este diseño el valor de peso de cada panel piramidal es de 2.461kg y de 21 cm de espesor para 3GHz, y el valor de peso es de 3.416kg y de 30cm de espesor para 2GHz.

Como se puede observar de la figura de la tabla anterior, las piezas en cada plancha de base 0.61m \* 0.61m poseen 64 y 36 pirámides. Para saber la longitud de la base se divide el número de pirámides por la base total de la plancha, lo que nos da un número entero aproximado de 10cm para la tipo P-8 y de 15cm para las tipo P-12. En base a esta aproximación se obtiene lo siguiente:

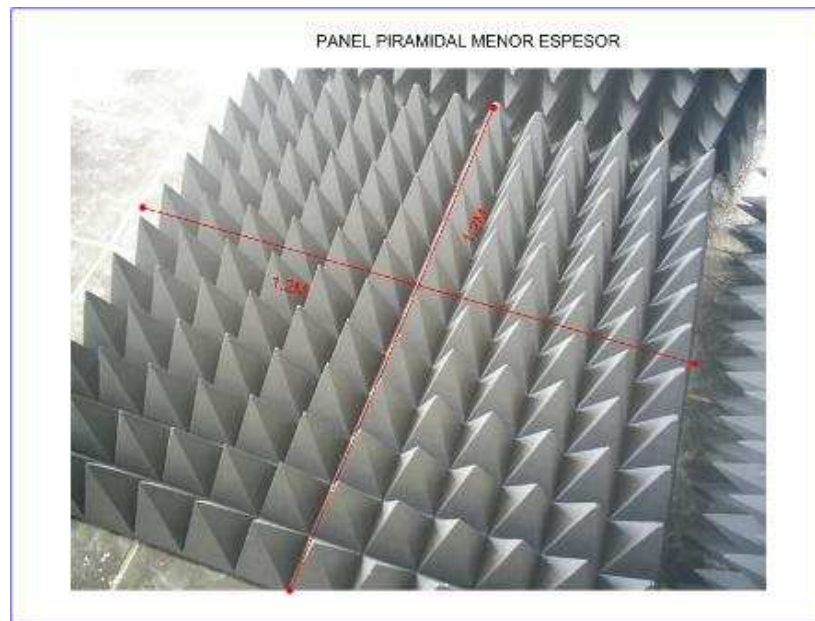
- Para 3GHz el número de pirámides por pieza es de 72 y
- Para 2GHz el número de pirámides por pieza es de 32.

Los paneles que poseemos son de base 1.20 m\* 1.20m, entonces el numero de pirámides será el doble, concluyendo que para los paneles de menor espesor el numero de piezas es 144 y para los paneles de mayor espesor el numero de piezas es 64.

En la siguiente figura se puede observar que la tabla IV.2., enmarca los tipos de absorbentes comparables con los nuestros y para analizar su funcionamiento.

Type	Height, cm (in.)	Weight, kg (lb)	Tips per piece	Normal Incidence Reflectivity, GHz										
				0.12	0.3	0.5	1.0	3.0	6.0	10.0	18.0	36	50	
P-4	10.9(4.3)	1.4(3)	144						30	35	42	50	50	50
P-6	15.2(6)	1.6(3.5)	100						32	40	45	50	50	50
P-8	20.3(8)	2.0(4.5)	64				30	37	45	50	50	50	50	50
P-12	30.5(12)	2.7(6.0)	36				35	40	45	50	50	50	50	50
P-18	45.7(18)	5.4(12)	16			30	37	40	45	50	50	50	50	>45
P-24	61(24)	7.7(17)	9		30	35	40	45	50	50	50	50	50	>45
P-36	91.4(36)	10.9(24)	4		35	37	42	50	50	50	50	50	50	>45
P-48	121.9(48)	17(38)	2	28	35	40	50	50	50	50	50	50	50	>45
P-72	182.9(72)	23(50)	1	33	40	45	50	50	50	50	50	50	50	>45

Figura. IV.9. Comparación de la Tabla. IV.2. del absorbente piramidal



**Figura. IV.10. Paneles piramidales contruidos**

#### **4.4.3 Determinación del área especular**

Para determinar el area especular del absorbente se debe tomar en cuenta que el área a ser cubierta con el absorbente de alto funcionamiento en la región especular de la Cámara Anecoica esta dado en función de:

- La geometría de la Cámara
- La frecuencia de operación más baja
- El funcionamiento del absorbente

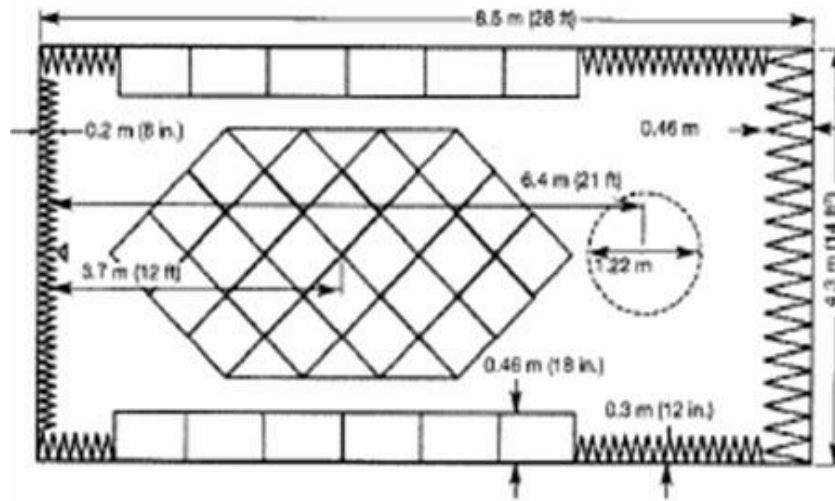


Figura. IV.11. Área especular del absorbente

**4.4.3.1 Análisis de la Zona de Fresnel.** La reflexión de las ondas que iluminan típicamente las superficies de la Cámara es estudiada en términos de “zonas de fase constante” o “zonas de Fresnel” sobre la superficie.

La relación entre la fuente y las alturas ( $h_t$ ,  $h_r$ ), con una separación  $R$  entre las bases de soporte de las antenas, en la superficie de la Cámara es:

$$R_{RD} = \left[ R^2 + (h_r + h_t)^2 \right]^{1/2}$$

Para este caso, las alturas de las antenas y la distancia de separación de las mismas, deben cumplir las condiciones de campo lejano entre las antenas con las paredes de la Cámara y a la vez entre ellas.

Como se calculó anteriormente las alturas son iguales y su valor es de 1.2m, y la distancia entre ellas es de 2.2m.

Reemplazando estos valores en la fórmula anterior tenemos:

$$R_{RD} = [R^2 + (hr + ht)^2]^{1/2}$$

$$R_{RD} = [(2.2m)^2 + (1.2m + 1.2m)^2]^{1/2}$$

$$R_{RD} = 3.256m$$

Por lo tanto la relación entre las alturas de las antenas y la fuente es de 3.256m.

Para pequeños desvanecimientos de longitud de onda, la fase constante en el centro de la región está dado por:

$$\varphi = \tan^{-1}[(hr + ht)/R]$$

Reemplazando nuestros valores en esta fórmula obtenemos:

$$\varphi = \tan^{-1}[(hr + ht)/R]$$

$$\varphi = \tan^{-1}[(1.2m + 1.2m)/2.2m]$$

$$\varphi = 47.49^\circ$$

Si establecemos una coordenada de referencia, como se muestra en la figura siguiente, el parámetro de longitud en cualquier punto (o, y, z) sobre la superficie esta dado por:

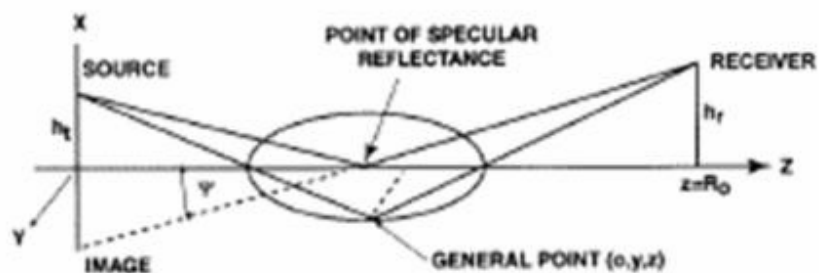


Figura. VI.12. Coordenadas de referencia

$$R_R = [ht^2 + y^2 + z^2]^{1/2} + [hr^2 + y^2 + (R - z)^2]^{1/2}$$

Debido a que  $R_R > R_{RD}$ , la fase del rayo viajero a lo largo de  $R_R$  estará en retraso con respecto a  $R_{RD}$  en  $\Delta\phi$  radianes, donde:

$$\Delta_\phi = 2\pi/\lambda(R_R - R_D)$$

Por definición, el lugar geométrico de los puntos  $(o, y_i, z_i)$  para los cuales:

$$\Delta_{\phi_i} = N\pi, \quad N = 1, 2, 3, \dots$$

o correspondientemente

$$R_{Ri} - R_{RD} = N\lambda/2$$

determina el límite exterior de la N-ésima zona de Fresnel. El límite interno de la N-ésima zona de Fresnel está dado por:

$$R_{Ri} - R_{RD} = (N - 1)\lambda/2$$

Estas definiciones nos dicen que la energía que llega a los puntos de prueba desde el límite exterior de la zona de Fresnel esta en retraso por  $\pi$  radianes de la energía que llega desde el límite interior de la zona.

En una Cámara Anecoica el problema de diseño se da en el centro, largo y ancho del límite exterior de la zona de Fresnel. Los parámetros para su determinación esta dado por:

$$[ht^2 + y^2 + z^2]^{1/2} + [hr^2 + y^2 + (R - z)^2]^{1/2} - [R^2 + (hr + ht)^2]^{1/2} = N\lambda/2$$

Esta fórmula esta reescrita en términos de las dimensiones y coordenadas de la Cámara. Estas expresiones muestran que los sucesivos límites exteriores de la Zona de Fresnel sobre una superficie plana de una cámara describen a un par de elipses, donde el eje mayor esta a lo largo del eje longitudinal de la Cámara. Por definición y para facilidad se ha simplificado la fórmula en las siguientes funciones:

$$\begin{aligned} F_1 &= (N\lambda/2R + \sec(\varphi)) \\ F_2 &= (hr^2 - ht^2)/[(F_1^2 - 1)R^2] \\ F_3 &= (hr^2 + ht^2)/[(F_1^2 - 1)R^2] \end{aligned}$$

Por experiencia se ha demostrado que N=6 es el menor número de la zona de Fresnel que necesita ser cubierta para mantener una buena reflectividad dentro de una Cámara Anecoica.

Reemplazando nuestros valores en estas fórmulas obtenemos:

$$\begin{aligned} F_1 &= (N\lambda/2R + \sec(\varphi)) \\ F_1 &= (6 * 0.15m/2 * 2.2m + \sec(47.49^\circ)) \\ F_1 &= 1.684 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 &= (hr^2 - ht^2)/[(F_1^2 - 1)R^2] \\ F_2 &= (1.2m^2 - 1.2m^2)/[(1.684^2 - 1)2.2m^2] \\ F_2 &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_3 &= (hr^2 + ht^2)/[(F_1^2 - 1)R^2] \\ F_3 &= (1.2m^2 + 1.2m^2)/[(1.684^2 - 1)2.2m^2] \\ F_3 &= 0.324 \end{aligned}$$

Las expresiones que resultan de los parámetros del límite exterior de la N-ésima zona de Fresnel, donde el centro es medido desde la base de la antena de transmisión son:

$$\text{Centro:} \quad C_N = R(1 - F_2) / 2$$

$$\text{Largo:} \quad L_N = RF_1(1 + F_2^2 - 2F_3)^{1/2}$$

$$\text{Ancho:} \quad W_N = R[(F_1^2 - 1)(1 + F_2^2 - 2F_3)]^{1/2}$$

Por lo tanto, reemplazando nuestros valores obtendremos las siguientes medidas:

$$C_N = R(1 - F_2) / 2$$

$$C_N = 2.2m(1 - 0) / 2$$

$$C_N = 1.1m$$

$$L_N = RF_1(1 + F_2^2 - 2F_3)^{1/2}$$

$$L_N = 2.2m * 1.684(1 + 0 - 2 * 0.324)^{1/2}$$

$$L_N = 2.198m$$

$$W_N = R[(F_1^2 - 1)(1 + F_2^2 - 2F_3)]^{1/2}$$

$$W_N = 2.2m[(1.684^2 - 1)(1 + 0 - 2 * 0.324)]^{1/2}$$

$$W_N = 1.768m$$

Debido a que en la práctica las superficies dentro de una Cámara Anecoica no son realmente planas, y las longitudes de onda de las frecuencias de microonda no satisfacen las condiciones geométricas ópticas, las expresiones no son exactas. Sin embargo, estas pueden dar una idea de las dimensiones dentro de la Cámara.



## 4.5 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA

El proceso de construcción fue crítico y complejo, a continuación se presenta fotografías que describen paso a paso, todas las etapas del mismo.

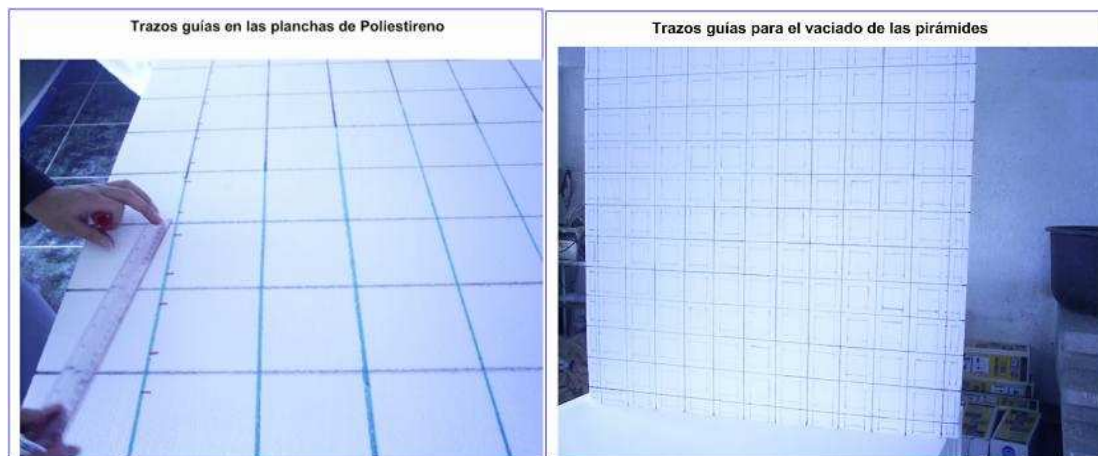
Como se menciona en el capítulo III, el material más óptimo encontrado en el mercado local es el poliestireno expandido, la fábrica donde adquirimos el material se llama Poliexpandidos, las estudiantes responsables del proyecto realizaron moldes y llegaron a acuerdos con los fabricantes para poder obtener la forma piramidal.



**Figura. IV.13. Material sin procesar utilizado en las pruebas de material, y planchas sin tratar utilizadas para la construcción.**

#### 4.5.1 Proceso de Tratamiento del Material

**4.5.1.1 Vaciado de las Pirámides.** Las Planchas deben ser llenadas de carbón activado en polvo, por lo que el primer paso fue vaciar las pirámides para posteriormente rellenarlas de una mezcla de carbón activado en polvo con gránulos de poliestireno expandido



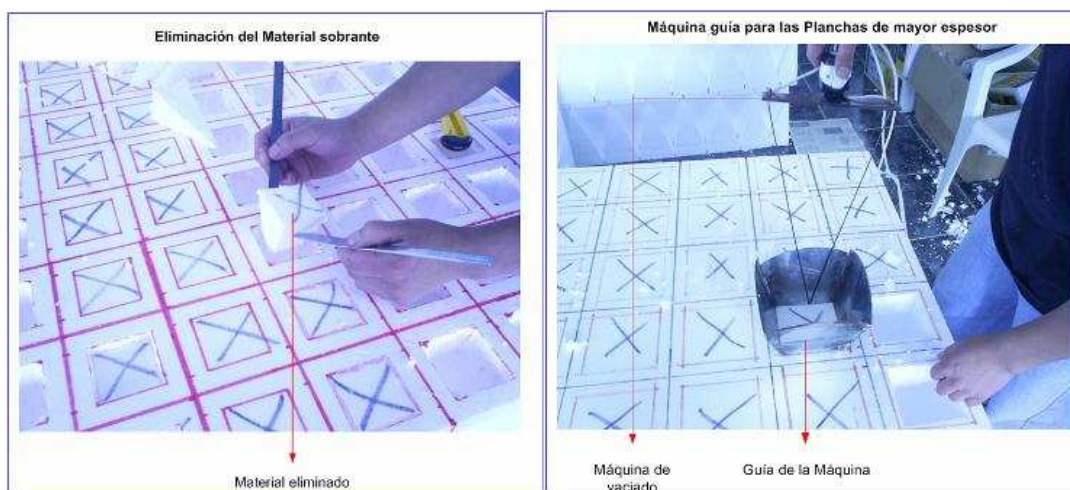
**Figura. VI.14. Trazos guías en la parte posterior de las planchas**

Debido a la cantidad de planchas utilizadas, requerimos utilizar una maquina con su respectiva guía dentro del proceso de vaciado, tratando de estandarizarlo, la maquina era un simple cortocircuito controlado con un interruptor, el calor generado hace que el material ceda, en las siguientes fotografías se puede apreciar este proceso.



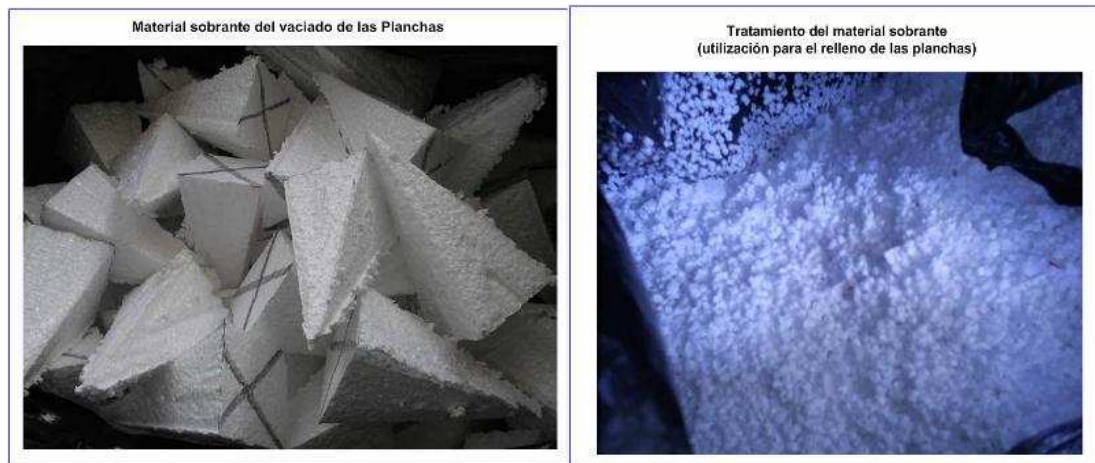
**Figura. IV.15. Vaciado de las Pirámides**

Se utilizó tres máquinas, debido a que la Cámara posee dos espesores, se necesitó de varias guías de dos dimensiones diferentes. De este proceso se obtuvo material sobrante, el cual posteriormente fue reutilizado en la mezcla de carbón con la que se rellenarán las planchas.



**Figura. IV.16 Material sobrante**

**4.5.1.2 Relleno de las planchas.** El material sobrante del proceso de vaciado de las pirámides fue granulado para posteriormente mezclarlo con el carbón activado.



**Figura. IV.17. Material sobrante granulado**

Como fue mencionada en el capítulo III el material absorbente es el carbón, el cual fue adquirido en la Casa de los Químicos, para conseguir que el carbón se active, este fue sometido a un proceso de calentamiento en un horno industrial, a una temperatura de 150 grados durante un periodo de dos horas.



**Figura. VI.18. Activación del Carbón**

El proceso fue realizado de manera generalizada, es decir que la cantidad de carbón fue exactamente la misma para todas las planchas de poliestireno expandido, la medida es 2.5Kg por cada plancha, y 3.5Kg para las más gruesas. La mezcla con la que fueron rellenas las pirámides contiene carbono activado en polvo y gránulos de poliestireno expandido.



**Figura. IV.19. Medida del Carbón**



**Figura. IV.20. Mezcla Carbón - Poliestireno**

**4.5.1.3 Cubrimiento de las planchas.** Las planchas de poliestireno expandido, luego del proceso de llenado con la mezcla de carbón activado, son cubiertas con planchas de poliestireno expandido, al principio utilizamos pequeñas tapas para recubrir cada pirámide, pero para optimizar este proceso las demás planchas fueron recubiertas con una sola tapa grande de poliestireno. La goma utilizada para el pegado de las tapas en las planchas de poliestireno se llama “Atex”, la cual es una pega especial para trabajos con poliestireno y es la más adecuada para los requerimientos de la Cámara disponible en el mercado local.



Figura. IV.21. Cubrimiento de las planchas y goma utilizada

**4.5.1.4 Pintado de las planchas.** La pintura utilizada satisface los requerimientos definidos en el capítulo III.



Figura. IV.22. Planchas pintadas terminadas de procesar

## 4.5.2 Construcción de la Jaula de Faraday

Las cámaras anecoicas evitan las interferencias electromagnéticas externas mediante apantallamiento metálico, esto se lo consigue con la Jaula de Faraday, a continuación se puede apreciar el proceso de construcción de la misma.

**4.5.2.1 Construcción de la estructura de madera.** La estructura de la cámara es de madera, la cual soportara internamente las planchas del material absorbente de ondas electromagnéticas y externamente sus paredes serán forradas con aluminio.

Se realiza el *cercado de la Cámara* para dar protección, controlar el ambiente electromagnético dentro de la Cámara, desempeñando la función básica de prevenir interferencia.

Una variedad de protecciones de cercado pueden ser usadas para controlar el ambiente de prueba. Materiales comúnmente usados en la construcción de cercados son los siguientes: paneles de madera laminados en uno o ambos lados, con varios grados de láminas de metal galvanizado, otra opción, el papel aluminio es instalado con adhesivo de contacto. En nuestro proyecto se utilizó el producto comercial local denominado “alumband” el cual posee láminas de aluminio y adhesivo de brea. De estas bandas de aluminio fue forrada la estructura de madera.

Se realizó una estructura de vigas de madera, y se utilizo planchas de aglomerado para formar las paredes, el techo y el piso. El armazón de la cámara se lo puede observar en las siguientes fotografías.





**Figura. IV.23. Estructura de madera de la Cámara**

**4.5.2.2 Recubrimiento de aluminio.** Las láminas de aluminio, “alumband”, se colocaron alrededor de la estructura de madera y se tomo especial cuidado en el techo y piso por la complicación del contacto del material en las esquinas, para mantener cerrado el circuito de la Jaula de Faraday.

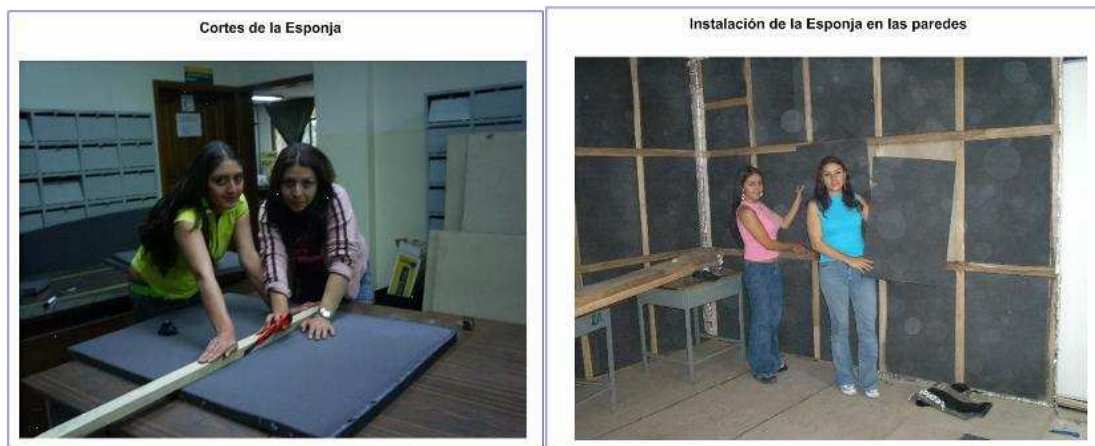


**Figura. IV.24. Bandas de Aluminio para recubrir la parte externa de las paredes**



**Figura. IV.25. Colocación de las bandas de aluminio**

**4.5.2.3 Recubrimiento de Polietileno.** Entre las uniones de las vigas de madera se colocó polietileno de 30mm de espesor de alta densidad, la cual también posee características absorbentes de ondas, especialmente para aislar las interferencias acústicas provenientes del exterior y del interior.



**Figura. IV.26. Cortes de las planchas de polietileno**



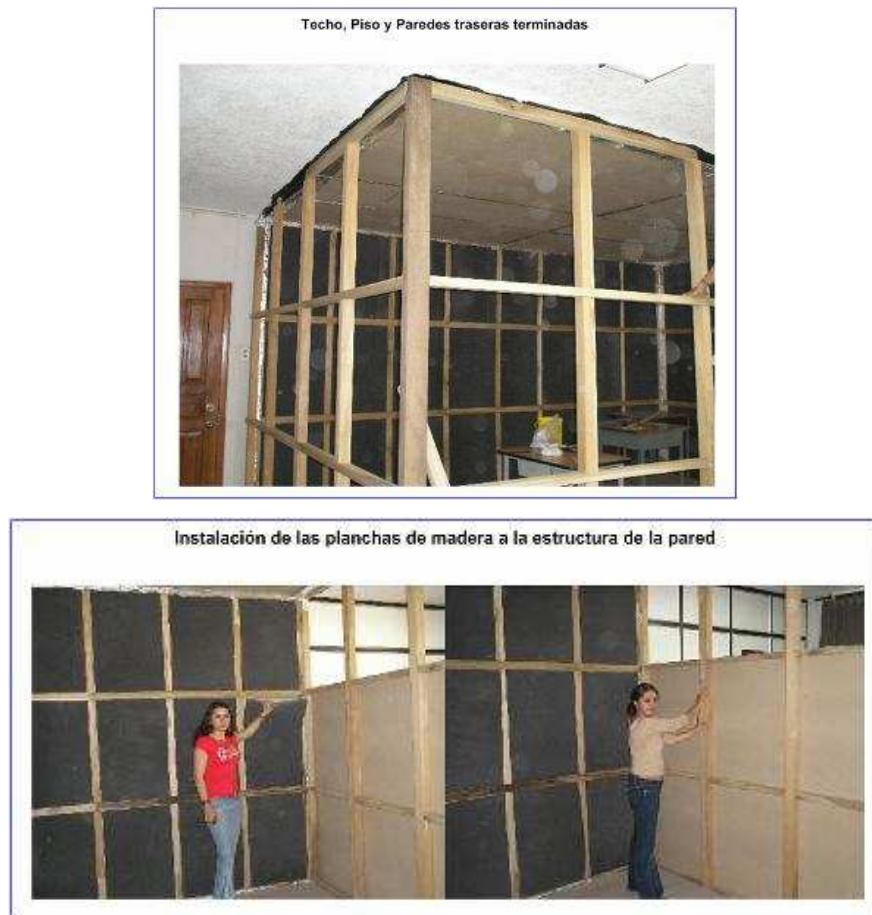
Figura. IV.27. Colocación de las planchas de polietileno

**4.5.2.4 Instalaciones Internas.** Bajo el piso de la Cámara entre las esponjas, se colocó mangueras, para que por estas pasen las guías de onda o cable coaxial que conectan las antenas con los equipos y los cables del control del rotor que gira la antena bajo prueba. La Cámara también posee dos salidas para iluminación y para su cableado se utilizó las instalaciones existentes dentro de la habitación donde se llevo a cabo la construcción de la Cámara.



Figura. IV.28. Instalaciones en el piso de la Cámara

**4.5.2.5 Última etapa de la Estructura de Madera.** Una vez colocadas las paredes posterior y lateral, junto con el techo y el piso, debidamente forradas de aluminio se colocó las planchas de aglomerado faltantes para terminar de sellar la caja de madera.



**Figura. IV.29. Instalación de las paredes laterales faltantes**

**4.5.2.6 Recubrimiento interno de la Estructura de madera.** La siguiente capa interna que se colocó fue planchas de MDF, estas cubrieron la capa de esponja, consiguiendo así una superficie lisa lista para colocar las planchas de poliestireno. Todo lo realizado hasta este momento es con el fin de aislar el interior de la cámara, y así evitamos señales no

deseadas. A continuación se muestra la entrada de la caja de madera, el techo y las paredes internas de la misma.



**Figura. IV.30. Interior de la Cámara sin el material absorbente**

**4.5.2.7 Colocación del Material absorbente.** Para evitar las reflexiones internas dentro de la Cámara Anecoica, se coloca planchas de material absorbente de ondas electromagnéticas, el cual fue analizado en el capítulo III.

La etapa más crítica, fue la colocación del techo, para esto se utilizó pega epóxica, la cual es la mezcla de dos componentes, resina más catalizador, los cuales deben ser mezclados en pequeñas cantidades para que la reacción química, no permita que se cristalice de manera inmediata la solución. El proceso de secado de la goma dura

aproximadamente una hora y media, en la siguiente fotografía se puede apreciar la colocación del techo.



**Figura. IV.31. Colocación del material absorbente en el techo de la Cámara**

Para colocar las planchas de las paredes se utilizó la goma atex junto con la goma epóxica en los bordes de las planchas, para el piso se utilizó goma atex. Debido a que las gomas son fuertes, se necesitó tomar precauciones, utilizar guantes, mascarillas brocas, etc.



**Figura. IV.32. Gomas y materiales utilizados en el proceso de pegado**

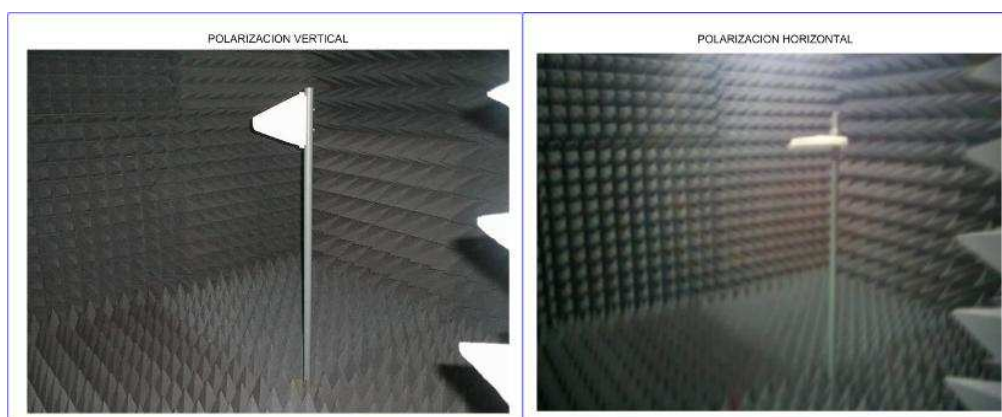
Los mástiles donde se colocan las antenas, son de PVC, para que no afecten las mediciones, y sus bases están recubiertas con esponja.

En las siguientes fotografías se puede observar el interior de la Cámara anecoica, la antena patrón LPDA y la antena espiral bajo prueba utilizada en este proyecto.



**Figura. IV.33. Línea de vista entre las antenas en el interior de la Cámara**

Los mástiles tiene la alternativa de soportar a la antena en polarización horizontal y polarización vertical.



**Figura. IV.34. La antena patrón en polarización vertical y horizontal**





**Figura. IV.35. Antena espiral bajo prueba**



**Figura. IV.36. Camino desmontable para acceder a las antenas**



**Figura. IV.37. Etapa final del proceso de construcción**

**4.5.2.8. Ubicación de los Equipos.** Ubicación de los equipos utilizados, el analizador de espectros conectado a la antena bajo prueba y el analizador de redes RF conectado a la antena patrón. En esta etapa soldamos los conectores necesarios para conectar los equipos y colocamos canaletas para las guías. Los equipos se encuentran ubicados en el exterior de la Cámara, como se puede apreciar a continuación.



**Figura. IV.38. Ubicación de los equipos**

## CAPÍTULO V

### ADQUISICIÓN DE DATOS EN LA CÁMARA ANECOICA

Existen diversas formas de Cámaras Anecoicas, cada una de estas dependen de las frecuencias de trabajo. Se pueden encontrar grandes construcciones para frecuencias altas y pequeñas construcciones para frecuencias bajas. El rango de frecuencias de trabajo para la Cámara Anecoica diseñada es de 2 a 3 GHz, frecuencias relativamente pequeñas, por lo que la cámara también lo es. El tamaño de las cámaras determinan el tipo de pruebas que se pueden realizar dentro de ellas, para cámaras pequeñas las pruebas son específicamente sobre antenas.

En este capítulo se analiza las pruebas realizadas en el espacio libre OATS y dentro de la Cámara Anecoica y se compara los resultados obtenidos en estos dos lugares. Los datos de la señal de la antena fuente serán generados mediante un equipo generador de redes RF de hasta 3GHz (AGILENT 8714ET/ES), y obtenidos mediante un analizador de espectros.

Los datos conseguidos de las pruebas servirán para realizar, principalmente, diagramas de radiación. Para obtener estos diagramas se hace girar a la antena bajo prueba un ángulo de 360° segmentado en 10°, esto se logra mediante un rotor de giro colocado en el mástil de la antena fuente. Cada 10° se tomará un valor de la señal que estará dado en dBm y servirá para los bosquejos de los diagramas de radiación de las antenas bajo prueba.

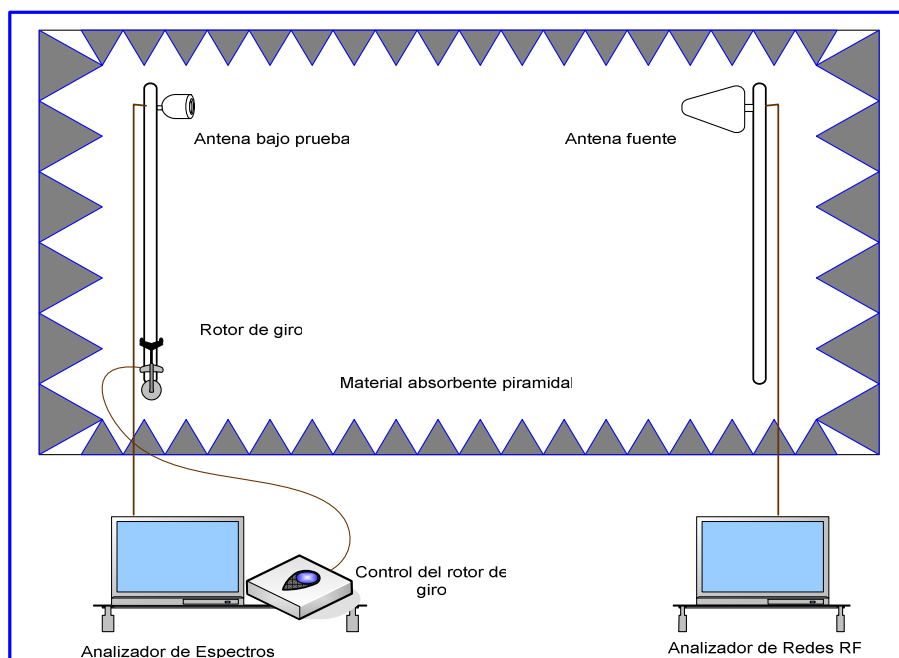
Es importante tener en cuenta que el resultado de los diagramas de radiación dependerá del diseño de la Cámara y de los elementos de mediación (antenas, cables, conectores, etc.). Con lo que se determina la atenuación de la señal dentro y fuera de la cámara y de cada uno de estos componentes.

## 5.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y POSICIONAMIENTO

Un buen sistema de adquisición de datos y posicionamiento para una Cámara Anecoica asegurará que los datos que se tomen dentro de ella sean los más óptimos y que se puedan realizar diferentes pruebas con los elementos que se encuentran dentro de ella.

Los componentes dentro de la Cámara Anecoica son dos antenas, la patrón y la bajo prueba, que se encargan de generar y recibir la señal. Además de estas, se encuentra un rotor de giro con el cual la antena bajo prueba podrá girar 360° con la finalidad de sacar los diagramas de radiación en el rango de 2 a 3 GHz.

Los elementos fuera de la Cámara son los equipos de adquisición de datos, es decir el analizador de redes RF, el cual genera la señal, y el analizador de espectros, receptor de la señal. Además esta el control del rotor, con el cual se puede mover la antena a cualquier valor deseado de giro.



**Figura. V.1. Sistema de adquisición de datos y posicionamiento de la Cámara Anecoica**

Para generar la señal en el rango de 2 a 3 GHz se utiliza un analizador de redes RF de marca Agilent 8714ET/ES, figura V.2. Este analizador trabaja en el rango de 300 MHz a 3 GHz, cumpliendo la condición establecida del diseño. Este analizador es un elemento que realiza diversas funciones, en el caso de la Cámara sirve para generar la señal a una frecuencia y nivel de potencia deseado. Es por este motivo que el analizador está conectado a la antena fuente.



**Figura. V.2. Analizador de Redes RF Agilent 8714ET/ES**

Para la adquisición de los datos se utiliza un analizador de espectros marca Tektronix modelo 2792, el cual se encuentra conectado a la antena bajo prueba y recibe los niveles de señal que la antena fuente envía, figura V.3.



**Figura. V.3. Analizador de Espectros**

Otro elemento importante es el posicionador de la antena, ya que por medio de él se puede girar la antena al ángulo que se desee, en un área de  $360^\circ$ . Este procedimiento es utilizado especialmente para la obtención de diagramas de radiación. Este dispositivo consta de 2 partes, la primera es un rotor conectado al mástil de la antena bajo prueba dentro de la cámara. El otro es el controlador que se encuentra fuera para que se pueda girar la antena en un radio de  $360^\circ$  por medio del rotor.



**Figura. V.4. Sistema posicionador de la antena bajo prueba**

## 5.2 PRUEBAS EN EL ESPACIO LIBRE OATS

Como es de conocimiento, las Cámaras Anecoicas simulan las condiciones de Espacio Libre. Por este motivo las primeras pruebas se hicieron en el OATS, para poder comparar después con las pruebas dentro de la Cámara.

Se hicieron dos tipos de pruebas. La primera consistió en poner la antena fuente y la antena bajo prueba a una altura de 1.2 metros, igual a la altura de los mástiles dentro de la Cámara. En el piso se dibujó un círculo dividido en  $5^\circ$ , para poder posicionar la antena bajo prueba en cada ángulo hasta obtener todas las medidas en un radio de  $360^\circ$ . Como se indica en la figura V.5.



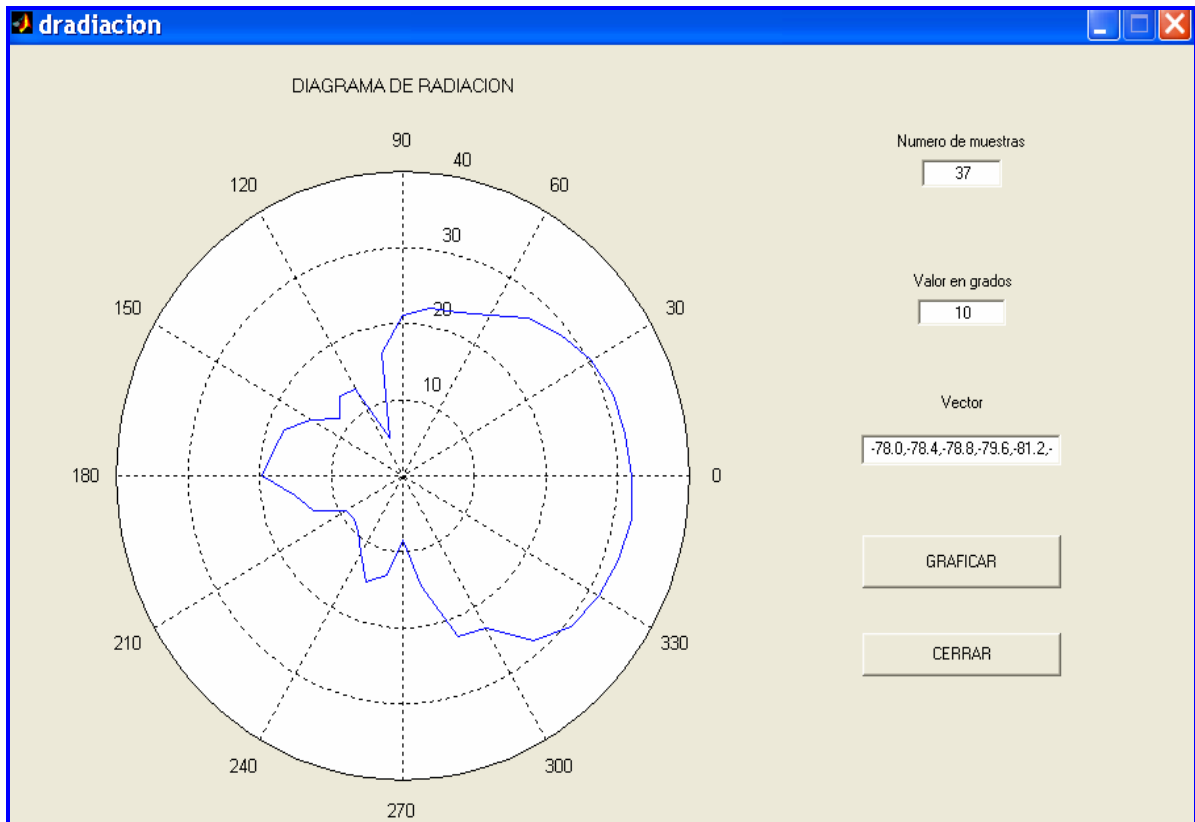
**Figura. V.5. Guía de la antena para recolección de datos cada 5°**

Al realizarse estas pruebas a esta altura, se tuvieron varios problemas debido a la atenuación causada por el piso, las paredes y árboles aledaños al lugar de pruebas. Los diagramas de radiación de este tipo de prueba se muestran a continuación.

Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-78	80	-87,6	160	-92,4	240	-98,4	320	-79,2
10	-78,4	90	-88,8	170	-91,6	250	-95,2	330	-78,4
20	-78,8	100	-93,6	180	-90,4	260	-96,8	340	-78
30	-79,6	110	-104,8	190	-94,8	270	-101,6	350	-77,6
40	-81,2	120	-96,8	200	-96,8	280	-95,2	360	-78
50	-82,8	130	-96,4	210	-100,8	290	-87,6		
60	-85,6	140	-98,4	220	-101,2	300	-86,8		
70	-87,2	150	-95,2	230	-100,4	310	-81,6		

**Tabla. V.1. Datos obtenidos para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 1.2m**





**Figura. V.6. Diagrama de radiación para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 1.2m**

El segundo tipo de pruebas tenía que mejorar las atenuaciones que se daban a la altura de 1.2m, por este motivo se levantaron mástiles de 3m para que las pruebas siguientes tengan menor atenuación y se asemejen más a las condiciones de espacio libre. La figura V.7. muestra la preparación de los materiales para la realización de esta prueba.



**Figura. V.7. Colocación de las antenas a 3m de altura**

Luego de la colocación de las antenas a la altura deseada, se dispuso a su respectiva alineación, cumpliendo con las condiciones de campo lejano. Y conectando cada una de ellas a los equipos de adquisición de datos como se muestra en la figura V.8.



**Figura. V.8. Alineación de las antenas a 3m de altura**

Los mástiles de las antenas tenían en su base un círculo pequeño dividido en  $5^\circ$  para la adquisición de los datos. La antena bajo prueba iba girando cada  $5^\circ$  y con el analizador de espectros se tomaba el valor de la señal, figura. V.9. Los resultados obtenidos fueron mejores debido a que las atenuaciones eran menores, por lo que los diagramas de radiación se acercaban más a los diagramas dados por el fabricante de la antena.



**Figura. V.9. Adquisición de datos**

Las tablas V.2. y V.3. muestran los datos tomados en estas pruebas, y en las figuras V.10. y V.11. se pueden observar los diagramas de radiación obtenidos. Las características y los diagramas de radiación de las antenas dadas por los fabricantes se muestran en el Anexo 3.

Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-45,2	75	-52	150	-64	225	-64	300	-50,8
5	-45,2	80	-52	155	-63,2	230	-66	305	-49,2
10	-45,2	85	-53,2	160	-62	235	-66,4	310	-48,8
15	-44,8	90	-54	165	-62	240	-62	315	-48
20	-45,2	95	-55,6	170	-62,2	245	-59	320	-46,8
25	-45,6	100	-58,6	175	-62,3	250	-58,4	325	-47,2
30	-46	105	-58	180	-65	255	-58,2	330	-46,4
35	-46,8	110	-60	185	-64	260	-58,4	335	-46
40	-47,2	115	-70	190	-66	265	-57,8	340	-45,6
45	-47,2	120	-68	195	-69	270	-56,8	345	-45,6
50	-48,3	125	-67	200	-67	275	-56,4	350	-45,2
55	-49,2	130	-65	205	-64	280	-55,2	355	-45,2
60	-49,6	135	-67	210	-62	285	-52,8	360	-44,8
65	-50	140	-66	215	-66	290	-51,6		
70	-51,5	145	-65	220	-66	295	-51,2		

**Tabla. V.2. Datos obtenidos para una frecuencia de 2GHz con mástiles de 3m**

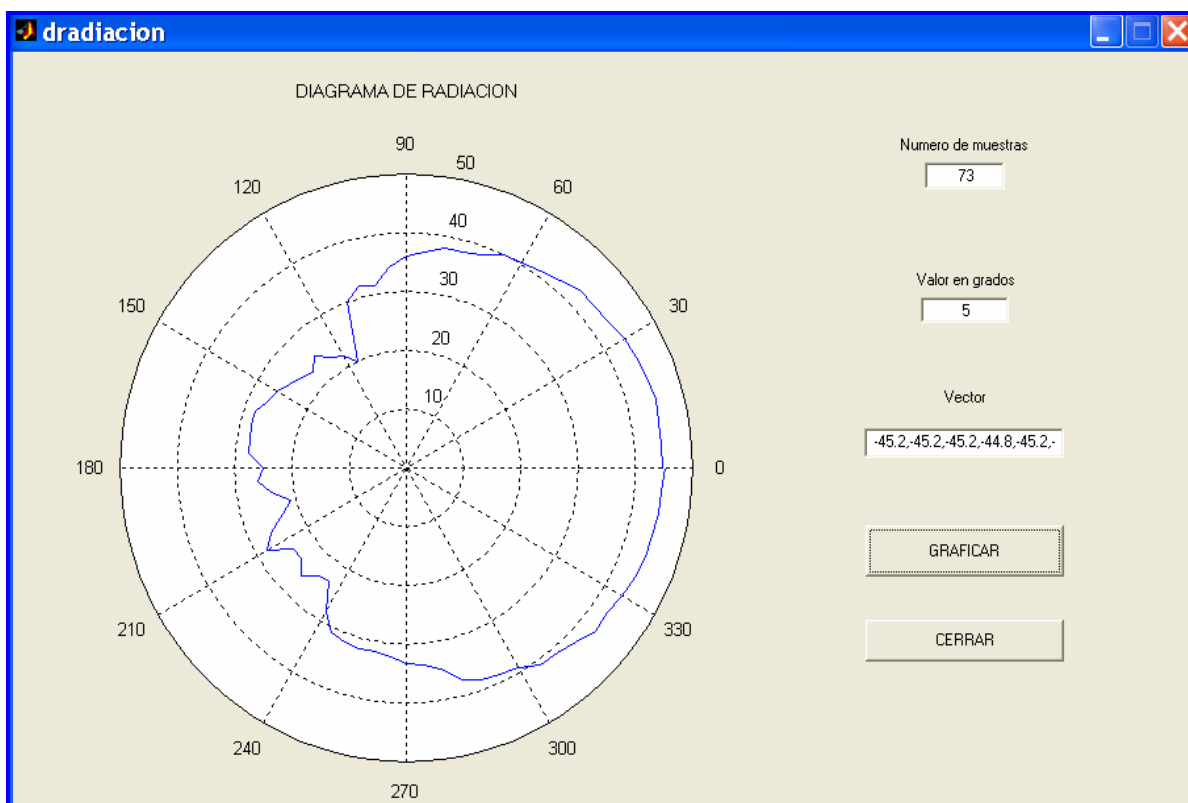


Figura. V.10. Diagrama de radiación para una frecuencia de 2GHz con mástiles de 3m

Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-48	75	-54,8	150	-66,4	225	-67,2	300	-53,6
5	-47,2	80	-54,8	155	-69,2	230	-68,4	305	-53,2
10	-48	85	-56,4	160	-65,2	235	-69,2	310	-52,4
15	-48	90	-56,8	165	-66,8	240	-69,2	315	-52,8
20	-48,4	95	-57,2	170	-66	245	-68	320	-52,8
25	-48,8	100	-60	175	-65,2	250	-65,6	325	-51,2
30	-48,8	105	-61,2	180	-65,6	255	-64,4	330	-50
35	-49,2	110	-64	185	-66,4	260	-62,8	335	-49,2
40	-50	115	-64,4	190	-66,8	265	-61,6	340	-48,8
45	-51,2	120	-69	195	-67,2	270	-59,6	345	-48,8
50	-50	125	-70	200	-67,6	275	-57,2	350	-48,8
55	-50,4	130	-70,8	205	-65,6	280	-56,4	355	-48,8
60	-52,4	135	-70,4	210	-64,8	285	-55,2	360	-48,8
65	-51,6	140	-70,8	215	-64,8	290	-54,8		
70	-54	145	-70	220	-66,4	295	-54,4		

Tabla. V.3. Datos obtenidos para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 3m

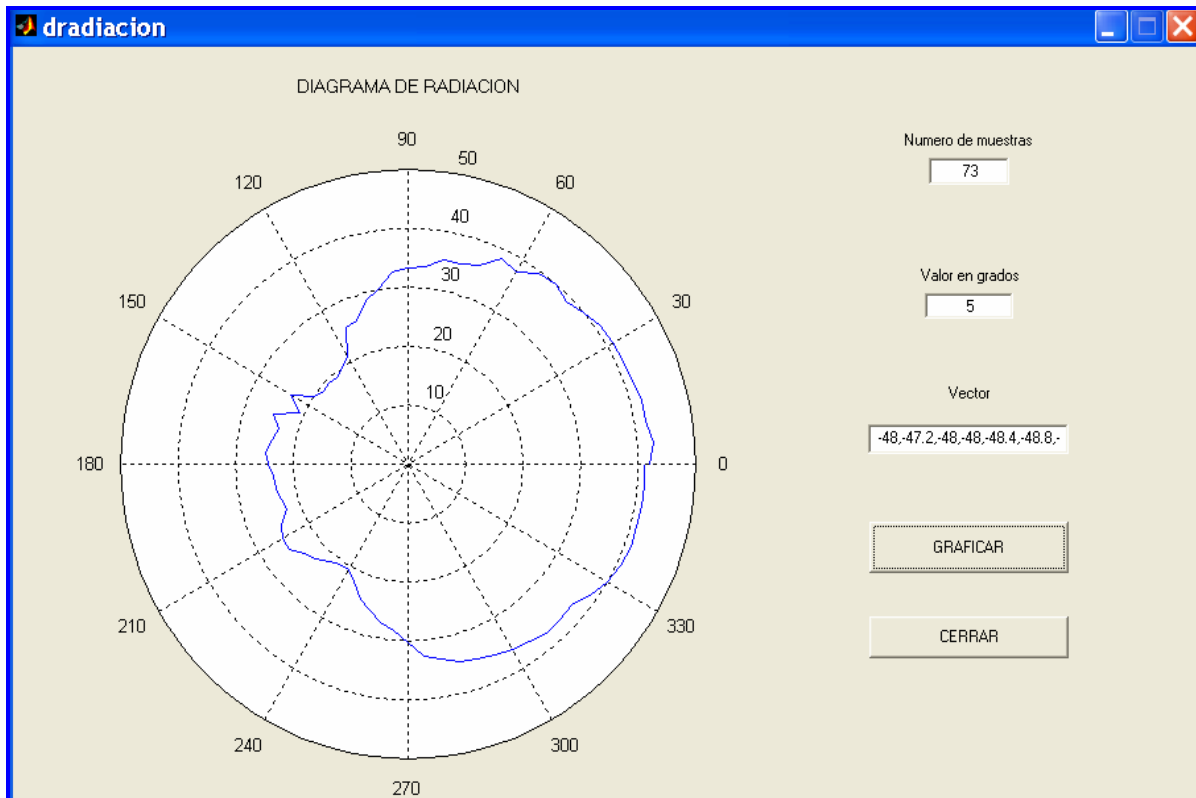


Figura. V.11. Diagrama de radiación para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 3m

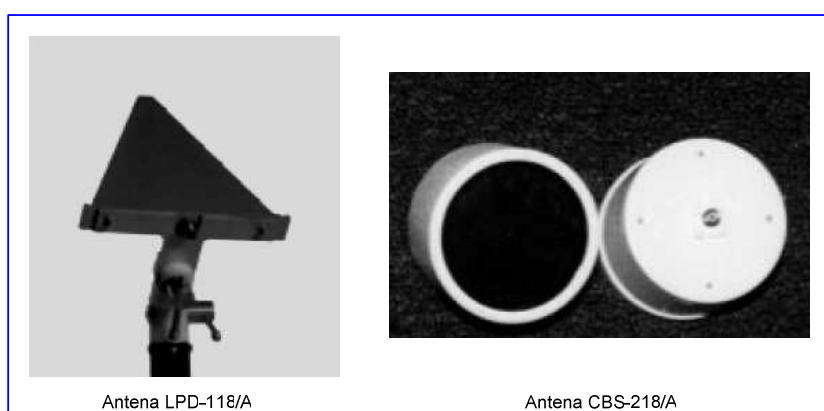
### 5.3 PRUEBAS EN LA CÁMARA ANECOICA DE LA FIE

Las pruebas realizadas dentro de la Cámara Anecoica de la FIE tienen como objetivo asemejarse a las pruebas realizadas en el espacio libre, ya que de este modo se comprobará que las atenuaciones dentro de la cámara son mínimas, y que se está cumpliendo con las condiciones previstas en el diseño.

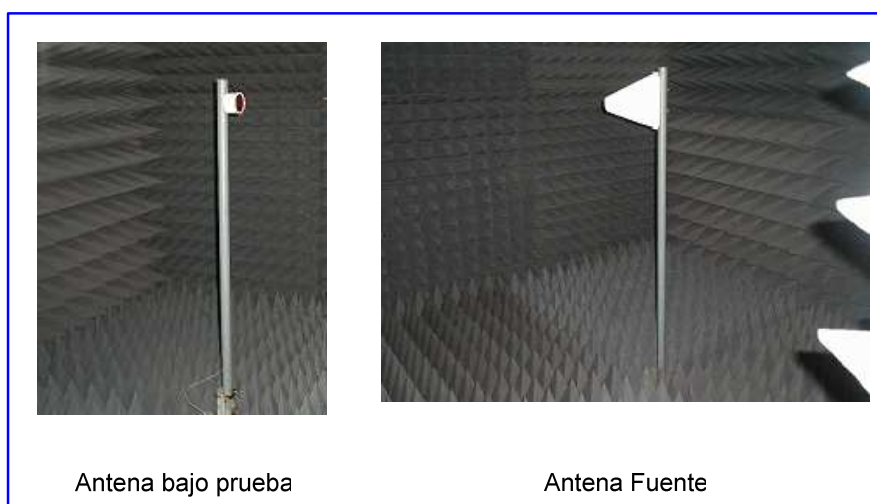
Para la adquisición de datos dentro de la cámara, se hizo rotar la antena bajo prueba. El controlador del rotor tiene un signo cada 10° para facilitar el trabajo del usuario, y de este modo posicionar la antena en el ángulo deseado.

Al iniciar las pruebas, se tuvieron varios problemas debido a la atenuación que los conectores y el cable producen. Para solucionar este factor se cambiaron los conectores y de este modo la señal recibida tuvo menores pérdidas.

Debido a que no se dispone de varias antenas para pruebas, estas solo se realizaron en dos espirales tipo CBS-218/A y una LPDA tipo LPD-118/A. Primero se tomó como antena fuente a la LPDA y la espiral fue la antena bajo prueba.



**Figura. V.12. Antena LPD-118/A y Antena CBS-218/A utilizadas para pruebas en la cámara**



**Figura. V.13. Antena LPDA como fuente y Antena espiral como prueba**

Los datos de esta primera prueba se pueden observar en las tablas V.4. y V.5. y representados en las figuras V.14. y V.15.

Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-53,2	80	-56,4	160	-64,8	240	-58	320	-50,4
10	-53,2	90	-55,2	170	-67,6	250	-56	330	-50,8
20	-53,2	100	-56	180	-62,8	260	-55,2	340	-51,6
30	-53,6	110	-57,6	190	-59,2	270	-53,6	350	-52
40	-54,8	120	-59,6	200	-58,8	280	-52,8	360	-52
50	-58,8	130	-73,2	210	-58,8	290	-51,6		
60	-64,8	140	-66,4	220	-59,6	300	-50,8		
70	-60	150	-62,4	230	-59,6	310	-50,8		

Tabla. V.4. Datos obtenidos para 2GHz con antena LPDA en posición vertical

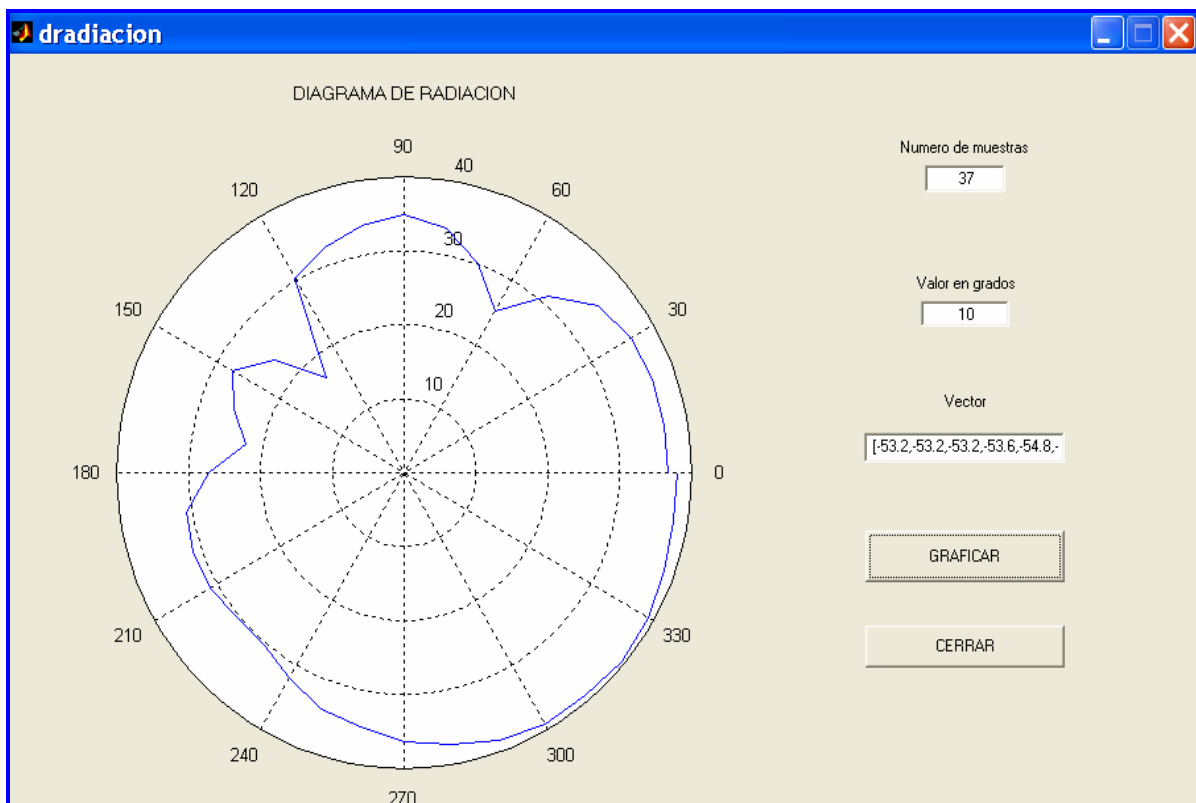


Figura. V.14. Diagrama de radiación para 2GHz con antena LPDA en posición vertical



Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-51,6	80	-60,8	160	-64,4	240	-65,2	320	-52,4
10	-51,6	90	-62	170	-64,4	250	-64,8	330	-52
20	-52	100	-64,4	180	-65,2	260	-66	340	-51,6
30	-53,2	110	-72,8	190	-67,6	270	-67,2	350	-51,6
40	-53,6	120	-65,6	200	-69,6	280	-65,2	360	-51,6
50	-55,2	130	-64,8	210	-72,8	290	-59,6		
60	-57,6	140	-66	220	-70,8	300	-55,6		
70	-60	150	-66	230	-67,2	310	-54,4		

Tabla. V.5. Datos obtenidos para 3GHz con antena LPDA en posición vertical

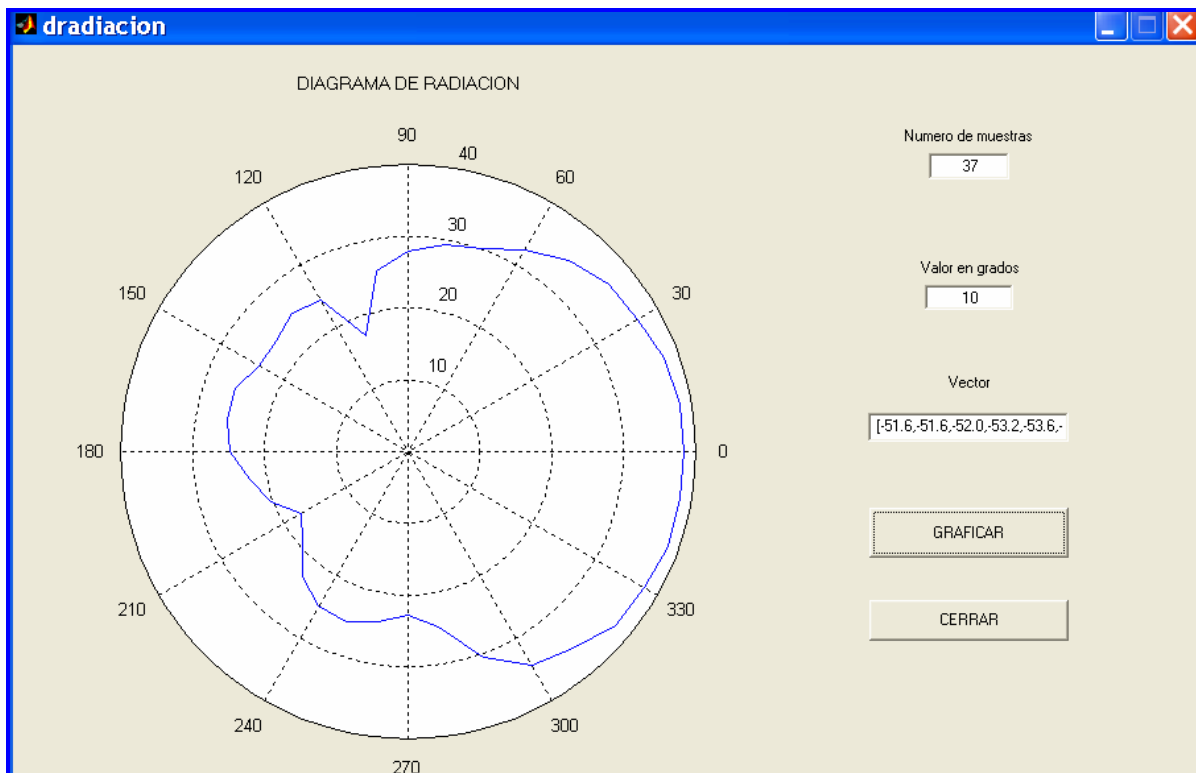
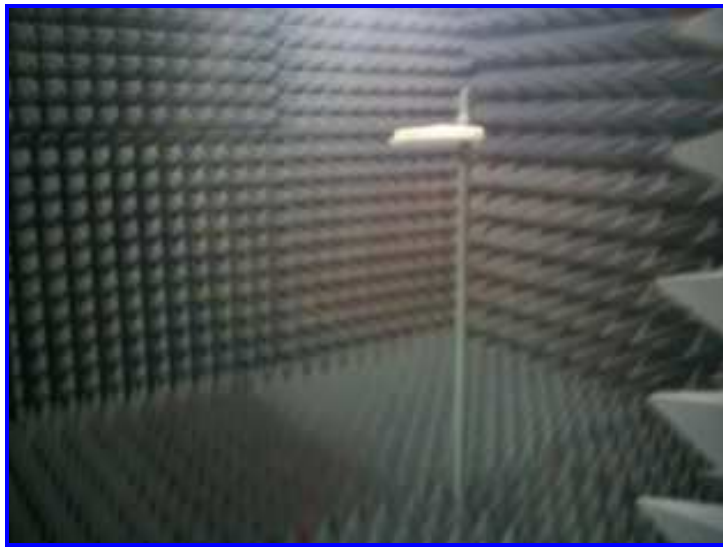


Figura. V.15. Diagrama de radiación para 3GHz con antena LPDA en posición vertical

La segunda prueba realizada fue cambiar de posición vertical a posición horizontal la antena fuente LPDA, como se muestra en la figura V.16. La antena bajo prueba no sufrió ningún cambio. Los datos obtenidos se muestran en la tabla V.6 y V.7 y representados en las figuras V.17. y V.18.



**Figura. V.16. Antena LPDA como fuente en posición horizontal**

Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-48,4	80	-51,6	160	-70	240	-64,4	320	-52
10	-48,8	90	-54,4	170	-61,6	250	-66	330	-51,6
20	-48,4	100	-58,4	180	-59,6	260	-64,4	340	-50
30	-48,4	110	-62	190	-58,8	270	-59,6	350	-48,8
40	-48,8	120	-62,4	200	-60,4	280	-54,4	360	-48,4
50	-49,2	130	-62,4	210	-61,6	290	-52,8		
60	-49,6	140	-64,8	220	-62,4	300	-52		
70	-50,4	150	-70	230	-62,8	310	-52		

**Tabla. V.6. Datos obtenidos para 2GHz con antena LPDA en posición horizontal**

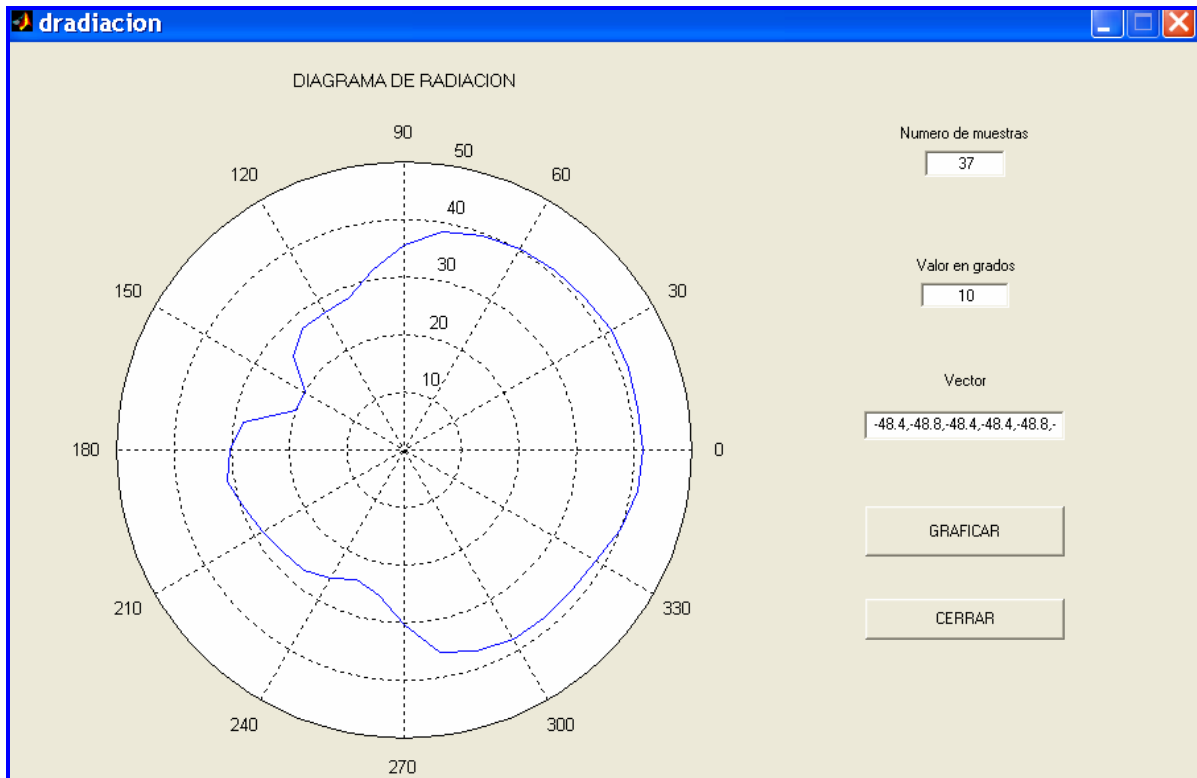
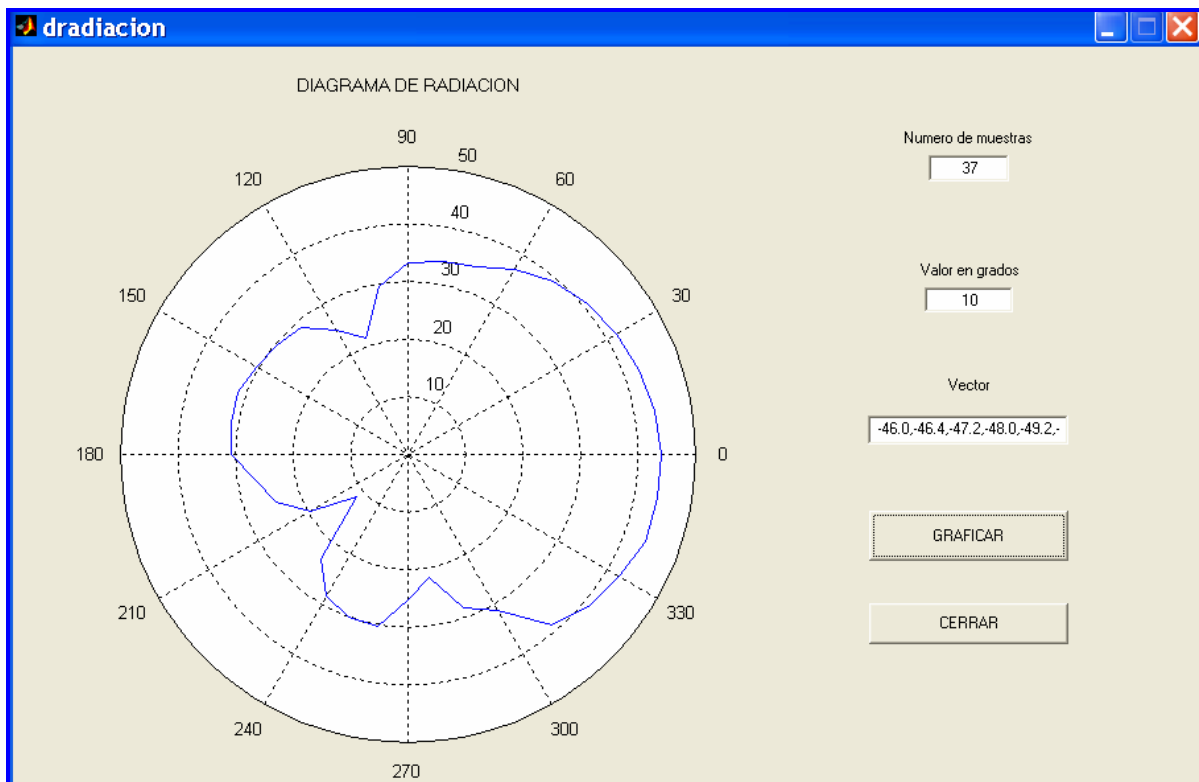


Figura. V.17. Diagrama de radiación para 2GHz con antena LPDA en posición horizontal

Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)	Ángulo	Magnitud (dBm)
0	-46	80	-56	160	-58,4	240	-61,6	320	-48,8
10	-46,4	90	-56,8	170	-58,8	250	-60	330	-47,6
20	-47,2	100	-60,4	180	-59,2	260	-59,6	340	-46
30	-48	110	-68,4	190	-63,2	270	-64,8	350	-46
40	-49,2	120	-65,2	200	-65,6	280	-68,4	360	-46
50	-50,8	130	-61,2	210	-70,4	290	-61,6		
60	-52,8	140	-60,4	220	-78,4	300	-58,8		
70	-55,2	150	-59,6	230	-66,4	310	-51,2		

Tabla. V.7. Datos obtenidos para 3GHz con antena LPDA en posición horizontal



**Figura. V.18. Diagrama de radiación para 3GHz con antena LPDA en posición horizontal**

Los resultados obtenidos en estas dos pruebas muestran que la antena LPDA, como patrón, en posición horizontal tiene menor atenuación que cuando se encuentra en posición vertical. Además en la figura V.14, el diagrama de radiación nos indica al parecer que la antena bajo prueba estuviera  $30^\circ$  en desfase que la antena fuente, sin embargo, visualmente eso no parece ser cierto. Por lo tanto cuando la antena fuente sea la LPDA, se la utilizará en posición horizontal para garantizar que los datos obtenidos tendrán menor atenuación.

La última prueba que se realizó fue cambiar la antena fuente LPDA por una espiral y la antena bajo prueba sería otra espiral. De este modo se garantiza un mejor acoplamiento entre las dos, sin embargo la primera medida tomada da la certeza de que la antena espiral como fuente no trabajaba bien. Los valores de atenuación de la señal se muestran en la tabla V.8.

FRECUENCIA (GHz)	MAGNITUD (dBm)
2	-58,8
3	-55,6

**Tabla. V.8. Datos obtenidos para 2 y 3GHz con antena espiral como fuente**

### 5.3.1 Determinación de la Antena Patrón

Una parte importante dentro de la Cámara Anecoica es la antena que se utilizará como fuente o patrón, ya que de esta depende que la antena bajo prueba reciba la mayor cantidad de señal posible y de este modo sufra menores atenuaciones. Las antenas típicas en las Cámaras son antenas tipo corneta y se debe principalmente a que son más directivas que las otras. Sin embargo, al no poseer este tipo de antena para fuente, las pruebas realizadas permitieron seleccionar la antena más directiva entre la LPDA y la espiral.

La antena fuente escogida para la Cámara Anecoica es la antena LPDA tipo LPD-118/A. Con esta antena se obtuvieron mejores resultados y su posición será horizontal porque tuvo una atenuación menor, figura V.16.

## 5.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para determinar si la Cámara Anecoica de la FIE está trabajando bien, se tiene que comparar los resultados de las pruebas dentro de ella con en el espacio libre OATS. La siguiente tabla muestra los datos obtenidos.

	Frecuencia (GHz)	Mínima Atenuación (dBm)
Espacio Libre	2	-44,8
	3	-47,2
Cámara Anecoica	2	-48,4
	3	-46

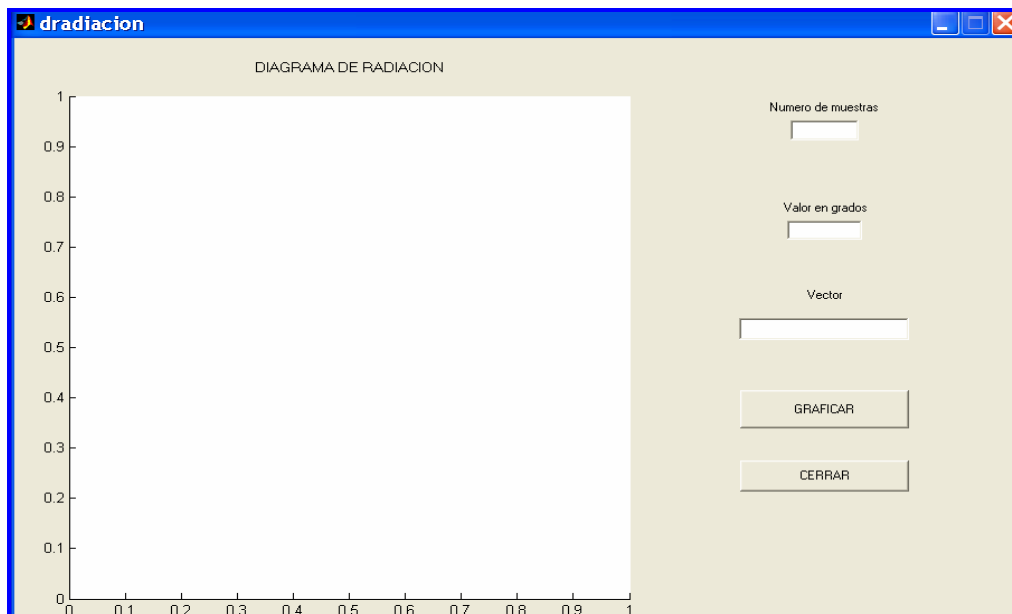
**Tabla. V.9. Datos obtenidos para 2 y 3GHz en el espacio libre y dentro de la Cámara Anecoica**

Como se puede observar en la tabla anterior la Cámara Anecoica en 2GHz con respecto al Espacio Libre tiene una atenuación mayor de -3.6dBm. Sin embargo para la frecuencia de 3GHz, la atenuación de la cámara es menor que en el espacio libre en -1.2dBm. Esto indica que el diseño de la Cámara está dentro de los parámetros de aceptación ya que en comparación con el espacio libre la atenuación de la señal es bastante semejante y no sufre cambios drásticos a las frecuencias de trabajo.

## 5.5 OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Se realizó un software que genera el diagrama de radiación de las antenas bajo prueba, en el cual se ingresan los datos obtenidos de la señal en cada intervalo, el número de muestras obtenidas o el valor del ángulo del intervalo ya que el otro dato será calculado automáticamente dependiendo de lo que se ingrese.

El software fue realizado en GUIDE de Matlab versión 6.5, para que sea en un ambiente gráfico y que de fácil utilización para el usuario. La pantalla que el usuario utiliza es la siguiente.



**Figura. V.19. Pantalla del software que genera diagramas de radiación**

En la parte derecha de la pantalla se encuentran tres íconos donde se puede insertar texto. El primero es para el número de muestras que se van a tomar, si se ingresa este, el segundo icono se calcula automáticamente y viceversa. El segundo icono es para el valor de grados que se requiere para el intervalo. El tercer icono denominado vector es para el ingreso de los datos obtenidos en las pruebas. Cada valor será escrito seguido de una coma para diferenciar un valor del otro.

Después de haber llenado los valores de ingreso, se pulsa en el botón graficar y de este modo aparece en la parte izquierda de la pantalla el diagrama de radiación de la señal. Al finalizar los gráficos de las pruebas se pulsa el botón cerrar y el programa se cierra automáticamente.

El código del programa se muestra en el anexo 7.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha diseñado y construido una Cámara Anecoica para reforzar los laboratorios de la facultad de ingeniería electrónica. Los resultados obtenidos se encuentran acordes al diseño. La construcción de la Cámara Anecoica conllevó investigación, arduo trabajo e inversión de tiempo y dinero, a pesar de los inconvenientes, la perseverancia y buena predisposición de las responsables fue vital para sacar adelante el proyecto.

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Debido a la inexistencia de Cámaras Anecoicas en el país, el diseño y construcción de la misma involucró un gran proceso de investigación. El material absorbente de ondas electromagnéticas, fue tratado y procesado para que posea dicha característica, después de las pruebas realizadas se comprobó que el material desarrollado presentó buenos resultados de absorción, con un nivel de  $-6,828\text{dBm}$ .
- Una de las ventajas de la construcción de la Cámara es la repetición de las mediciones de antenas con condiciones iniciales iguales, independientemente de los factores climáticos, disminuyendo el tiempo de realización de las pruebas.
- El proyecto desarrollado ha demostrado ser confiable para poder llevar a cabo las pruebas con antenas en el rango de 2 a 3 GHz. Para 3GHz la atenuación de la señal dentro de la Cámara es menor que en el espacio libre, mientras que para 2GHz la atenuación de la señal dentro de la Cámara es ligeramente mayor que en el campo



abierto. Corroborando que el funcionamiento de la Cámara cumple con los fines del diseño.

- El blindaje electromagnético, que recubre la Cámara con aluminio, presenta gran efectividad porque no hay existencia de señales externas, en especial para aquellas señales que se encuentran en la banda de 1900MHz (Operadora Alegro) en adelante. Para frecuencias menores a esta banda el nivel de la señal se atenúa.
- Para determinar la antena patrón se probaron las antenas disponibles, un arreglo log periódico LPD-118/A y dos tipo espiral CBS-218/A. La antena LPDA fue la que mejor resultados mostró, pudiendo concluir que es más directiva que la espiral. La prueba realizada entre dos espirales, suponía ser mejor por ser del mismo tipo, debido a que presentan mejor acoplamiento; sin embargo, por los resultados obtenidos, se vio mayor atenuación de la señal recibida. La antena utilizada como patrón no es la más adecuada para nuestros fines, aunque se obtuvo resultados aceptables.
- Los equipos limitaron el rango de trabajo de la Cámara, debido a que el analizador de redes RF envía señales hasta 3GHz no se pudo realizar pruebas a mayores frecuencias. Se probó señales en el rango de 300 MHz a 3GHz. En el rango de 300MHz a 1GHz no existía señal, de 1 a 2 GHz se pudo observar una señal bastante atenuada en el analizador de espectros, y de 2 a 3GHz la señal disminuyó su nivel de atenuación y sus resultados fueron razonables. Para frecuencias mayores a 3GHz fue imposible probar la Cámara.
- Se comprobó que los conectores y cables presentan pérdidas altas en una señal, dentro de la Cámara Anecoica este problema se hizo más notorio, debido a que en las primeras mediciones se tuvo mayor atenuación en la señal a causa de ellos. Por lo que, estos elementos tuvieron que ser reemplazados por componentes de menor pérdida.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Las pruebas realizadas con la LPDA como antena patrón son aceptables, pero se podría obtener mejores resultados si se trabaja con una antena más directiva, como la tipo bocina, que son las más utilizadas dentro de las Cámaras Anecoicas. En el Anexo 8, se sugiere las especificaciones de una antena tipo corneta que cumple con los requerimientos de la Cámara.
- Para la antena bajo prueba, el sistema de posicionamiento es controlable externamente mediante el control del rotor de giro. Se recomienda invertir en la automatización de sistemas de control de polarización para la antena patrón y la antena bajo prueba, ya que en el momento de realizar las pruebas es necesario cambiar la polarización de las antenas para obtener los diagramas de radiación en el plano E y en el H. Debido a que actualmente el cambio de polarización es manual se debe sacar los paneles desmontables, lo que implica desgaste del material y existe mayor posibilidad de dañar las pirámides.

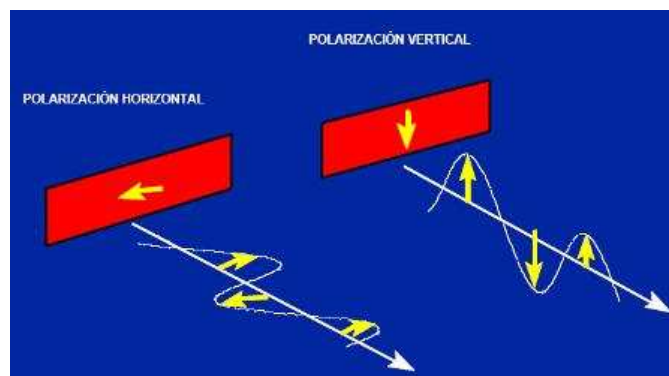


Figura. VI.1. Polarización de la antena patrón de la Cámara

- Además del control de polarización de la antena, es conveniente tener la posibilidad de acercar o alejar las antenas entre ellas, para poder realizar pruebas de campo lejano y cercano.
- Cuando se ingrese a la Cámara para cambiar la antena bajo prueba, se debe tener cuidado de no maltratar o dañar los paneles piramidales, por lo que el mantenimiento de la Cámara es indispensable para el correcto funcionamiento de la misma.
- La puerta de la entrada de la Cámara, que también esta cubierta de material absorbente, es la parte de la Cámara que está más expuesta a la manipulación de los estudiantes, por lo que personal no capacitado no deberá ingresar al laboratorio para evitar daños en las pirámides. El recubrimiento metálico de la puerta también debe ser tomado en cuenta en el mantenimiento de la Cámara, ya que alguna falla en el recubrimiento de aluminio de la puerta, puede afectar las características de la Jaula de Faraday. Por lo que se recomienda cambiar la puerta por una herméticamente sellada.
- Las Cámaras Anecoicas a nivel industrial poseen sistemas de ventilación, debido a que las señales que se miden poseen grandes potencias, el material absorbente de microondas transforma la energía de las señales en calor, y es necesaria la implementación de conductos de aire dentro de la Cámara. Se podría probar instalar sensores de temperatura miniaturas para poder controlar el calor que se esta generando dentro del laboratorio. Cualquier sistema que se instale dentro de la Cámara no debe afectar el funcionamiento de la misma, por lo que se recomienda tener cuidado a la hora de elegir estos sensores, una buena opción son los sensores de temperatura basados en fibra óptica.
- Se debe tener precaución de la potencia de la señal enviada por el analizador de redes RF, debido a que el material interno de los paneles piramidales almacenan

calor y esto podría causar algún incendio, además de daños en los equipos. Por lo que se recomienda la presencia de un profesor que supervise las pruebas que se realizan en el laboratorio.

- Debido a que no se dispone de varias antenas para pruebas, estas solo se realizaron en dos espirales tipo CBS-218/A y una LPDA tipo LPD-118/A. Se recomienda la adquisición de un conjunto de antenas para ser probadas, que cumplan con una de las características de diseño de la Cámara, y que el diámetro máximo de las antenas sea de 0.20m.
- Se recomienda implementar una tarjeta de adquisición de datos, para que los valores resultantes de la señal no se ingresen manualmente dentro del programa de graficación de los lóbulos de radiación
- Además de realizar pruebas de radiación electromagnética se pueden realizar pruebas con radiación ultrasónica, y seguir inmiscuyéndonos en una diversidad de pruebas con fines de investigación. Se recomienda llevar a cabo dichas pruebas acústicas, debido a que en el mercado local existe demanda por dichas pruebas, lo que podría generar recursos económicos para la facultad.
- Una parte de los sistemas de comunicación considerados fijos inalámbricos, son los denominados wireless, las antenas para redes WLAN, trabajan en el rango de 2.4 GHz, el cual esta dentro del rango de trabajo de la Cámara, las antenas utilizadas con este fin podrían ser probadas dentro de este laboratorio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- WHITESELL, James K., *Química Orgánica*, 2da. Edición, Addison Wesley Longman, México 2002, pp. 341-348.
- GRAHAM, Soloms T.W., *Fundamentos de Química Orgánica*, Editorial Limusa, México 1990, pp. 790-828.
- FINK, Donald, *Electronics Engineers' Handbook*, 1era. Edición, Mc Graw Hill, 2001, cap. 6 pp. 6.3-6.138
- HEMMING, Leland, *Electromagnetic Anechoic Chambers*, 2da. Edición, Wiley – Interscience, United States 2002, pp. 1-96.
- COLLIN, R. y Zucker, F., *Antenna Theory*, 1era Edición, United States 1969, pp. 3-41.
- BALANIS, Constantine, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2da Edición, John Wiley & Sons, United States 1997, pp. 2-48.
- CARDAMA, Aznar Ángel, *Antenas*, 1era Edición, Alfaomega ediciones, México 2000, pp. 310-314, 243-251.
- [www.fi.uba.ar/materias/6209/download/1-Ecuaciones%20de%20Maxwell.pdf](http://www.fi.uba.ar/materias/6209/download/1-Ecuaciones%20de%20Maxwell.pdf)
- [www.gr.ssr.upm.es/antenas/Ant-1.pdf](http://www.gr.ssr.upm.es/antenas/Ant-1.pdf)
- [etd.lib.fsu.edu/theses/available/etd-04102004-143656/unrestricted/chapter2.pdf](http://etd.lib.fsu.edu/theses/available/etd-04102004-143656/unrestricted/chapter2.pdf)
- [www.tdx.cesca.es/ TESIS\\_UPC/ AVAILABLE/ TDX - 0402101 - 074606 / 10anexo1. pdf](http://www.tdx.cesca.es/ TESIS_UPC/ AVAILABLE/ TDX - 0402101 - 074606 / 10anexo1. pdf)
- [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com)
- [www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Interaccion\\_antenas.pdf](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Interaccion_antenas.pdf)
- [www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Bocinas.pdf](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Bocinas.pdf)
- [www.radio-electronics.com/info/antennas/log\\_p/log\\_periodic.php](http://www.radio-electronics.com/info/antennas/log_p/log_periodic.php)
- [schoenweitz-ag.de/Positionierer/OATS-specs.pdf](http://schoenweitz-ag.de/Positionierer/OATS-specs.pdf)
- [www.warwick.ac.uk/atc/tig/whatwedo/interests/EMC/emission.php](http://www.warwick.ac.uk/atc/tig/whatwedo/interests/EMC/emission.php)

- [eprints.usq.edu.au/archive/00000047/01/ShayneWRIGHT-2004.pdf](http://eprints.usq.edu.au/archive/00000047/01/ShayneWRIGHT-2004.pdf)
- [zeus.dci.ubiobio.cl/~fvenegas/varios/wireless/antennas/CH%201%20Intro%20Antennas%202004-1.pdf](http://zeus.dci.ubiobio.cl/~fvenegas/varios/wireless/antennas/CH%201%20Intro%20Antennas%202004-1.pdf)
- [zeus.dci.ubiobio.cl/~fvenegas/varios/wireless/antennas/CH3%20antennas.pdf](http://zeus.dci.ubiobio.cl/~fvenegas/varios/wireless/antennas/CH3%20antennas.pdf)
- [www.shoshin.co.jp/emi-emc/lind/gtemcell.htm](http://www.shoshin.co.jp/emi-emc/lind/gtemcell.htm)
- [www.at.oersted.dtu.dk/anechoic.htm](http://www.at.oersted.dtu.dk/anechoic.htm)
- [www2.uah.es/catechom/antenas.htm](http://www2.uah.es/catechom/antenas.htm)
- [www.ce-mag.com/archive/02/Spring/kiemel.html](http://www.ce-mag.com/archive/02/Spring/kiemel.html)
- [www.juridicas.com/base\\_datos//Admin/o281298-mf.html](http://www.juridicas.com/base_datos//Admin/o281298-mf.html)
- [www.mech.canterbury.ac.nz/labs/acoustics\\_anech.shtml](http://www.mech.canterbury.ac.nz/labs/acoustics_anech.shtml)
- [www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos\\_02\\_03/medidas\\_EMI/web1/ENSAYOS%20Y%20MEDIDAS%20EMI.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/medidas_EMI/web1/ENSAYOS%20Y%20MEDIDAS%20EMI.htm)
- [www.upv.es/antenas/GRE/Recursos.htm](http://www.upv.es/antenas/GRE/Recursos.htm)
- [www.m2sat.com.br/software.htm](http://www.m2sat.com.br/software.htm)
- [www.roger-russell.com/cham2pg.htm](http://www.roger-russell.com/cham2pg.htm)
- [cegt201.bradley.edu/rfpage/anechoic\\_chamber.shtml](http://cegt201.bradley.edu/rfpage/anechoic_chamber.shtml)
- [www.euitt.upm.es/postgrado/satelite/Modulo\\_5\\_El\\_Segmento\\_de\\_Tierra.htm](http://www.euitt.upm.es/postgrado/satelite/Modulo_5_El_Segmento_de_Tierra.htm)
- [www.ymec.com/hp/signal2/piano2.htm](http://www.ymec.com/hp/signal2/piano2.htm)
- [www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc\\_altavoces/materiales/materiales.html](http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/materiales/materiales.html)
- [www.sapiensman.com/electrotecnia/dielectricos2.htm](http://www.sapiensman.com/electrotecnia/dielectricos2.htm)
- [tamarugo.cec.uchile.cl/~cutreras/apuntes/node41.html](http://tamarugo.cec.uchile.cl/~cutreras/apuntes/node41.html)
- [www.mailxmail.com/curso/excelencia/cienciamateriales/capitulo14.htm](http://www.mailxmail.com/curso/excelencia/cienciamateriales/capitulo14.htm)
- [www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000051/lecciones/cap01/06\\_06.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000051/lecciones/cap01/06_06.htm)
- [www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/dielectricos/dielectrico.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/dielectricos/dielectrico.htm)

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1**

### **INFORME DE RESULTADOS DE LA PINTURA A BASE DE ÓLEO**



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**



**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-05689  
ORDEN DE TRABAJO No 09197**

SOLICITADO POR:	MONICA LOPEZ
DIRECCIÓN:	TORONJAS 11-116 Y HORTENSIAS
FECHA DE RECEPCION:	17-01-06
HORA DE RECEPCION:	09H49
MUESTRAS DE:	PINTURA
DESCRIPCIONES:	PINTURA OLEO
FECHA DE ANALISIS:	17-01 A 30-01-06
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA	2006-01-31
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS.	PINTURA OLEO AZUL
ESTADO:	CARACTERISTICO
CONTENIDO:	50 g
MUESTREADO POR:	EL CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra entregada por el cliente al OSP

**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODO
MATERIA ORGANICA	mg/kg	5034.4	GRAVIMETRICO



*Jenny Murillo*

Dra. Jenny Murillo  
**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**

**IMPORTANTE PARA EL USUARIO: Exija el original. La Facultad no se responsabiliza por documentos fotocopiados**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gato Sobral  
E - mail: facuim@andinanet.net

Telefax Directo: 3216-740 Troncal 502-262 502-456 Ext. 12  
Quito - Ecuador

RAM-4.1-05



**ANEXO 2**  
**INFORME DE RESULTADOS DE LA PINTURA TIPO LÁTEX**



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS



LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS

INF-LAB-QAM-05690  
ORDEN DE TRABAJO No 09197

SOLICITADO POR:	MONICA LOPEZ
DIRECCIÓN:	TORONJAS 11-116 Y HORTENSIAS
FECHA DE RECEPCION:	17-01-06
HORA DE RECEPCION:	09H49
MUESTRAS DE:	PINTURA
DESCRIPCIONES:	PINTURA LATEX
FECHA DE ANALISIS:	17-01 A 30-01-06
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA	2006-01-31
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS	PINTURA LATEX GNS
ESTADO:	CARACTERISTICO
CONTENIDO:	250 g
MUESTREO POR:	EL CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra entregada por el cliente al OSP

INFORME

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODO
MATERIA ORGANICA	mg/kg	2955.9	GRAVIMETRICO



*Jenny Murillo*

Dra. Jenny Murillo

LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL

**IMPORTANTE PARA EL USUARIO:** Exija el original. La Facultad no se responsabiliza por documentos fotocopiados

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gato Sobral  
E-mail: ficquim@uniuc.edu.ec

Teléfono Director: 3216-740 Troncal 502-262 502-456 Ext. 12  
Quito - Ecuador

RAM-4.1-05

**ANEXO 3**  
**CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA LPD - 118/A**

**SECTION 2**  
**TECHNICAL SPECIFICATIONS**

**2.1 ELECTRICAL**

Frequency Range:	1.0 GHz to 18.0 GHz.
Polarization:	Linear, adjustable from horizontal to vertical.
Front-to-back Ratio:	20 dB Minimum.
Main Lobe Cross Section:	Approx. circular.
Side Lobe Level:	At least 10 dB below main lobe
Beamwidth:	17° at 1.0 GHz to 1° at 18.0 GHz,
Gain (Nominal):	15 to 38 dBi
Output Impedance:	50 ohms nominal.
VSWR:	2:1 Typical.
Transmitting Power:	50 Watts maximum (CW)
Output Connector:	Type SMA, female

**2.2 MECHANICAL**

Dish Dimensions:	Approx. 45" in diameter, and 3' deep, with feed assembly.
Overall Height:	Approx. 80 inches.
Weight:	Approx. 42 pounds, with suitcase.
Materials:	Aluminum, delrin, fiberglass, brass and stainless steel.
Packaging:	Antenna and tripod are designed to fit in standard suitcase nominally 30"L X 22"H X 9" deep, outside, when disassembled.

**ANEXO 4**  
**CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA CBS - 218/A**

**1.1 CBS - 218/A Electrical Specifications:**

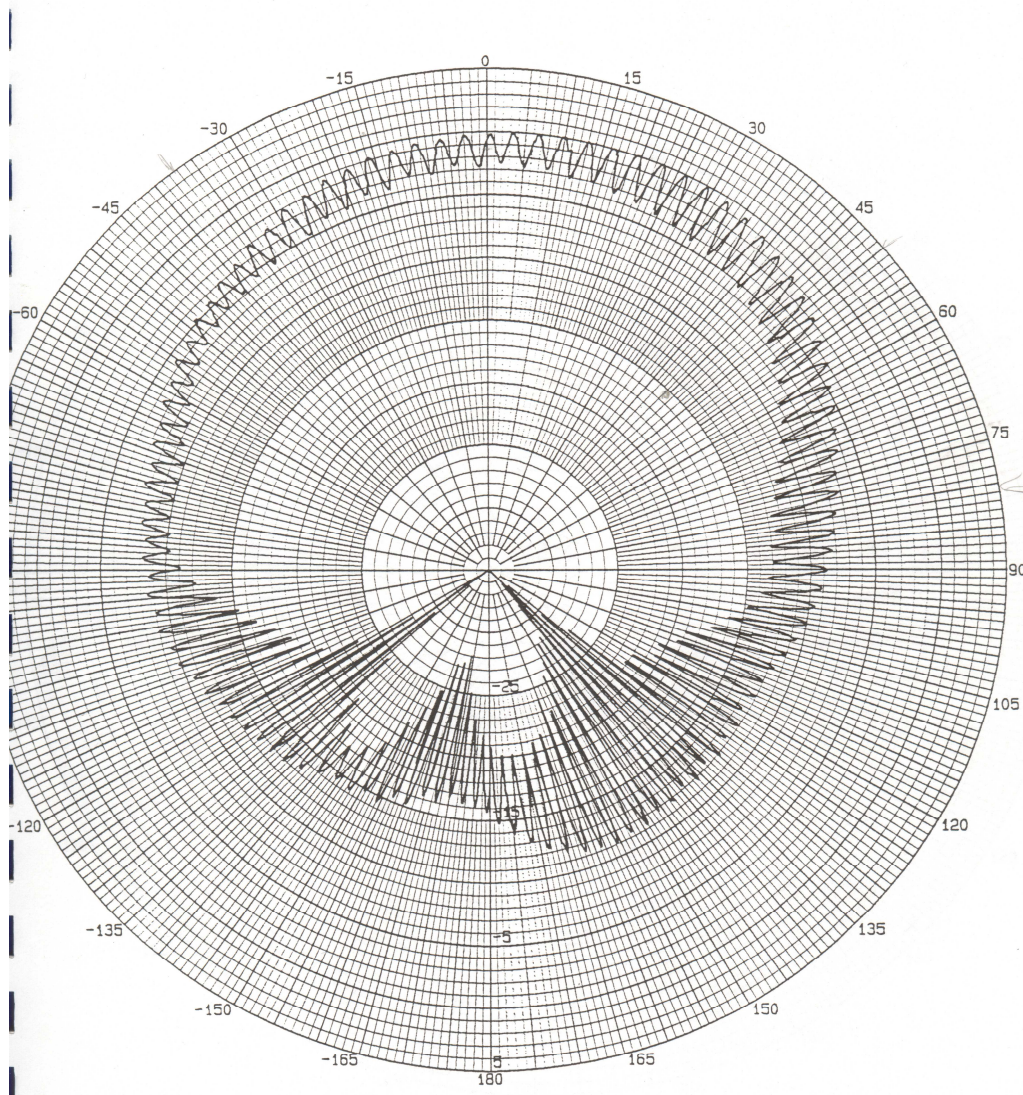
ELECTRICAL	
Frequency Range:	2.0 - 18.0 GHz
Radiation Pattern:	Uni-directional in H and E planes ( Appendix 1 )
Polarization:	Circular
Axial Ratio:	1.5 dB typical
Gain :	2.9 - 3.6 GHz - $\geq$ -2.0 dBIL
	5.4 - 5.9 GHz - $\geq$ 0.0 dBIL
	8.5 - 18 GHz - $\geq$ 1.5 dBIL
Input Impedance:	Matched to 50 ohm (nominal)
VSWR :	2.5 : 1
Input Connector:	SMA Female

**ANEXO 5**  
**DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA CBS – 218/A PARA**  
**2GHz**

ADIATION PATTERN OF CBS218/A  
FILENAME: CBS.006  
REQ: 2.000 GHz  
POLARIZATION: Linear

03/03/94 17:56:11

PLOT: Channel 1



Data: \_\_\_\_\_

Magnitude dB Vs. Azimuth

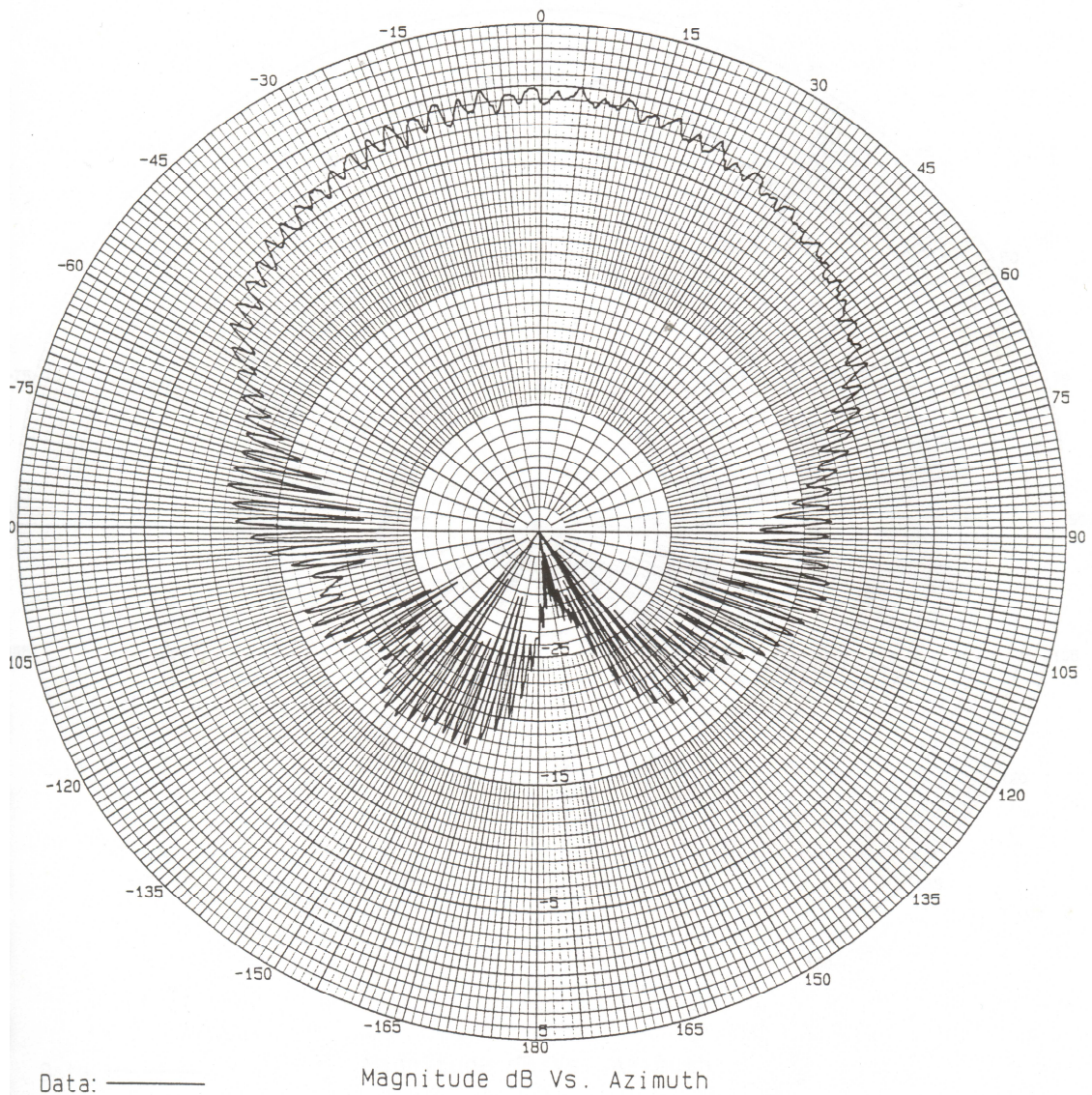


**ANEXO 6**  
**DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA CBS – 218/A PARA**  
**3GHz**

RADIATION PATTERN OF CBS218/A  
FILENAME: CBS.007  
FREQ: 3.000 GHz  
POLARIZATION: Linear

03/03/94 17:59:57

PLOT: Channel 1



**ANEXO 7**  
**CÓDIGO DEL PROGRAMA PARA OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA**  
**DE RADIACIÓN**

**function varargout = dradiacion(varargin)**

```

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @dradiacion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @dradiacion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin & isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if narginout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

```

**function dradiacion\_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)**

```

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

```

**function varargout = dradiacion\_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)**

```

varargout{1} = handles.output;

```

**function num\_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)**

```

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

**function num\_Callback(hObject, eventdata, handles)**

```

num=(str2double(get(hObject,'String')));
grad=360/double(num-1);
set(hObject,'String',num);
set(handles.grad,'String',grad);

```

**function grad\_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)**

```

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

```
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function grad_Callback(hObject, eventdata, handles)
grad=str2double(get(hObject,'String'));
num=360/grad+1.;
set(hObject,'String',grad);
set(handles.num,'String',num);

function vector_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function vector_Callback(hObject, eventdata, handles)

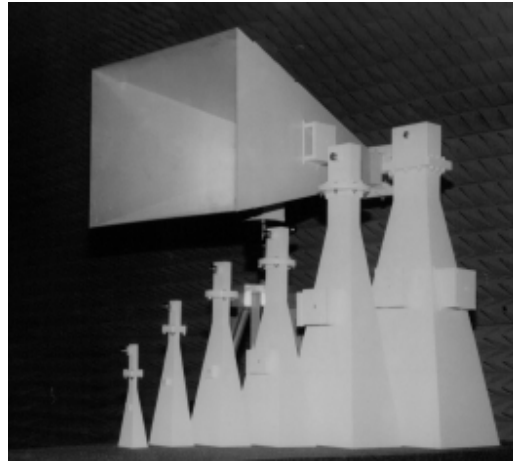
function graficar_Callback(hObject, eventdata, handles)
num=str2double(get(handles.num,'String'));
grad=str2double(get(handles.grad,'String'));
r=str2num(get(handles.vector,'String'));
r=90+r;
t = 0:grad:360;
theta = t*pi/180;
polar(theta,r);
grid on;

function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function cerrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
close all;
```

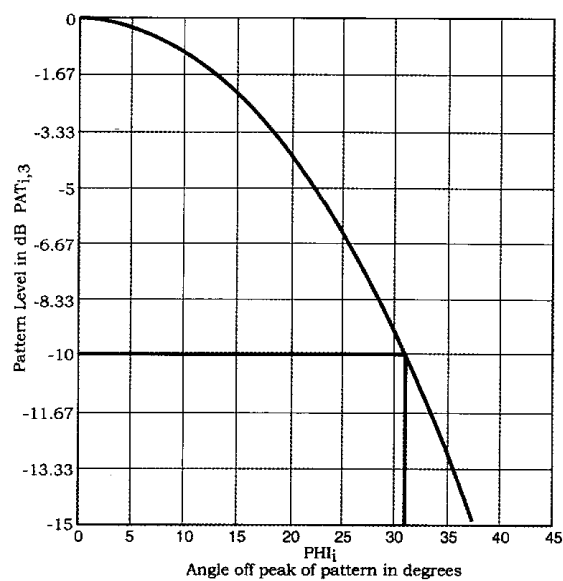
**ANEXO 8**  
**CARACTERÍSTICAS PARA LA ADQUISICIÓN DE UNA ANTENA**  
**TIPO BOCINA**

## Antena Horn (Tipo Corneta)



### Especificaciones técnicas:

- La frecuencia de trabajo debe incluir el rango de 2-3 GHz.
- La apertura de la antena debe ser máximo de 20 cm, al igual que la longitud de la antena.
- El beamwidth de la antena a -10dB debe estar en el rango de 30-40 grados.
- Debe entregarse el patrón de radiación a 2 y 3 GHz.



**ANEXO 9**  
**ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO**



## ANÁLISIS ECONÓMICO Y ESTRUCTURA

El análisis económico tiene por objeto determinar de una manera contable la magnitud de la inversión para el proyecto y de esta manera asegurar que los recursos sean bien asignados para su diseño, instalación y construcción.

Un elemento y estudio del proyecto es la asignación de recursos previos a la inversión para ver si el proyecto es factible o no. Por lo que primero se realizaron pruebas del material

MATERIALES UTILIZADOS PARA PRUEBAS			
MATERIA PRIMA DIRECTA			
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR TOTAL
Plancha de Poliestireno	244*122*22cm	1	77,62
	50*50*1cm	8	4
Pintura en óleo		2	7
Pintura Acrílica		2,5lt	25,74
Carbón activado en polvo		9kg	58,32
Grafito en polvo		3kg	8,06
Espuma de Poliuretano		500mgr	7,7
Pega Poliuretano		500gr	20,52
Guantes		2	1,56
Brocha	1pulg	1	0,8
Rodillo		1	1,29
Resina		1lt	3,89
<b>TOTAL MPD</b>			<b>216,5</b>

Este proyecto se ejecutará mediante el financiamiento de \$1474.74 por parte de la Escuela Politécnica del Ejército. Y con recursos propios de \$2254.18 para la construcción del mismo.

### USO DE FONDOS

Los fondos que se requiere para la ejecución de proyecto ascienden a 4500 dólares aproximadamente, y se detalla en la siguiente tabla.

## USO DE FONDOS

<b>RUBROS DE INVERSIÓN</b>					
<b>MATERIA PRIMA (RECUBRIMIENTO INTERNO)</b>					
	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>	<b>APORTE PROPIO</b>	<b>APORTE ESPE</b>
Planchas de Poliestireno	240*120*31cm	3		76,38	152,77
	240*120*22cm	9,5		200,83	305,61
	244*122*1cm	25		55	
Carbón Activado en polvo		120kg		229,61	178,18
Pega	EPOXICA:				
	Resina	1Kg			28
	Catalizador	0,531Kg			17,81
	ATEX	25,1Gal		90,55	60,14
Pintura Acrílica		8Gal		33	48,37
<b>TOTAL MPD (Recubrimiento interno)</b>			<b>1476,25</b>	<b>685,37</b>	<b>790,88</b>
<b>MATERIA PRIMA (RECUBRIMIENTO EXTERNO)</b>					
Madera	AGLOMERADO 12mm	14			271,92
	MDF 6mm	16		216	
	TABLONES	24		302,4	
Alumband	50*10cm	16		49,36	407,46
	20*5cm	1		7,7	
Papel Aluminio	30m	3		11,25	
Esponja	200*100*3cm	39		235,05	
<b>TOTAL MPD (Recubrimiento externo)</b>			<b>1501,14</b>	<b>821,76</b>	<b>679,38</b>
<b>TOTAL MPD</b>			<b>2977,39</b>		
<b>MANO DE OBRA DIRECTA</b>					
Carpintero			560	560	
<b>TOTAL MOD</b>			<b>560</b>		
<b>SUMINISTROS Y MATERIALES INDIRECTOS</b>					
Funcionamiento:					
Rotor de Giro Antena		1		110,5	
Cable para Rotor		6m		3,6	
Tubo PVC	1pulg	2m		8	
Manguera para cable		4m		4	
Base de PVC		2		7	
Materiales Indirectos:					
Focos		2		7	
Boquillas		2		1	
Guantes		6		4,7	
Brochas:					
	1pulg	3		2,43	
	3pulg	8		12,8	
Pega Poliuretano		500gr		20,52	
Cemento de contacto		1lt		5,5	
<b>TOTAL SMI</b>			<b>187,05</b>	<b>187,05</b>	<b>0</b>
<b>TOTAL CAPITAL DE TRABAJO</b>			<b>3724,44</b>	<b>2254,18</b>	<b>1470,26</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura. I.1. Cámara de Faraday.....</b>	<b>4</b>
<b>Figura. I.2. Interior de una Cámara Anecoica.....</b>	<b>5</b>
<b>Figura. I.3. Cámara Totalmente Anecoica .....</b>	<b>6</b>
<b>Figura. I.4. Cámara Semi – Anecoica .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura. I.5. Equipos de Medición en una Cámara Anecoica .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura. I.6. Aplicaciones de una Cámara Anecoica en diferentes áreas.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura II.1. Antena dipolo con líneas de campo E y H .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura II.2. Región de campos alrededor de la antena .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura II.3. Campo lejano como onda plana.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura II.4. Conexiones para estudio de las antenas .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura II.5. Circuito equivalente de las impedancias de entrada .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura II.6. Onda linealmente (vertical) polarizada .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura II.7. Esquemas típicos de polarizaciones.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura II.8. Ancho de banda con VSWR=2 .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura II.9. Convención de coordenadas para el patrón de radiación de antenas .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura II.10. Diagramas de radiación para de una antena lineal en 2-D .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura II.11. Patrón de radiación en 3-D para distintos tipos de antenas.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura II.12. Patrón de radiación para una antena genérica .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura II.13. Varios tipos de antenas.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura II.14. Arreglo de 4 elementos .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura II.15. Arreglo de dipolos log periódica (LPDA) .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura II.16. a) Antena LPDA, b) Patrón de radiación tridimensional de una Antena LPDA, c) Características de radiación de antenas tipo arreglo .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura II.17. Antena espiral equiangular plana .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura II.18. Antena Espiral Cónica.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura II.19. Antenas espirales apoyadas en la cavidad (Cavity Backed Spirals).....</b>	<b>40</b>
<b>Figura II.20. Características de radiación de antenas espirales.....</b>	<b>41</b>

<b>Figura II.21. Antenas tipo bocina rectangular.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura II.22. Medidas de una Antena horn piramidal.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura II.23. a) Comparación de ganancias para distintas antenas, b) Características de radiación de antenas bocina (horn).....</b>	<b>44</b>
<b>Figura II.24. Área libre de un OATS.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura II.25. Pruebas en OATS no complejos .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura II.26. Prueba de calibración de antena .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura II.27. Distorsión de la señal debido a reflexiones .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura II.28. Representación de una célula GTEM .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura II.29. Células GTEM.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura II.30. Cuarto cerrado para pre-cumplimiento de pruebas.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura II.31. Absorbente en forma piramidal .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura II.32. Interior de una Cámara Anecoica .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura II.33. Geometría general de una Cámara Anecoica.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura. III.1. Dipolo Eléctrico .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura. III.2. Momento Dipolar .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura. III.3. Materiales que se endurecen con el calor .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura. III.4. Materiales Termoplásticos.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura. III.5. Estructura química del Carbón .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura. III.6. Carbón Activado en polvo .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura. III.7. Horno Industrial.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura. III.8. Grafito en polvo .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura. III.9. Poliestireno impregnado con pintura de óleo azul .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura. III.10. Poliestireno impregnado con pintura látex .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura. III.11. Geometría estándar de un absorbente piramidal.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura. III.12. Desempeño de la reflectividad de un absorbente piramidal.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura. III.13. Desempeño del absorbente piramidal según el ángulo de incidencia de la antena fuente.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura. III.14. Construcción del absorbente con capa metálica.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura. III.15. Láminas de Ferrita dentro de una Cámara Anecoica.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura. III.16. Planchas de poliestireno en forma piramidal .....</b>	<b>80</b>

<b>Figura. III.17. Planchas de poliestireno pintadas con la pintura Látex mezclada de carbón .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura. III.18. Carbón Activado dentro de un Horno Industrial .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura. III.19. Plancha de poliestireno dentro de una piscina de Carbón Activado ....</b>	<b>83</b>
<b>Figura. III.20. Cortes de las puntas de las pirámides y despojo del material sobrante</b>	<b>84</b>
<b>Figura. III.21. Impregnación del carbón dentro de las planchas de Poliestireno.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura. III.22. Cubrimiento de las planchas de Poliestireno impregnadas con carbón .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura. III.23. Plancha de poliestireno impregnada con carbón.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura. III.24. Plancha de poliestireno final (vista frontal) .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura. III.25. Plancha de poliestireno final (vista trasera).....</b>	<b>86</b>
<b>Figura. III.26. Posición de las antenas en el OATS .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura. III.27. Atenuación de la señal en el espacio libre sin interferencias.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura. III.28. Atenuación de la señal con plancha de Carbón .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura. III.29. Atenuación de la señal con plancha de Grafito .....</b>	<b>90</b>
<b>Figura. III.30. Antena bajo prueba cubierta de varias planchas de poliestireno impregnado de carbón.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura. III.31. Atenuación de la señal con varias planchas de poliestireno rellenas de carbón .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura. IV.1. Ilustración de una Cámara Anecoica.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura. IV.2. Ilustración de múltiples trayectorias dentro una Cámara Anecoica .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura. IV.3. Rayos de multi-trayectoria .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura. IV.4. Tamaño básico de la Cámara Anecoica.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura. IV.5. Elevación de las antenas.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura. IV.6. Curvas para encontrar el espesor del absorbente .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura. IV.7. Espesor de los paneles absorbentes.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura. IV.8. Las planchas de poliestireno expandido contienen dos paneles piramidales .....</b>	<b>110</b>
<b>Figura. IV.9. Comparación de la Tabla. IV.2. del absorbente piramidal .....</b>	<b>113</b>
<b>Figura. IV.10. Paneles piramidales contruidos .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura. IV.11. Área especular del absorbente.....</b>	<b>115</b>

<b>Figura. VI.12. Coordenadas de referencia .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura. IV.13. Material sin procesar utilizado en las pruebas de material, y planchas sin tratar utilizadas para la construcción.....</b>	<b>120</b>
<b>Figura. VI.14. Trazos guías en la parte posterior de las planchas .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura. IV.15. Vaciado de las Pirámides .....</b>	<b>122</b>
<b>Figura. IV.16 Material sobrante .....</b>	<b>122</b>
<b>Figura. IV.17. Material sobrante granulado.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura. VI.18. Activación del Carbón.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura. IV.19. Medida del Carbón.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura. IV.20. Mezcla Carbón - Poliestireno .....</b>	<b>125</b>
<b>Figura. IV.21. Cubrimiento de las planchas y goma utilizada .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura. IV.22. Planchas pintadas terminadas de procesar .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura. IV.23. Estructura de madera de la Cámara .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura. IV.24. Bandas de Aluminio para recubrir la parte externa de las paredes... </b>	<b>129</b>
<b>Figura. IV.25. Colocación de las bandas de aluminio .....</b>	<b>130</b>
<b>Figura. IV.26. Cortes de las planchas de polietileno .....</b>	<b>130</b>
<b>Figura. IV.27. Colocación de las planchas de polietileno.....</b>	<b>131</b>
<b>Figura. IV.28. Instalaciones en el piso de la Cámara .....</b>	<b>131</b>
<b>Figura. IV.29. Instalación de las paredes laterales faltantes .....</b>	<b>132</b>
<b>Figura. IV.30. Interior de la Cámara sin el material absorbente .....</b>	<b>133</b>
<b>Figura. IV.31. Colocación del material absorbente en el techo de la Cámara.....</b>	<b>134</b>
<b>Figura. IV.32. Gomas y materiales utilizados en el proceso de pegado.....</b>	<b>134</b>
<b>Figura. IV.33. Línea de vista entre las antenas en el interior de la Cámara.....</b>	<b>135</b>
<b>Figura. IV.34. La antena patrón en polarización vertical y horizontal.....</b>	<b>135</b>
<b>Figura. IV.35. Antena espiral bajo prueba .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura. IV.36. Camino desmontable para acceder a las antenas .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura. IV.37. Etapa final del proceso de construcción .....</b>	<b>137</b>
<b>Figura. IV.38. Ubicación de los equipos .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura. V.1. Sistema de adquisición de datos y posicionamiento de la Cámara Anecoica.....</b>	<b>140</b>
<b>Figura. V.2. Analizador de Redes RF Agilent 8714ET/ES .....</b>	<b>141</b>

---

<b>Figura. V.3. Analizador de Espectros .....</b>	<b>141</b>
<b>Figura. V.4. Sistema posicionador de la antena bajo prueba .....</b>	<b>142</b>
<b>Figura. V.5. Guía de la antena para recolección de datos cada 5° .....</b>	<b>143</b>
<b>Figura. V.6. Diagrama de radiación para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 1.2m .....</b>	<b>144</b>
<b>Figura. V.7. Colocación de las antenas a 3m de altura .....</b>	<b>145</b>
<b>Figura. V.8. Alineación de las antenas a 3m de altura .....</b>	<b>146</b>
<b>Figura. V.9. Adquisición de datos .....</b>	<b>147</b>
<b>Figura. V.10. Diagrama de radiación para una frecuencia de 2GHz con mástiles de 3m .....</b>	<b>148</b>
<b>Figura. V.11. Diagrama de radiación para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 3m .....</b>	<b>149</b>
<b>Figura. V.12. Antena LPD-118/A y Antena CBS-218/A utilizadas para pruebas en la cámara .....</b>	<b>150</b>
<b>Figura. V.13. Antena LPDA como fuente y Antena espiral como prueba .....</b>	<b>150</b>
<b>Figura. V.14. Diagrama de radiación para 2GHz con antena LPDA en posición vertical .....</b>	<b>151</b>
<b>Figura. V.15. Diagrama de radiación para 3GHz con antena LPDA en posición vertical .....</b>	<b>152</b>
<b>Figura. V.16. Antena LPDA como fuente en posición horizontal .....</b>	<b>153</b>
<b>Figura. V.17. Diagrama de radiación para 2GHz con antena LPDA en posición horizontal.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura. V.18. Diagrama de radiación para 3GHz con antena LPDA en posición horizontal.....</b>	<b>155</b>
<b>Figura. V.19. Pantalla del software que genera diagramas de radiación.....</b>	<b>158</b>
<b>Figura. VI.1. Polarización de la antena patrón de la Cámara.....</b>	<b>161</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla. III.1. Constante Dieléctrica y Factor de Pérdida de diferentes Dieléctricos .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabla. III.2. Resistividad de algunos Dieléctricos.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla. III.3. Características de plásticos de endurecimiento térmico .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla. III.4. Características eléctricas de plásticos de endurecimiento térmico .....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla. III.5. Características y aplicaciones de los termoplásticos.....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla. III.6. Características eléctricas de los termoplásticos .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla. III.7. Desempeño de los absorbentes (Nota: Las dimensiones de la base son de 0.61m x 0.61m) .....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla. III.8. Datos de la atenuación de la señal sin interferencias.....</b>	<b>88</b>
<b>Tabla. III.9. Datos de la atenuación de la señal con plancha de carbón.....</b>	<b>89</b>
<b>Tabla. III.10. Datos de la atenuación de la señal con plancha de Grafito.....</b>	<b>90</b>
<b>Tabla. III.11. Datos de la atenuación de la señal con varias planchas de Carbón.....</b>	<b>91</b>
<b>Tabla. III.12. Comparación de los datos obtenidos con los diferentes materiales.....</b>	<b>92</b>
<b>Tabla. IV.1. Número de rayos considerados en el diseño de la Cámara .....</b>	<b>103</b>
<b>Tabla. IV.2. Funcionamiento del absorbente piramidal .....</b>	<b>110</b>
<b>Tabla. V.1. Datos obtenidos para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 1.2m.....</b>	<b>143</b>
<b>Tabla. V.2. Datos obtenidos para una frecuencia de 2GHz con mástiles de 3m.....</b>	<b>147</b>
<b>Tabla. V.3. Datos obtenidos para una frecuencia de 3GHz con mástiles de 3m.....</b>	<b>148</b>
<b>Tabla. V.4. Datos obtenidos para 2GHz con antena LPDA en posición vertical.....</b>	<b>151</b>
<b>Tabla. V.5. Datos obtenidos para 3GHz con antena LPDA en posición vertical.....</b>	<b>152</b>
<b>Tabla. V.6. Datos obtenidos para 2GHz con antena LPDA en posición horizontal ...</b>	<b>153</b>
<b>Tabla. V.7. Datos obtenidos para 3GHz con antena LPDA en posición horizontal ...</b>	<b>154</b>
<b>Tabla. V.8. Datos obtenidos para 2 y 3GHz con antena espiral como fuente .....</b>	<b>156</b>
<b>Tabla. V.9. Datos obtenidos para 2 y 3GHz en el espacio libre y dentro de la Cámara Anecoica.....</b>	<b>157</b>



## **ACTA DE ENTREGA**

El proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, a \_\_\_\_\_

---

Ing. Gonzalo Olmedo. MSc.  
COORDINADOR DE CARRERA

---

Sr. Dr. Jorge Carvajal  
SECRETARIO ACADÉMICO

AUTORAS:

---

Srta. Paulina Patricia Brito Flores

---

Srta. Mónica Patricia López Campos