

DISEÑO Y RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA
CÁMARA ANECÓICA PARA LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA.

JUAN CAMILO VILLAMIZAR DURÁN

HERNANDO IVÁN BELEÑO ALEAN

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012

DISEÑO Y RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA
CÁMARA ANECÓICA PARA LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA.

JUAN CAMILO VILLAMIZAR DURÁN

HERNANDO IVÁN BELEÑO ALEAN

Trabajo de grado presentado para optar por el título de.

Ingeniero Electrónico.

Director de Tesis

Esp. Fabio Alonso Guzmán Serna.

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012

DEDICATORIA

A Dios, por brindarnos su amor y sabiduría para poder desarrollar este proyecto.

A nuestros padres que nos han apoyado en cada etapa de nuestras vidas, con su amor, comprensión y dedicación contribuyendo a nuestra formación personal e intelectual.

A nuestros hermanos, por su amistad incondicional, por tendernos la mano en todo momento y brindarnos su comprensión.

A nuestros familiares y amigos que estuvieron pendientes del desarrollo de este proyecto y de esta etapa fundamental de nuestras vidas.

A nuestro director de proyecto, por las largas jornadas dedicadas a este proyecto, por su ayuda y por su buena disposición para brindarnos siempre la mano.

A los docentes de la UPB seccional Bucaramanga por su contribución en la formación intelectual y personal.

Juan Camilo y Hernando Iván.

DEDICATORIA.

Emprendimos un camino donde en reiteradas ocasiones se nos presentaron dificultades, pero siempre con fe en Dios, paciencia y dedicación las logramos solucionar. Este proyecto parte nuestras vidas en dos ya que terminamos una etapa para abrirles las puertas a una nueva, y precisamente es a Dios que nos dio la fortaleza, salud y voluntad para salir adelante siempre, a quien le queremos dedicar este proyecto.

Al igual que a nuestras, pero especialmente a nuestros padres, por su apoyo, por su amor, por su comprensión, por su lucha día a día por formarnos como personas y que en todos los momentos de nuestras vidas nos han acompañado.

Dedicamos este proyecto a todos nuestros familiares, compañeros y docentes que confiaron en nosotros y que directa o indirectamente contribuyeron a la ejecución de este trabajo

Tabla de contenido

Glosario	9
Introducción	12
Objetivos	13
1. Capítulo 1 – Campos Electromagnéticos.....	14
1.1. Regiones de campo.	14
1.2. Medidas de campos electromagnéticos.	17
2. Capítulo 2 – Jaula de Faraday.....	25
2.1. Introducción.....	25
2.2. Descripción	25
2.3. Materiales Conductores	25
2.4. Materiales Magnéticos.	26
2.5. Material a seleccionar	26
3. Capítulo 3 – Diseño Cámara Anecóica.....	28
3.1. Definición cámara Anecóica.....	28
3.2. Aplicaciones de una cámara Anecóica.....	28
3.3. Diseño de la cámara anecóica.....	29
4. Capítulo 4 – Materiales Absorbentes de Radiofrecuencia	41
4.1. Introducción.....	41
4.2. Características Electromagnéticas de los Materiales.	41
4.3. Materiales Dieléctricos.	41
4.4. Carbón	44
4.5. Funcionamiento y forma de los Materiales Absorbentes.....	44
5. Capítulo 5 – Recomendaciones para la Construcción de una Cámara Anecóica.....	52
5.1. Medidas reales de la cámara Anecóica.....	52
5.2. Estructura.....	55
5.3. Recubrimiento con los Paneles Absorbentes.....	56
5.4. Instalaciones Internas.	57
5.5. Mesas para los Mástiles.....	58
6. Capítulo 6 – Pruebas en la Cámara Anecóica	60
6.1. Introducción.....	60
6.2. Patrón de Radiación.....	60

6.3.	Otros Parámetros de las Antenas.	62
6.4.	Instrumentos de Medida.....	62
6.5.	POSIBLES PRUEBAS A REALIZAR.....	65
	Conclusiones	79
	Bibliografía.....	80
	ANEXO 1.....	I
1.	USO DE LA CÁMARA ANECOICA.....	II
1.1.	INTRODUCCIÓN	III
1.2.	INDICACIONES PARA LAS ANTENAS.....	III
1.2.1.	Frecuencia de operación	III
1.2.2.	Elevación de las antenas.....	III
1.2.3.	Cambio de antenas.....	III
1.3.	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	IV
2.	RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD.....	IV
2.1.	INTRODUCCION.....	IV
2.2.	REGLAS BASICAS DE SEGURIDAD.....	V
2.3.	OTROS CONSEJOS DE SEGURIDAD.....	V
3.	OTRAS RECOMENDACIONES.....	V

Tabla de figuras

Figura 1-1.	Regiones de campo de una antena [1].	14
Figura 1-2.	Patrón de radiación generalizado de una antena [2].	17
Figura 1-3.	Nivel de incertidumbre de un patrón vs el nivel de señales extrañas [2].	18
Figura 1-4.	Relación simbólica de los parámetros de medida [2].	19
Figura 1-5.	Derivación del criterio de campo lejano [2].	20
Figura 1-6.	Tamaño de la región de prueba vs longitud de rango y frecuencia [2].	22
Figura 3-1.	Ubicación de las antenas y medidas de la cámara anecoica, vista superior.....	31
Figura 3-2.	Rango de elevación de las antenas [2].	33
Figura 3-3.	Diseño del método de trayectoria de rayos modificada de [2]. ...	35
Figura 3-4.	Comportamiento del ancho del ángulo del absorbente piramidal [2].	37
Figura 3-5.	Dimensiones del panel absorbente [11].	39
Figura 4-1.	Dipolo Eléctrico [7].	41

Figura 4-2. Modelado de la señal emitida en el espacio libre [13].	45
Figura 4-3. Modelo de línea de transmisión para una lamina [13].	46
Figura 4-4. Modelo de línea de transmisión para varias laminas [13].	47
Figura 4-5. Modelo de línea de transmisión de “JaumannSandwich” (valores en ohm) [13].	48
Figura 5-1. Medidas reales de la cámara anecóica en cm, vista superior. ...	53
Figura 5-2. Imagen en 3D de la cámara anecóica con sus dimensiones en cm.	54
Figura 5-3. Medidas de la puerta de la cámara anecóica en cm.	55
Figura 5-4. Corte de una pared de la cámara anecóica.	56
Figura 5-5. Detalle constructivo.	57
Figura 5-6. Distribución eléctrica de la cámara anecóica.	58
Figura 5-7. Mástil con base [14].	59
Figura 5-8. Orientador [14].	59
Figura 6-1. Patrón de radiación isotrópico [20].	61
Figura 6-2. Patrón de radiación directivo [20].	61
Figura 6-3. Patrón de radiación omnidireccional [20].	61
Figura 6-4. Equipo didáctico y de medición de antenas 8092 [14].	63
Figura 6-5. Generador RF[14].	63
Figura 6-6. Orientador de la antena [14].	64
Figura 6-7. Interfaz para adquirir datos [14].	64
Figura 6-8. Como se refleja la señal en el aire libre [2].	66
Figura 6-9. Como interactúan dos ondas [2].	66
Figura 6-10. Representación vectorial de dos frentes de onda interactuando [2].	66
Figura 6-11. Error de incertidumbre vs nivel de señales extrañas [2].	68
Figura 6-12. Error de incertidumbre vs el nivel de energía de señal extraña [2].	69
Figura 6-13. Reflectividad vs rizado y el nivel del patrón de radiación [2].	70
Figura 6-14. Ejemplo del uso de la tabla de reflectividad [2].	71
Figura 6-15. Orientaciones de las antenas en las pruebas transversales de espacio libre [2].	72
Figura 6-16. Orientaciones de las antenas en las pruebas longitudinales de espacio libre [2].	73
Figura 6-17. Ejemplo del procedimiento del patrón de prueba [2].	74
Figura 6-18. Ejemplo de los niveles de reflectividad de una cámara anecóica típica [2].	75
Figura 6-19. Método de trazado de rayos	76
Figura 6-20. Patrón de radiación de una antena horn.	77
Figura 6-21. Patrón de radiación normalizado de una antena horn.	77
Figura 6-22. Patrón de radiación de una antena dipolo.	78
Figura 6-23. Patrón de radiación normalizado de una antena dipolo.	78

Tabla de Tablas

Tabla 2-1. Cuadro comparativo de algunos materiales [7].....	27
Tabla 3-1. Características de las antenas.....	30
Tabla 3-2. Espesor piramidal según factor de longitud de onda [11].	38
Tabla 3-3. Características del panel piramidal [11].	39
Tabla 3-4. Comparación valores de atenuación del panel absorbente vs atenuación por reflectividad [11].	40
Tabla 4-1. Constantes dieléctricas [7].....	42
Tabla 4-2. Resistividad de materiales dieléctricos [7].	43
Tabla 4-3. Características de las pirámides absorbentes [2].	51
Tabla 5-1. Medidas de la cámara anecóica.	55
Tabla 5-2. Distribución de los paneles absorbentes de la cámara anecóica.	56

Glosario

Antena de reflector multirayo: Antena capaz de reflejar varios rayos.

AUT: Antena bajo prueba.

Jaumann sándwich: técnica cónica que tiene un comportamiento resistivo cónico.

Lámina de Salisbury: lámina de papel recubierta por una sustancia con el fin de darle una superficie resistiva.

Permeabilidad: Es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos.

Permitividad: es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

Plano azimutal: Plano que está en función del ángulo φ , puede verse como el plano horizontal.

Plano de elevación: plano que está en función del ángulo θ y puede verse como el plano vertical.

VSWR: Son las siglas en inglés del método de la relación de onda estacionaria de voltaje.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO Y RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA ANECOICA PARA LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.
AUTOR(ES): Juan Camilo Villamizar Durán
Hernando Iván Beleño Alean
FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica
DIRECTOR(A): Fabio Alonso Guzmán Serna

RESUMEN

El documento contiene el diseño y las recomendaciones para construir una cámara anecoica de radiofrecuencia que puede operar en la banda de frecuencias de 1 a 10 GHz, con el fin de simular un espacio libre ideal para hacer pruebas del patrón de radiación de antenas, radiación de equipos electrónicos y obtener un comportamiento óptimo en la medida del patrón de radiación. En este documento encontrará el material conductor escogido para la Jaula de Faraday, la determinación de las medidas del recinto partiendo de unas consideraciones, la selección de los paneles absorbentes que cumplen con condiciones de frecuencia, atenuación, tipo de material. También se dieron las recomendaciones para la construcción de la cámara anecoica, se plantearon pruebas para desarrollar en ella después de construida. Adicionalmente tiene un manual que especifica el modo de uso y el cuidado que se debe tener con la cámara anecoica.

PALABRAS

CLAVES:

Camara anecoica, Diseño, Juala de Faraday

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DISEÑO Y RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA ANECOICA PARA LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.

AUTHOR(S): Juan Camilo Villamizar Durán
Hernando Iván Beleño Alean

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Fabio Alonso Guzmán Serna

ABSTRACT

The document contains the design and recommendations for construct a radiofrequency anechoic chamber that can operate in the bandwidth from 1 to 10 GHz, with the purpose of simulate an ideal free space for testing, of the antenna radiation pattern, radiation from electronics equipment and obtain a more optimal behavior in measuring the radiation pattern. This document provides the conductive material chosen for the Faraday cage, the determination of the measurements of the enclosure starting from some considerations, the choice of absorbent panels that satisfy with frequency conditions, attenuation, type of material. Also recommendations were given for the construction of the anechoic chamber, tests were proposed to develop it after built and additionally has a manual that specifies mode of use and the care that must be taken with the anechoic chamber

KEYWORDS:

Anechoic chamber, Design, Faraday Cage.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En el primer capítulo de este documento el lector va a encontrar información de las antenas, regiones de campo, patrón de radiación de una antena cualquiera y requerimientos de medida. En el capítulo dos se explicará el uso y la aplicación de la jaula de Faraday requerida para la cámara anecóica. En el tercer capítulo se desarrolla el diseño de la cámara anecóica aplicando técnicas de reflectividad y se analiza la necesidad de un material absorbente de radiofrecuencia y se dan unas medidas preliminares de la cámara. En el capítulo cuatro se establece el comportamiento de los materiales absorbentes y se analiza su funcionalidad. El capítulo cinco detalla las especificaciones reales de la construcción de la cámara Anecóica. Finalmente el capítulo seis describe algunos métodos de prueba con los cuales se pueden hallar los parámetros más importantes de las antenas del equipo que posee la universidad.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar una Cámara Anecóica que funcione en la banda de frecuencias de 1 GHz a 10 GHz.

Objetivos Específicos

- Determinar qué tipo de material metálico se debe usar para implementar la jaula de Faraday.
- Teniendo en cuenta que el rango de operación de la Cámara Anecóica es de 1 GHz a 10 GHz y las características de las antenas a utilizar, determinar las medidas del recinto y de los paneles absorbentes, el material de los mismos e identificar el fabricante que brinde la mejor solución.
- Una vez construida la Cámara Anecóica, realizar pruebas que verifiquen el funcionamiento de esta.
- Realizar un manual de manejo, condiciones y recomendaciones para el uso correcto de la Cámara Anecóica.

1. Capítulo 1 – Campos Electromagnéticos.

1.1. Regiones de campo.

En la Figura 1-1 se puede observar la región de campo de una antena, esta región es el espacio que rodea a una antena, es usualmente subdividida dentro de 3 regiones: Campo cercano reactivo, campo cercano radiactivo (campo de Fresnel) y campo lejano (campo de Fraunhofer).

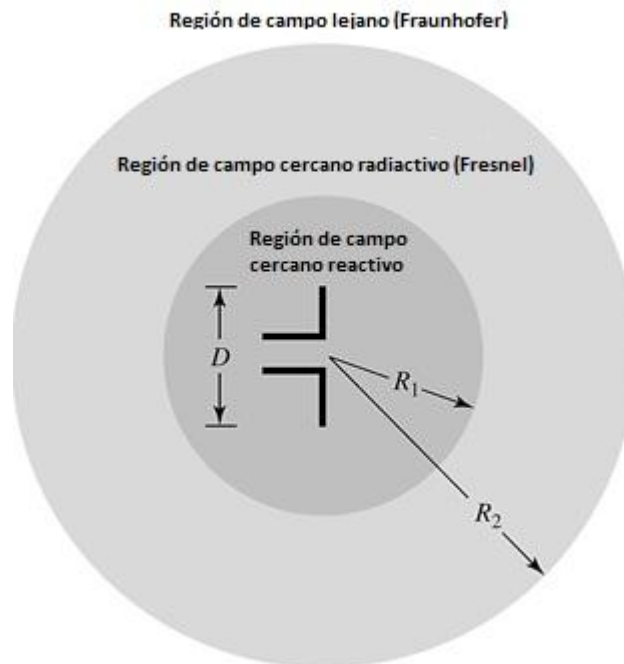


Figura 1-1. Regiones de campo de una antena [1].

Estas regiones son diseñadas para identificar la estructura del campo en las antenas. Aunque no hay cambios abruptos en la configuración del campo, se observa que las fronteras se cruzan y hay claras diferencias entre ellas. Las fronteras separadas en estas regiones no son únicas, aunque varios criterios han sido establecidos y son comúnmente usados para identificar las regiones [1].

1.1.1. Región de campo cercano reactivo.

Es definida como “La parte de la región del campo cercano que rodea inmediatamente la antena en el que el campo reactivo predomina”. Para la

mayoría de las antenas, la frontera exterior de esta región existe comúnmente a una distancia R_1 de la superficie de la antena.

$$R_1 < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (1.1)$$

Donde:

R_1 Es la distancia desde la antena hasta la frontera que se encuentra entre la región de campo cercano reactivo y la región de campo cercano radiactivo.

D Es la dimensión de la antena o diámetro de la antena.

λ Es la longitud de onda de la frecuencia de trabajo de la antena.

“Para un dipolo muy pequeño o un radiador equivalente, la frontera exterior es comúnmente tomada como una distancia R_1' de la superficie de la antena” [1].

$$R_1' = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1.2)$$

1.1.2. Región de campo cercano radiactivo (Región de Fresnel).

Es definida como “La región del campo de una antena comprendida entre la región de campo cercano reactivo y la región de campo lejano, en el que el campo radiactivo predomina y en el que la distribución de campo angular depende del diámetro de la antena”.

Si la antena tiene un diámetro máximo que no es largo en comparación con la longitud de onda, esta región puede no existir.

Para una antena centrada en el infinito, la región de campo cercano radiactiva es algunas veces referida como la región de Fresnel en base con la analogía de la terminología óptica.

Si la antena tiene un diámetro máximo global el cual es muy pequeño comparado con la longitud de onda, esta región del campo puede no existir.

La frontera interior se considera como la distancia:

$$R_2 \geq 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (1.3)$$

Y la Frontera exterior como la distancia:

$$R_2 < 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (1.4)$$

Estos criterios se basan en una fase máxima de $\pi/8$. En esta región el patrón de radiación del campo es en general, una función de la distancia radial y la componente de campo radial puede ser apreciable [1].

1.1.3. Región de campo lejano (Región de Fraunhofer).

Es definida como “La región del campo de la antena donde la distribución de campo angular es esencialmente independiente del diámetro de la antena. Si la antena tiene un diámetro global máximo D , la región de campo lejano es comúnmente tomada a distancias mayores que R de la antena.

$$R > 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (1.5)$$

Los patrones del campo lejano de ciertas antenas, como lo son las antenas de reflector multirayo, son sensitivas a variaciones en fase sobre sus aperturas. Para las antenas, esta distancia R puede ser inadecuada por medios físicos, si la antena tiene un diámetro global máximo D que es largo comparado con $\pi/|\gamma|$, la región de campo lejano puede ser tomada aproximadamente como una distancia R' de la antena.

$$R' = \frac{|\gamma|D^2}{\pi} \quad (1.6)$$

Siendo γ la constante de propagación en el medio dada en rad/m . Para una antena centrada en el infinito, la región de campo lejano es algunas veces referida como la región de Fraunhofer en base con la analogía de la terminología óptica”. En esta región, las componentes de campo son

esencialmente transversales y la distribución angular es independiente de la distancia radial donde las medidas están hechas. La frontera interior se toma como la distancia radial R , y la frontera exterior como infinito [1].

$$R = 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (1.7)$$

1.2. Medidas de campos electromagnéticos.

La variedad de técnicas de medida de campos electromagnéticos es bastante extensa. Los siguientes ejemplos representan una muestra de los tipos más comunes de medidas y sus parámetros, los cuales son afectados por las pruebas del entorno [2].

1.2.1. Patrones de antena.

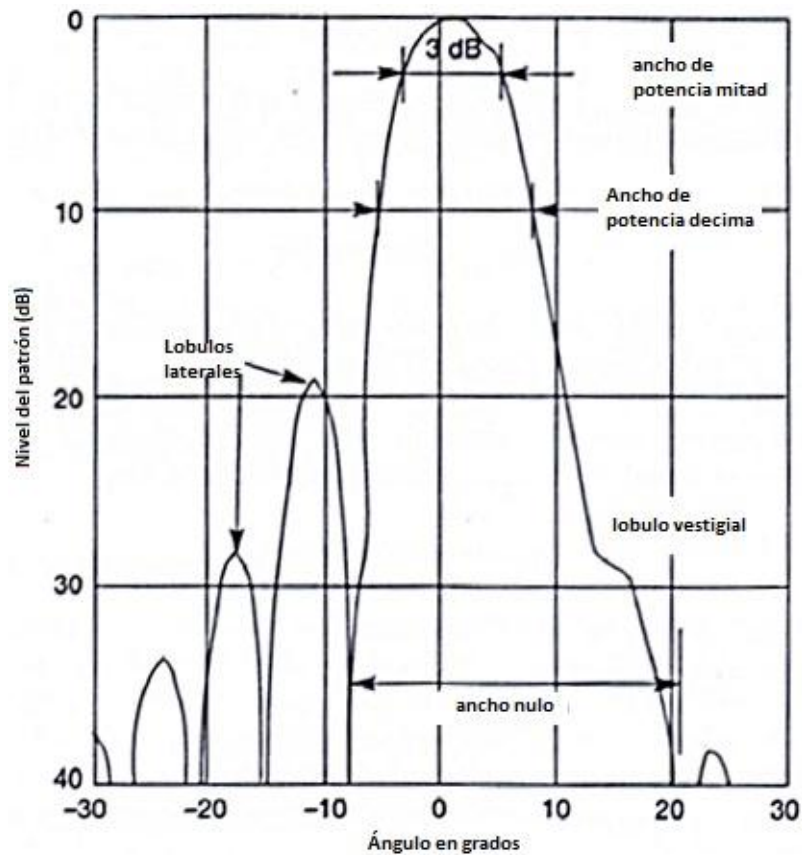


Figura 1-2. Patrón de radiación generalizado de una antena [2].

La energía radiada en una antena es un problema tridimensional. La forma puede ser casi esférica o toda la energía puede ser dirigida en una dirección. Las instalaciones de antenas de medición varían en gran medida, dependiendo del propósito del sistema de la antena y el tipo de patrón de radiación que esta genera. Antenas de baja ganancia o eléctricamente pequeñas pueden ser medidas en simples cámaras rectangulares en el rango de frecuencias de microondas, pero requiere cámaras diseñadas especialmente por debajo de 1GHz, debido a las propiedades de absorción del material anecóico (estas propiedades se pueden observar en el capítulo 4) que deben ser utilizados en las frecuencias más bajas. Las antenas de alta ganancia requieren espacios extensos para hacer medidas al aire libre o el uso de interiores compactos especializados en medidas electromagnéticas para antenas. Cada una de las diferentes instalaciones aproxima el entorno de prueba ideal para diferentes grados de rendimientos.

La Figura 1-2 muestra un patrón de radiación de una antena generalizado. Un lóbulo mayor es mostrado con su ancho de potencia mitad. Los niveles de los lóbulos laterales también se muestran. La ganancia de la antena hace referencia al pico más alto del patrón de radiación. La precisión del patrón de radiación medido es una función del nivel de energías extrañas existentes en la región de prueba de la antena. Si el nivel extraño es $-45dB$, entonces el lóbulo lateral de $-20dB$ podría tener una incertidumbre asociada con la medición de $\pm 1dB$.

La Figura 1-3 es usada para evaluar los grados de incertidumbre que se aplican a una medida dada, conociendo el nivel de energía extraña que exista en la región de prueba y un nivel de patrón determinado [2].

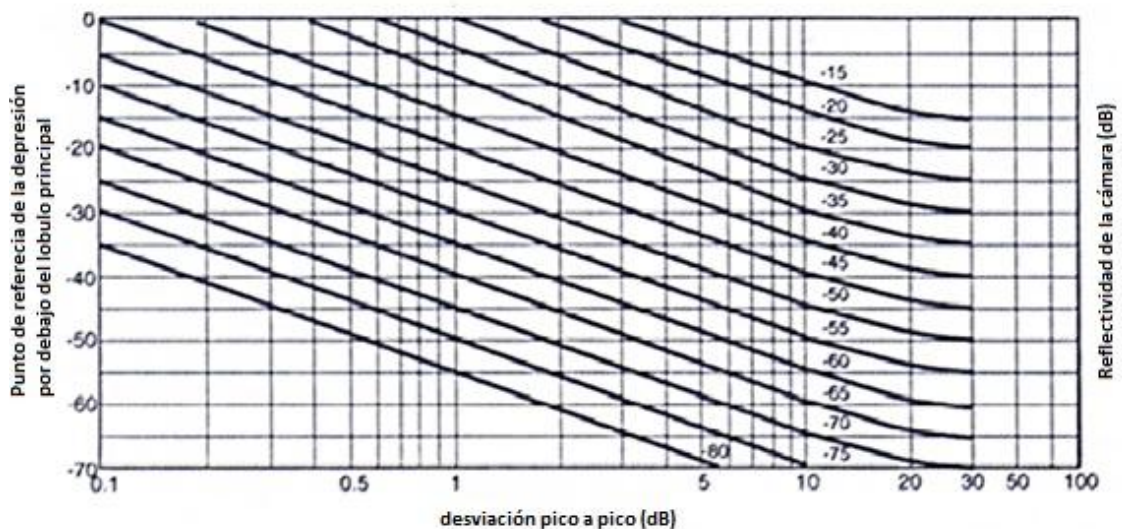


Figura 1-3. Nivel de incertidumbre de un patrón vs el nivel de señales extrañas [2].

1.2.2. Requerimientos de prueba de espacio libre.

Las características de radiación de un dispositivo electrónico en coordenadas esféricas bajo un conjunto dado de condiciones pueden ser descritas por las siguientes funciones.

$$\begin{array}{l} G_1(\phi, \theta), G_2(\phi, \theta) \\ \delta(\phi, \theta) \\ \eta \\ Z \end{array} \quad (1.8)$$

Donde G_1 y G_2 son las funciones de ganancia para dos polarizaciones ortogonales, δ es el ángulo de fase entre las señales de salida para las dos polarizaciones, η es la eficiencia del dispositivo determinado por sus terminales de entrada. Estas relaciones se muestran en la Figura 1-4.

Solo en el caso de un radiador intencional, como una antena, estos parámetros son fácilmente determinados. Adicionalmente los factores ambientales deben ser considerados en cualquier problema de medición electromagnética y su asignación tiene que ser tomada en cuenta por sus efectos.

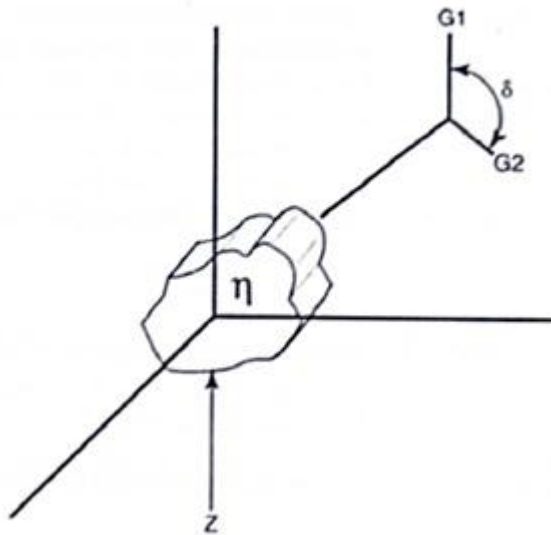


Figura 1-4. Relación simbólica de los parámetros de medida [2].

Antes de proceder a especificar las pruebas electromagnéticas que se realizan en la cámara anecóica, es apropiado revisar ciertos términos

fundamentales y las relaciones que son básicas para las mediciones electromagnéticas [2].

1.2.2.1. Fase.

Un criterio comúnmente empleado para determinar la separación mínima admisible entre la antena fuente y la antena bajo prueba es restringir la variación de fase para que sea menos que un máximo de $\pi/8$ radianes, o 22,5 grados.

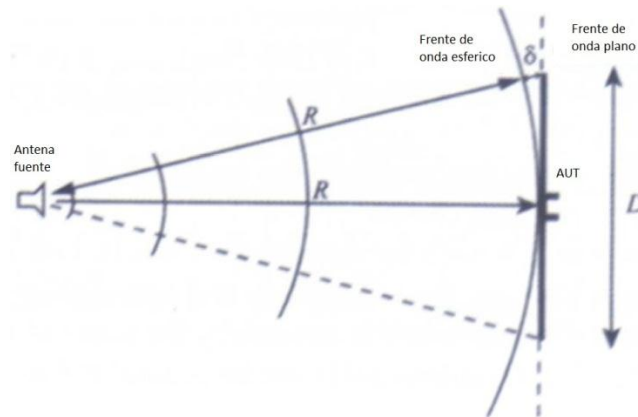


Figura 1-5. Derivación del criterio de campo lejano [2].

Considere una antena fuente de ondas esféricas y una antena bajo prueba, conocida también por sus siglas en inglés como AUT (antenna under test), localizadas a una distancia R , como se ilustra en la Figura 1-5 la mayor diferencia de fase entre la onda esférica y la onda plana ideal aparece en los bordes de la AUT, que corresponde a la diferencia en la trayectoria de la longitud de onda δ . Bajo la condición de variación de fase, $k\delta$ cumple el requisito.

$$k\delta \leq \frac{\pi}{8} \quad (1.9)$$

La diferencia en la trayectoria de la longitud de onda δ , se determina observando que:

$$(R + \delta)^2 = R^2 + (D_{max}/2)^2 \quad (1.10)$$

La única solución física para δ de la ecuación cuadrática anterior es:

$$\delta = (R^2 + (D_{max}/2)^2)^{1/2} - R \quad (1.11)$$

La ecuación anterior se aproxima por el uso de la expansión binomial (solo para los dos primeros términos) como:

$$\delta = R \left[1 + \left(\frac{D_{max}}{2R} \right)^2 - 1 \right] = R \left[1 + \frac{1}{2 \left(\frac{D_{max}}{2R} \right)^2} - 1 \right] = \frac{D_{max}^2}{4R} \quad (1.12)$$

La mínima distancia de la fuente de la onda esférica es ahora determinada del requisito de la ecuación (1.9),

$$k \frac{D_{max}^2}{4R} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \left(\frac{D_{max}^2}{4R} \right) \leq \frac{\pi}{8} \quad (1.13)$$

$$\frac{2D_{max}^2}{\lambda} \leq \frac{R}{2} \quad (1.14)$$

Bajo la condición de la ecuación (1.7):

$$R_{min} = \frac{2D_{max}^2}{\lambda} \quad (1.15)$$

Si las medidas de la antena son hechas en este rango de longitud entonces habrá una salida de menor importancia de los valores nulos y de la ubicación de los lóbulos menores del patrón de radiación de sus infinitos valores del alcance.

La ecuación (1.15) se obtuvo como una guía para establecer un rango de medida de la antena para medir con precisión el patrón de radiación. Al llevar a cabo las medidas de la sección transversal de radar las preocupaciones no son el patrón de radiación de las antenas fuente y receptora, pero si la iluminación de la antena bajo prueba o AUT. La exigencia principal es que la

antena fuente tiene una amplitud y unas características de fase relativamente constante.

Estas exigencias pueden ser logradas con la AUT más cerca de la antenna fuente que el valor calculado por la ecuación (1.15).

No hay un criterio publicado que se conoce para determinar exactamente que tan cerca la AUT podría estar de la antenna fuente. Algunas orientaciones donde la fase dentro de un ancho de banda de $-3dB$ es esencialmente el mismo que en el infinito para una distancia de $R/4$ o $0,5D^2/\lambda$. La ecuación (1.15) puede ser generalizada por:

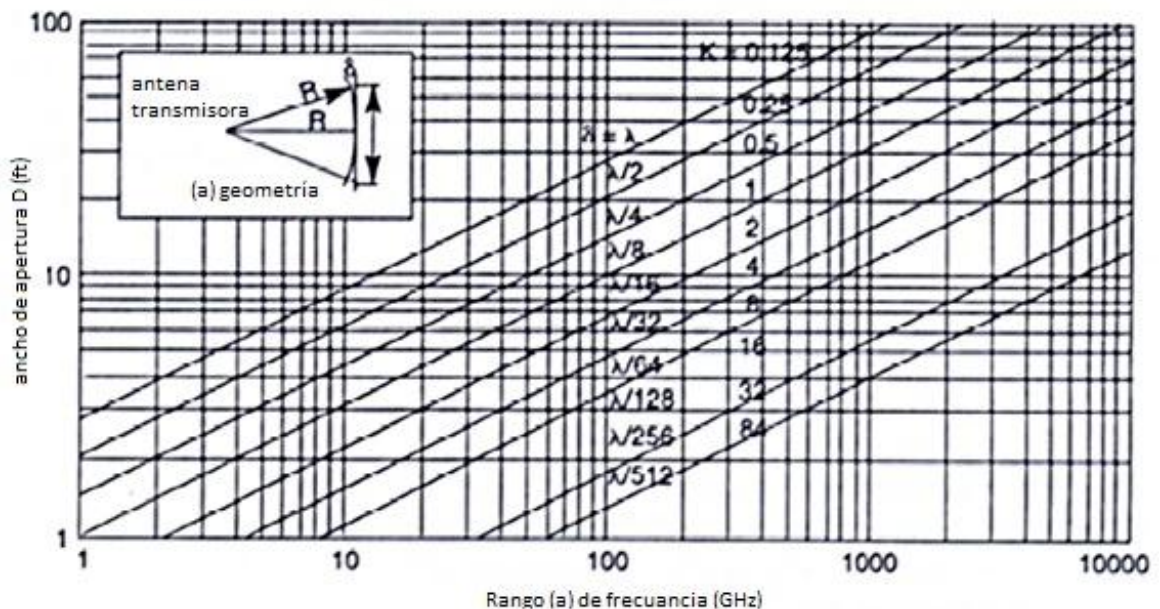


Figura 1-6. Tamaño de la región de prueba vs longitud de rango y frecuencia [2].

$$R = \frac{KD^2}{\lambda} \quad (1.16)$$

Cuando se requiere una precisión de $1dB$, se ha mostrado que K podría estar entre 2 y 10, dependiendo de las características de la AUT. Un gráfico conveniente para la determinación del tamaño del objetivo como una función de K está dado en la Figura 1-6.

Las emisiones de radiación y las medidas de susceptibilidad son usualmente llevadas a cabo tanto para los campos cercanos y lejanos debido a la amplia cobertura de frecuencias y las distancias establecidas por los requisitos de prueba [2].

1.2.2.2. Amplitud.

Para la precisión en simulación de las medidas de la zona lejana, el campo iluminado debe ser suficientemente constante en amplitud tanto a lo largo de la línea de vista como en planos normales a la línea de vista. Si la uniformidad del campo no es suficiente a lo largo del eje, entonces podría ocurrir error en la medida, especialmente en los lóbulos menores. Si la amplitud cónica a través de la abertura es muy grande, entonces el patrón de radiación medido podría variar significativamente en el espacio libre. Para altos rendimientos los rangos cónicos de la antena son generalmente considerados menor que $0,25 \text{ dB}$, resultando en un error de ganancia medido menor de $0,1 \text{ dB}$. Para un rango de longitud de $R = KD^2/\lambda$, el diámetro fuente podría ser restringido por

$$d \leq 0,37KD \quad (1.17)$$

Donde d es el diámetro de la antena fuente, K es una constante y D es el diámetro de la AUT.

Para la mayoría de antenas medidas, si la variación de amplitud se mantiene menor que 1 dB , entonces el error es usualmente aceptable [2].

1.2.2.3. Polarización.

A una gran distancia de una antena radiante, los vectores eléctrico (E) y magnético (H) del campo radiado están en ángulos rectos entre sí y la dirección de propagación. Los dos campos oscilan en fase tiempo y la relación de sus magnitudes (E/H) es una constante ζ (la impedancia intrínseca del espacio libre), y tiene un valor de aproximadamente 120π ohmios.

La polarización de un campo electromagnético es descrita en términos de la dirección en el espacio del campo eléctrico. Si el vector que describe el campo eléctrico como un punto en el espacio está siempre dirigido a lo largo de una línea, que es necesariamente normal a la dirección de propagación, el campo se dice que es linealmente polarizado en general, sin embargo, el término del vector eléctrico describe una elipse y se dice que el campo es elípticamente polarizado.

Los dispositivos de radiación exhiben propiedades de polarización en relación con los campos que irradian y reciben. Si una antena es operada

como receptora, no habrá en general la polarización emparejada al campo incidente. Si se trata de polarización emparejada, se va a extraer la máxima potencia del campo y la eficiencia de polarización se dice que es la unidad. Si su polarización es ortogonal al campo, se va a extraer potencia cero, y la eficiencia de polarización es consecuentemente cero.

Las propiedades de polarización del campo y la antena se enfocan principalmente en todos los problemas relacionados con la comunicación entre antenas [2].

1.2.2.4. La fórmula de transmisión de Friss.

Si fuera necesario determinar la transferencia de potencia entre dos antenas recurriendo a los procesos básicos que son definidos por las ecuaciones de campo y la teoría de difracción, los cálculos podrían ser virtualmente imposibles para todos pero es más simple para las antenas. La fórmula de transmisión de Friss permite la transferencia de potencia que se determinará del conocimiento de las medidas de propiedades directivas y la atenuación disipada de las antenas, independiente de su diseño detallado [2].

$$P_r \equiv P_o G(\phi, \theta) G'(\phi', \theta') \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \Gamma \quad (1.17)$$

P_r = Potencia recibida,

P_o = Potencia transmitida,

$G(\phi, \theta)$ = Ganancia transmitida de la antena en dirección de otra antena,

$G'(\phi', \theta')$ = Ganancia recibida de la antena en dirección de otra antena,

λ = Longitud de onda en dimensiones de R ,

R = Longitud de polarización en metros o pies o pies.

Γ = Eficiencia de polarización, una medida de que tan bien esta las polarización emparejada de las antenas.

2. Capítulo 2 – Jaula de Faraday.

2.1. Introducción

En este capítulo se estudiará la Jaula de Faraday la cual es un apantallamiento metálico que evita las interferencias electromagnéticas externas [7].

2.2. Descripción

2.2.1. Jaula de Faraday

La Jaula de Faraday se puede considerar como una superficie conductora que rodea un espacio hueco e impide las perturbaciones producidas por campos electromagnéticos externos. En el año 1836 Faraday demostró experimentalmente la protección que brinda una cubierta metálica, realizó una prueba sosteniendo un electroscopio y se colocó en el interior de una jaula metálica, que su asistente electrizó a gran voltaje. A pesar de que la superficie de la jaula no era continua constituyo un blindaje electroestático muy eficaz, de manera que Faraday no detectó deflexión alguna en las laminillas del electroscopio ni tampoco descarga eléctrica alguna [3].

2.2.2. Aplicaciones de la Jaula de Faraday.

Este fenómeno, descubierto por Michael Faraday, tiene una aplicación importante en protección de equipos electrónicos delicados, tales como repetidores de radio y televisión situados en las cimas de montañas y expuestos a las perturbaciones electromagnéticas causadas por las tormentas.

En la cámara anecóica la jaula de Faraday es uno de los principales componentes, ya que permite tener en el interior de la cámara un espacio libre de cualquier interferencia electromagnética provocada por señales externas a las que están a prueba [6].

2.3. Materiales Conductores

Un material conductor es aquel que, al cargar una pequeña área, la carga de inmediato se distribuye por sí misma, sobre la superficie total del material [7].

2.4. Materiales Magnéticos.

Existen diversos tipos de comportamiento de los materiales magnéticos, siendo los principales el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo [7].

2.4.1. Materiales Ferromagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos son aquellos materiales que presentan ordenamiento magnético y se dejan influenciar fácilmente por un campo magnético, adquiriendo propiedades magnéticas y convirtiéndose en imanes; los materiales ferromagnéticos tienen permeabilidad alta [4].

2.4.2. Materiales Paramagnéticos.

Los materiales paramagnéticos son materiales en los cuales los momentos dipolares magnéticos no tienen interacción entre sí y están orientados aleatoriamente. Sin embargo cuando son sometidos a un campo exterior magnético los dipolos tienden a orientarse parcialmente en el mismo sentido y dirección a la del campo sometido [5].

2.4.3. Materiales Diamagnéticos.

Los materiales diamagnéticos no cumplen con las características requeridas para la construcción de una jaula de Faraday, sin embargo en el capítulo cuatro de este documento se hace un análisis de estos materiales, ya que son los usados para la elaboración de paneles absorbentes [7].

2.5. Material a seleccionar

En la Tabla 2.1 se comparan tres materiales paramagnéticos: Aluminio, Hierro y Cobre, estos tres materiales son los más comunes en el mercado. Los tres materiales tienen propiedades similares, con los cuales la jaula de Faraday podría funcionar, sin embargo económicamente sí existe gran diferencia entre estos materiales siendo el aluminio el más costoso y el hierro el más económico. Como se dijo anteriormente, existe gran similitud en las propiedades de estos materiales pero el hierro, que es el de bajo costo, presenta un problema que el aluminio no tiene, y es la corrosión que puede presentar con el tiempo; para esto existe un tipo de hierro (hierro

galvanizado) con el cual se evitan problemas de corrosión y se bajan costos [7].

Tabla 2-1. Cuadro comparativo de algunos materiales [7].

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	PESO	COSTO
ALUMINIO	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerte y de larga duración. • Resistente a la corrosión. • Excelente conductor de calor y electricidad. • Fácil manejo. • No magnetizable. • Reciclable. 	Liviano (Peso Atómico 26.98 g/mol)	Elevado.
COBRE	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente conductor térmico y eléctrico. • Resistente a la corrosión. • No magnético. • Reciclable. • Fácil de alear. 	Pesado (Peso Atómico 63.54 g/mol)	Elevado.
HIERRO	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta propiedades magnéticas. • Conductor térmico y eléctrico. • No resistente a la corrosión. • Baja dureza. 	Pesado (Peso Atómico 55.84 g/mol)	Bajo.

El hierro galvanizado es un hierro o acero que ha sido recubierto con una capa de zinc para protegerlo de corrosión, estos usualmente son galvanizados sumergiéndolos en zinc fundido. La formación de una aleación quebradiza de hierro y zinc se evita agregando pequeñas cantidades de aluminio o magnesio.

El galvanizado es un método eficaz de proteger el acero porque incluso si la superficie es rayada, el zinc todavía protege al metal subyacente [6].

3. Capítulo 3 – Diseño Cámara Anecóica

3.1. Definición cámara Anecóica

Una cámara Anecóica es un recinto capaz de absorber las ondas sonoras o electromagnéticas sin reflejarlas. La palabra anecóica hace referencia a “no eco”, es decir, que una onda puede viajar por el medio sin tener interferencia alguna con el eco de la misma.

La cámara anecóica de radiofrecuencia consta de dos partes fundamentales: la jaula de Faraday que tiene la propiedad de aislar las ondas que se encuentran en el medio y el material absorbente de radiofrecuencia que tiene la propiedad de absorber las ondas electromagnéticas sin reflejarlas, simulando así un campo abierto ideal.

Existen diferentes tipos de cámaras anecóicas: rectangulares, cónicas y una gran variedad de mezclas entre rectangulares y cónicas. Cada diseño a utilizar depende de diferentes criterios como: aplicaciones, dimensiones y especificaciones electromagnéticas [7], [8].

3.2. Aplicaciones de una cámara Anecóica

La necesidad para pruebas internas de dispositivos de radiación electromagnética que comenzaron a inicios de 1950, ha llevado a un número de compañías a proveer las cámaras y productos absorbentes de apoyo a una amplia gama de requisitos de pruebas electromagnéticas [9]. El rango de productos a probar va desde antenas de telefonía hasta vehículos o aviones [2].

En años recientes la proliferación de dispositivos electrónicos portables ha llevado a interferencias electromagnéticas entre diversos productos. Debido a estas interferencias, varias agencias del gobierno de todo el mundo han tenido que crear requisitos para las pruebas por las emisiones y la inmunidad. Esto ha conducido a la amplia utilización de las instalaciones cerradas para las pruebas electromagnéticas [10].

El uso de cámaras anecóicas se pueden apreciar en diferentes campos como en la industria aeroespacial, médica, musical, militar, electrónica y en la simulación de un campo abierto ideal para medir el patrón de radiación de una antena [7].

3.3. Diseño de la cámara anecóica

Antes de proceder al diseño de la cámara anecóica, es necesario hacer un breve repaso de los campos de prueba de espacio libre para establecer el escenario.

Los campos de reflexión son diseñados para hacer uso de la energía que es radiada de la superficie de campo para crear interferencia constructiva con la ruta directa de la señal en la región sobre la apertura de prueba. La geometría es controlada de modo que un cono simétrico de pequeña amplitud es producido en el campo de iluminación.

Geometrías típicas asociadas con el enfoque de espacio libre incluyen el rango de elevación, la distancia oblicua, la cámara anecóica rectangular, el rango compacto y las frecuencias limitantes.

El entorno de prueba ideal para determinar el desempeño de la zona o campo lejano observado en el Capítulo 1 prevé una onda plana de amplitud uniforme para iluminar la apertura de prueba. Diversos enfoques para la simulación de estos entornos electromagnéticos ideales han llevado a la evolución de dos tipos de campos de prueba de las antenas: campos de espacio libre y campos de reflexión.

Los campos de espacio libre son aquellos en que una prueba es hecha para suprimir o remover los efectos de un entorno, incluyendo la superficie de campo o las superficies a lo largo del frente de onda que ilumina la antena de prueba. Esta supresión se busca a través de uno o más factores como [2]:

1. Directividad y supresión de los lóbulos laterales de la antena fuente y la antena bajo prueba.
2. Despeje de la línea de vista en la superficie de campo.
3. Redirección o absorción de energía que alcanza la superficie de campo.
4. Técnicas especiales de procesamiento de señales como marcado por la modulación de la señal deseada, bloqueo de las señales, y técnicas del dominio del tiempo o mediante el uso de pulsos cortos.

3.3.1. Características de las antenas que se van a utilizar.

Tabla 3-1. Características de las antenas.

Antena No.	Frecuencia de trabajo (GHz)	Diámetro (m)	Longitud de onda λ (m)
Antena 1	1	0,16	0,3
Antena 2	10	0,12	0,03

3.3.2. Determinación de las medidas

3.3.2.1. Determinación del campo lejano

El primer factor que se tuvo en cuenta para determinar las medidas de la cámara es que se cumpla la ecuación de campo lejano vista en el capítulo 1.

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

Reemplazando los valores que tenemos de las antenas a trabajar se obtienen los siguientes datos:

Para la antena 1:

$$R = \frac{2(0,16 \text{ m})^2}{0,3 \text{ m}} \quad (3.2)$$

$$R = 0,17 \text{ m} \quad (3.3)$$

Para la antena 2:

$$R = \frac{2(0,12 \text{ m})^2}{0,03 \text{ m}} \quad (3.4)$$

$$R = 0,96 \text{ m} \quad (3.5)$$

Se observa que para la antena 2 se requiere una distancia de $0.96m$; esta distancia está comprendida en todo el radio de las antenas. Para asegurar que la distancia siempre cumpla, se toma esta como distancia mínima [2].

$$R_{min} \geq 1 m \quad (3.6)$$

3.3.2.2. Planteamiento del largo, ancho y altura de la cámara de la cámara anecóica.

Para determinar el largo L de la cámara anecóica, se ha observado en la literatura que la cámara anecóica necesita una pared de algún tipo de material absorbente para atenuar los rayos que rebotan sobre ella [2], [7], [8], se tuvieron en cuenta las distancias P_1 y P_2 que son el espesor que tiene cada pared absorbente (donde P_1 es el espesor del panel que se encuentra detrás de la antena fuente y P_2 del panel que se encuentra detrás de la AUT), R_1 y R_2 que son las distancias que van desde las antenas hacia las paredes que se encuentran detrás de ella y se tomo de un valor de $1,2m$ y la distancia R_a que es la separación entre la antena fuente y la AUT (esta distancia se tomo de $2m$ la cual es superior a la distancia mínima entre las antenas),

$$L = P_1 + R_1 + R_a + R_2 + P_2 \quad (3.7)$$

$$L = 0,3m + 1,2m + 2m + 1,2m + 0,3m \quad (3.8)$$

$$L = 5m \quad (3.9)$$

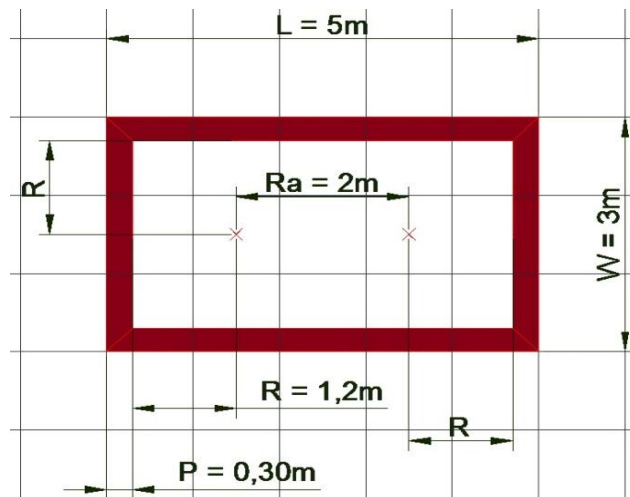


Figura 3-1. Ubicación de las antenas y medidas de la cámara anecóica, vista superior.

Para el ancho (w) y el alto (h) de la cámara anecóica, se considera una distancia igual que sea mayor a 2 veces la distancia mínima, en este caso se consideró de 3 m.

$$w = 3m \quad (3.10)$$

$$h = 3m \quad (3.11)$$

3.3.3. Consideraciones a tener en cuenta.

3.3.3.1. Ancho de la cámara anecóica.

Para el ancho de la cámara anecóica hay que tener en cuenta una relación de:

$$W > \frac{R_a}{2} \quad (3.12)$$

Donde W es el ancho de la cámara anecoica y R_a es la distancia entre las antenas.

Según las características de las antenas se tiene que [7]:

$$W > \frac{2m}{2} \quad (3.13)$$

$$W > 1 m \quad (3.14)$$

El ancho de la cámara anecóica es de 306,2 cm ó 3,062 m que cumple con esta condición; esta consideración se debe tener en cuenta también en la altura. (En el capítulo 5 se puede observar cómo se determinó el ancho de la cámara anecóica).

3.3.3.2. Región de prueba

La región de prueba es el volumen de prueba o zona de silencio y debe ser mayor al diámetro de la antena.

El diámetro de la región de prueba puede estar en el orden de:

$$DP = \frac{W}{3} \quad (3.15)$$

$$DP = \frac{3m}{3} \quad (3.16)$$

$$DP = 1 m \quad (3.17)$$

El diámetro mínimo de la región de prueba (DP) es de $1 m$, por lo cual, al hacer alguna prueba, siempre debe ser con distancias mayores a $1 m$ [7].

3.3.3.3. Rango de elevación de las antenas. Rango de elevación de las antenas [2].

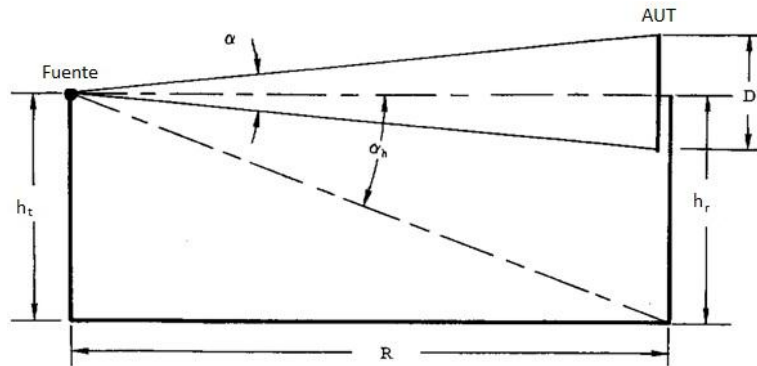


Figura 3-2. Rango de elevación de las antenas [2].

$$h_r \geq 4D \quad (3.18)$$

Para la antena 1:

$$h_r \geq 4(0,16 m) \quad (3.19)$$

$$h_r \geq 0,64 m \quad (3.20)$$

Para la antena 2:

$$h_r \geq 4(0,12m) \quad (3.21)$$

$$h_r \geq 0,48 m \quad (3.22)$$

h_r Es el rango de elevación de las antenas. Para estar siempre seguros es mejor colocar siempre las antenas fuente y AUT a una altura mayor que $0,64 m$ para asegurar siempre que cumplan el requisito del rango de elevación de las antenas [2].

3.3.3.4. Diámetro de la antena patrón.

Para determinar el diámetro máximo de la antena fuente donde la amplitud cónica es limitada a $0.25 dB$, se tiene:

$$d \leq 0,37 \frac{\lambda R_a}{D} \quad (3.23)$$

Para la antena 1:

$$d_1 \leq 0,37 \frac{(0,3m)(2m)}{0,16m} \quad (3.24)$$

$$d_1 \leq 1.4 m \quad (3.25)$$

Para la antena 2:

$$d_2 \leq 0,37 \frac{(0,03m)(2m)}{0,12m} \quad (3.26)$$

$$d_2 \leq 0,185m \text{ ó } 18,5 \text{ cm} \quad (3.27)$$

Se puede observar que en las dos condiciones de diámetro para este caso las dos antenas cumplen [2].

3.3.3.5. Procedimiento de diseño con el método de trazado de rayos

Este proceso es utilizado para determinar el caso más crítico del nivel de la señal reflejada.

Basando el análisis en la selección de los paneles absorbentes y en su tamaño, se obtiene un ancho de $3,062 m$, un alto de $3,05 m$ y un largo de $4,892 m$ (en el capítulo 5 se explica la determinación de estas medidas).

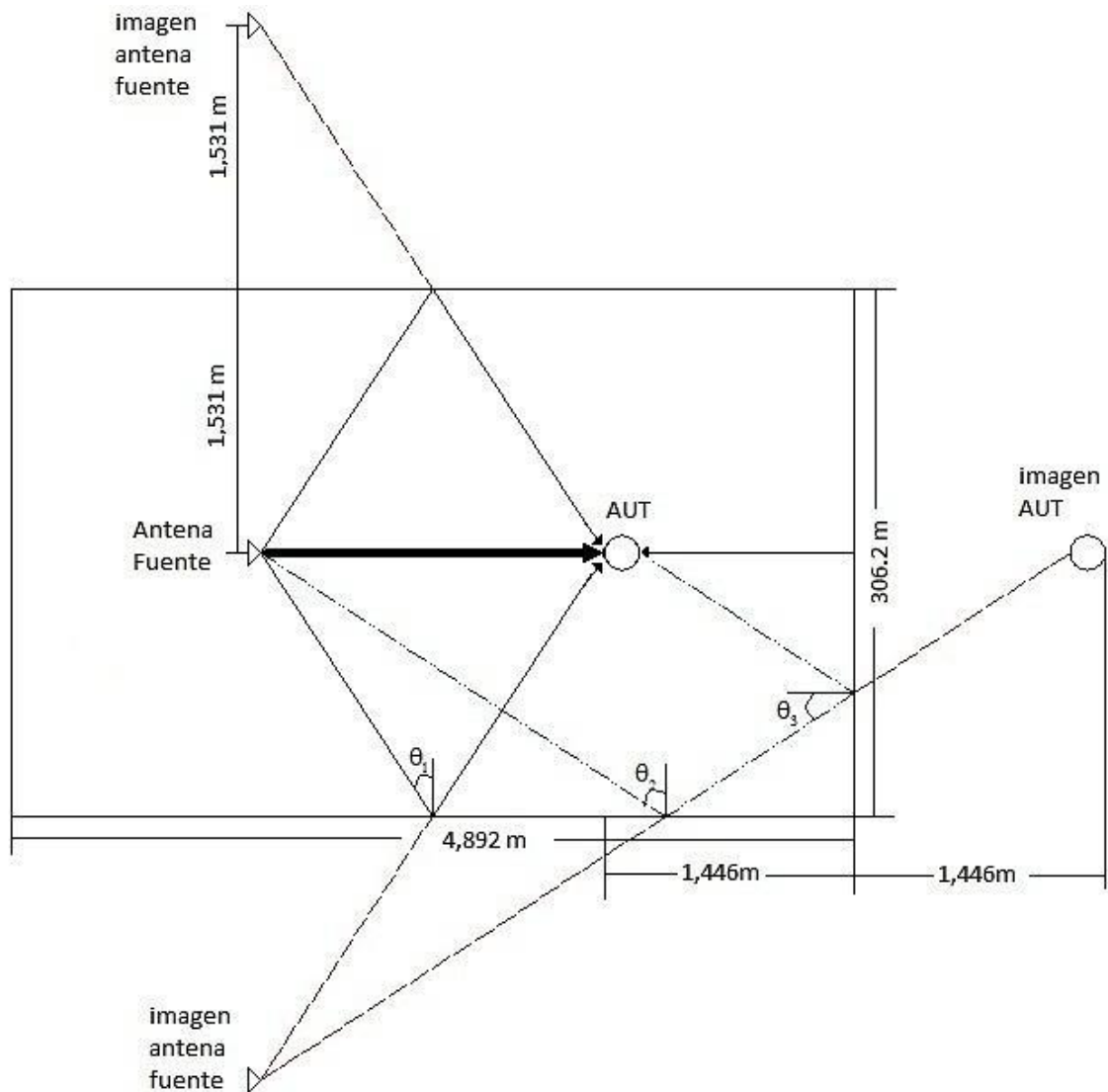


Figura 3-3. Diseño del método de trayectoria de rayos modificada de [2].

En la Figura 3-3 se puede observar el método trayectoria de rayos. Los rayos que tienen una línea continua son los de mayor importancia pues son los más directivos con la menor pérdida en potencia y sin desfase.

Los rayos de trayectoria directa van desde la antena fuente hasta la AUT y son dibujados con una línea continua sólida. Los rayos de rebote simple van desde la antena fuente rebotando en las paredes laterales (incluyendo techo y piso) y la pared final (pared que es la que se encuentra detrás de la AUT) hasta la AUT y son dibujados con una línea continua. Los rayos de rebote doble van desde la antena fuente rebotando por las paredes laterales (incluyendo techo y piso) y luego rebotando en la pared final hasta la AUT y son dibujados con una línea de trazo y dos puntos de color azul. Los rayos

de rebote triple no tienen importancia pues la atenuación ya es alta y la potencia que pueda entregar es despreciable.

En este análisis los rayos refractados no se tienen en cuenta pues no afectan el comportamiento de la AUT, También son ignorados los cambios en fase que se puedan causar por la velocidad de propagación en el absorbente, que es más lenta que en el espacio libre.

Cada uno de los rayos reflejados puede ser analizado como procedente de una imagen de la antena fuente; estas imágenes proyectan una línea a trazos de color rojo. La imagen asociada con las reflexiones de rebote simple son simplemente la imagen espejo de la antena en la pared que el rayo golpea. Las imágenes asociadas con las reflexiones de rebote doble son formadas primero teniendo la imagen de la antena en una pared lateral y la imagen de la AUT en una extensión de la pared final.

La Figura 3-3 ilustra una ventaja del concepto de imagen, esta es la facilidad con la que los rayos pueden ser dibujados. La línea que une a cada imagen de rebote simple con la antena real es perpendicular a la respectiva pared y a la antena real, y su imagen son equidistantes de la pared. Similarmente, las imágenes de rebote simple son visualizadas en otras paredes (o extensiones de otras paredes), a partir de las imágenes de rebote doble una línea recta trazada desde cada imagen para la ubicación de destino define la dirección de incidencia en el desarrollo y define el punto de reflexión especular en la pared. Esto proporciona una geometría simple para calcular el ángulo de incidencia sobre la pared lateral. Por ejemplo la imagen de rebote doble en la parte inferior derecha permite el cálculo rápido del ángulo de incidencia θ_3 como:

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{w}{(Ra + 2R_p)} \right) \quad (3.28)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{3,062}{(2 + 2 * 1,446)} \right) \quad (3.29)$$

$$\theta_3 = 32,04^\circ \quad (3.30)$$

Donde w es el ancho, Ra es la distancia entre la antena fuente y la AUT, y R_p es la distancia desde la antena fuente o AUT a su pared trasera.

El ángulo de incidencia θ_2 es el complemento de θ_3 .

$$\theta_2 = 90 - \theta_3 \quad (3.31)$$

$$\theta_2 = 57,96^\circ \quad (3.32)$$

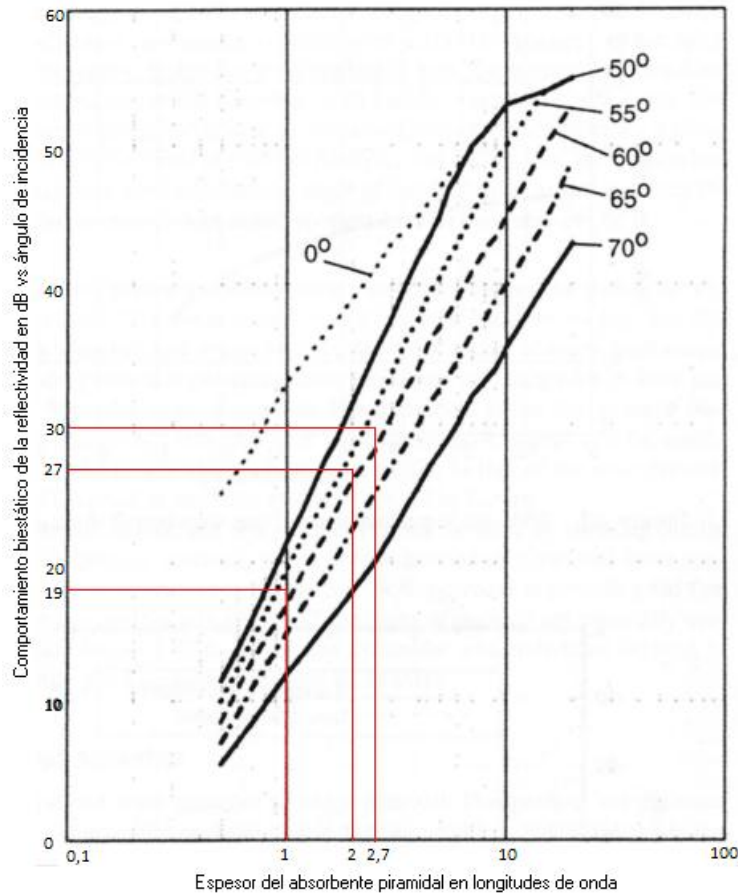


Figura 3-4. Comportamiento del ancho del ángulo del absorbente piramidal [2].

En la Figura 3-4 se puede observar el comportamiento del ancho del ángulo de desempeño del absorbente piramidal, en donde la gráfica es una comparación de la reflectividad contra el espesor del absorbente piramidal.

Para el ángulo incidente de $57,96^\circ$ se hace un análisis donde se puede observar cuál sería el espesor del absorbente piramidal para las diferentes longitudes de onda a trabajar. Este comportamiento se muestra en la Tabla 3-2 en donde se analizaron diferentes factores del espesor del absorbente en longitudes de onda (cabe aclarar que solo se están teniendo en cuenta el espesor del absorbente piramidal según la reflectividad y no el tipo de material absorbente a utilizar a utilizar) [2].

Al observar la Figura 3-4 se puede hallar el espesor piramidal de la siguiente forma:

$$x \lambda = s \quad (3.32)$$

Donde x es el número de longitudes de onda y s es el espesor piramidal.

En la Tabla 3.2 se puede observar que para bajas frecuencias el tamaño del espesor piramidal es más grande. Según la literatura se indica que una buena atenuación oscila entre $30dB$ y $40dB$, en esta misma tabla se puede apreciar que para una atenuación de $30dB$ a una frecuencia de 1 GHz se necesita un espesor piramidal de 81 cm lo que implicaría aumentar las dimensiones de la cámara anecoica. Para corregir este tamaño se debe buscar un material que sea absorbente el cual aumenta los valores de atenuación de las paredes simulando un espacio libre similar a un espacio libre ideal [7].

Tabla 3-2. Espesor piramidal según factor de longitud de onda [11].

<i>Frecuencia (GHz)</i>	<i>espesor piramida a 1λ (cm)</i>	<i>espesor piramida a 2λ (cm)</i>	<i>espesor piramida a $2,7 \lambda$ (cm)</i>
1	30	60	81
2	15	30	40,5
3	10	20	27
4	7.5	15	20,25
5	6.0	12	16,2
6	5.0	10	13,5
7	4.3	8,6	11,61
8	3.75	7,5	10,125
9	3.33	6,7	9,0
10	3,0	6,0	8,1
<i>atenuación (dB)</i>	19	27	30

Partiendo del hecho que se necesitan materiales absorbentes para que el tamaño de la cámara no sea extremadamente grande, se escoge un material absorbente. (En el capítulo 4 se observa que uno de los mejores materiales absorbentes es el poliuretano).

Se consultaron algunos fabricantes de materiales absorbentes y se encontró que la empresa ETS-LINDGREN ubicada en los Estados Unidos maneja este tipo de material en paneles piramidales absorbentes.

Al consultar los diferentes paneles piramidales absorbentes que ofrece esta empresa, basando nuestro criterio de búsqueda en las frecuencias de trabajo y la atenuación, se escoge el panel de referencia EHP-12PCL [11].

En la Figura 3-5 se pueden observar las dimensiones del panel absorbente seleccionado donde se especifican diferentes medidas como ancho, largo y las alturas de la base y la pirámide.

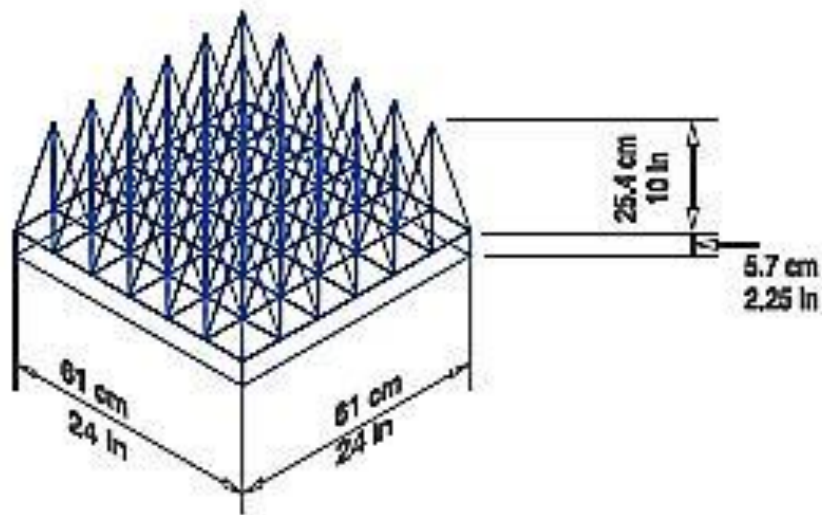


Figura 3-5. Dimensiones del panel absorbente [11].

En la Tabla 3-3 se observan características como frecuencia mínima, frecuencia máxima, de este panel, dimensiones de medida, peso y atenuación en cada frecuencia [11].

Tabla 3-3. Características del panel piramidal [11].

Dimensiones del panel absorbente				Atenuación de los rangos de frecuencia			
Altura Base (cm)	Altura Total (cm)	Altura Pirámide (cm)	Peso Panel (Kg)	Banda 1-2 GHz (dB)	Banda 2- 8 GHz (dB)	Banda -8 GHz (dB)	Banda 8-40 GHz (dB)
5,7	31,1	24,4	4,6	35	40	45	50

Como el panel absorbente seleccionado tiene una altura de 31,1 cm y en la Tabla 3-3 se observan las diferentes atenuaciones para los rangos de frecuencia, se puede apreciar cómo el material absorbente aumenta la atenuación en comparación con la Tabla 3-2.

Como se tiene una altura piramidal constante para los diferentes valores de longitudes de onda, se observa la ecuación (3.32) en donde se halla el número de longitudes de onda y, al analizar esto, se encuentran diferentes valores de atenuación como se pueden observar en la Tabla 3-4.

$$x \lambda = 0,311 m \quad (3.32)$$

$$x = \frac{0,311}{\lambda} \quad (3.32)$$

Tabla 3-4. Comparación valores de atenuación del panel absorbente vs atenuación por reflectividad [11].

<i>Frecuencia (GHz)</i>	λ (m)	<i>Atenuacion del panel absorbente (dB)</i>	<i>x</i>	<i>Atenuacion por reflectividad (dB)</i>
1	0,3000	35	1,04	19
2	0,1500	35	2,07	27
3	0,1000	40	3,11	32
4	0,0750	40	4,14	35
5	0,0600	40	5,18	39
6	0,0500	40	6,22	41
7	0,0430	40	7,23	44
8	0,0375	45	8,29	44
9	0,0333	50	9,33	47
10	0,0300	50	10,37	48

4. Capítulo 4 – Materiales Absorbentes de Radiofrecuencia

4.1. Introducción

De la correcta selección que se haga del material absorbente con el cual se recubre la cámara anecóica, depende su buen funcionamiento, debido a que este material es el que se encarga de reducir las reflexiones dentro de la cámara, para así poder simular un espacio libre sin que se afecten las pruebas que se hagan dentro de ella [7].

4.2. Características Electromagnéticas de los Materiales.

Generalmente los materiales se clasifican en tres grandes grupos, los cuales son: materiales conductores, materiales semiconductores y materiales dieléctricos o no conductores [7].

En este capítulo se tratarán los materiales no conductores o dieléctricos, debido a que los materiales conductores dentro de la cámara producen reflexiones y el objetivo de la cámara es simular espacio libre de reflexiones.

4.3. Materiales Dieléctricos.

En una región 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 también su campo eléctrico generado es similar a la de un dipolo eléctrico.

Un dipolo eléctrico es un sistema formado por dos cargas iguales pero de signos contrarios, las cuales se encuentran separadas por una distancia d , como se puede ver en la Figura 4-1.

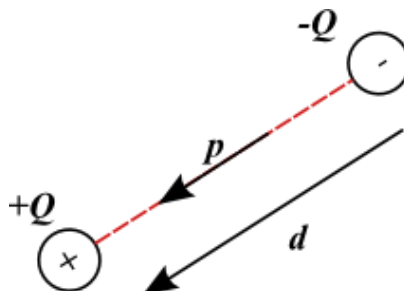


Figura 4-1. Dipolo Eléctrico [7].

Para el dipolo de la figura anterior se define un momento dipolar p , el cual es un vector cuyo módulo es el producto de la carga q por la distancia entre las cargas d .

$$\vec{p} = q * \vec{d} \quad (4.1)$$

Sobre un dipolo situado en un campo eléctrico actúan también un par de fuerzas y el momento de estas fuerzas tiende a orientar el dipolo en dirección al campo, pero la agitación térmica de las moléculas contrarresta este fenómeno. Debido a esto, cada campo y cada temperatura tendrán una orientación media por lo que estas dos son contrapuestas.

Los materiales dieléctricos presentan una característica cuando se encuentran entre capas de un material conductor y es que cuando se polarizan ellos pueden almacenar cargas. Esta característica se conoce con el nombre de Constante Dieléctrica ϵ_r . Esta constante es la relación que existe entre permitividad del material y la permitividad del vacío.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4.2)$$

Tabla 4-1. Constantes dieléctricas [7].

Materiales	Constante dieléctrica	Factor de pérdida
Polipropileno	2.20 - 2.28	0.0002 – 0.002
Siliconas	3.4 – 4.3	0.001 – 0.004
Mica	5.4 – 8.7	0.0001 – 0.0004
Nylon 6 y 10	3.5 – 3.6	0.04
Poliestireno	1.02 – 1.24	0.0001 – 0.002
Poliuretano	1.08 – 1.12	0.0002 – 0.0009
Alúmina	8.0 – 10.0	0.0001 – 0.0009
PTFE, FEP	2.0	0.0002 – 0.0003
Goma Dura	2.95 – 4.0	0.007 – 0.028

Los materiales dieléctricos no tienen conductividad gracias a su alta resistividad, ya que esta impide que los portadores de energía como los protones y electrones se muevan a través de un conductor a otro. En la Tabla 4.2 se relacionan la resistividad de algunos materiales.

Para que el material absorbente tenga un buen funcionamiento y cumpla su función, este material debe tener ciertas características, como: alta

resistividad eléctrica, alta resistividad dieléctrica y bajo factor de pérdida; adicional a esto se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar el material absorbente que este tenga una baja constante dieléctrica, con el fin de evitar la polarización en el material y no almacene energía.

Tabla 4-2. Resistividad de materiales dieléctricos [7].

materiales	resistividad ($\omega \cdot m$)
Polipropileno	10^{14}
Siliconas	10^9
Mica	10^{11}
Nylon 6 y 10	10^{13}
Poliestireno	10^{13}
Poliuretano	10^{14}
Alúmina	10^9
PTFE, FEP	10^9
Goma Dura	10^{11}

Observando las Tablas 4-1 y 4-2 y revisando los fabricantes de paneles absorbentes que existen actualmente en el mercado, se ve que el poliuretano es el material más usado por ellos, y el que más se ajusta a las propiedades que deben tener los materiales absorbentes [7].

4.3.1. Poliuretano

La fabricación de esta espuma fue descubierta por Hochlen y Droste que observaron que al reaccionar algunos poliésteres-alcoholes con diisocianatos se obtenían aductos que contenían burbujas gaseosas, debido al desplazamiento del CO_2 que se produce al reaccionar un grupo de isocianato con compuestos que tengan hidrógenos activos.

La industria de fabricación de poliuretano se mueve en dos líneas, utilizando poliésteres o polieteres. El sistema de poliésteres emplea una técnica en la que el poliéster, diisocianato, agua, catalizadores y estabilizantes de espuma se mezclan en una sola etapa. En el sistema de polieteres, se forma primero un prepolímero, el polieter y el diisocianato reaccionan primero y luego se mezcla el prepolímero con catalizadores, agua y estabilizadores de espuma.

Uno de los inconvenientes que tiene esta espuma es que al cabo del tiempo puede presentar oxidación al aire. Con el fin de evitar esto y mejorar la presentación de los paneles, los fabricantes cubren estos con pinturas

especiales, las cuales están hechas a base de carbón, que es otro material importante dentro de la absorción de radiofrecuencia [12].

4.4. Carbón

El carbón en su estado natural es un no metal, aunque el grafito que es un derivado del carbón cuenta con características conductivas semejantes a las de un semiconductor. El carbón cuenta con una característica importante y es la afinidad que tiene a la hora de formar enlaces con otros elementos ya que forman configuraciones muy estables.

El principal uso del carbón se da como componente de hidrocarburos, principalmente del petróleo y gas natural; en la industria petrolera se utiliza como materia prima de polímeros y en la del gas como fuente de energía

En las cámaras anecóicas se utiliza un carbón que se encuentra a altas temperaturas (hasta $3000^{\circ}C$) impidiendo su reestructuración para dar grafito. Este tipo de carbón se conoce como carbón activado.

El carbón activado es usado principalmente en procesos de absorción y para pruebas endoscópicas. En las cámaras anecóicas, los paneles absorbentes tienen un baño de carbón activado el cual, cuando las ondas electromagnéticas hacen fricción con él, tiene la propiedad de transformarlas en energía gracias a la porosidad con la que cuenta [7].

4.5. Funcionamiento y forma de los Materiales Absorbentes.

4.5.1. Principio de Funcionamiento.

Para analizar el funcionamiento de una cámara anecóica, suponemos que una onda electromagnética plana que viaja por el espacio libre (impedancia del espacio libre 377 ohmios) choca con una pared.

Para desarrollar cámaras anecóicas con la menor reflexión posible, primero que todo es necesario entender cómo se envía una señal a través de una línea de transmisión sin tener ninguna reflexión. Debido al recubrimiento metálico que tiene la cámara anecóica (jaula de Faraday), un modelo aproximado de línea de transmisión, podría tener un corto circuito en su terminación. Puesto que en la carga de corto circuito no se disipa energía, todas las señales enviadas a través de la línea de transmisión podrían ser reflejadas. El objetivo es encontrar algún material que se coloque en la pared para que pueda absorber o disipar esta energía.

Uno de los primeros métodos utilizados para lograr este efecto fue a través del uso de una lámina de Salisbury; con el fin de darle a esto una superficie resistiva de 377Ω por m^2 . Esta lámina se coloca a $1/4$ de λ de la pared de metal. Este material hace que la señal reflejada desaparezca virtualmente.

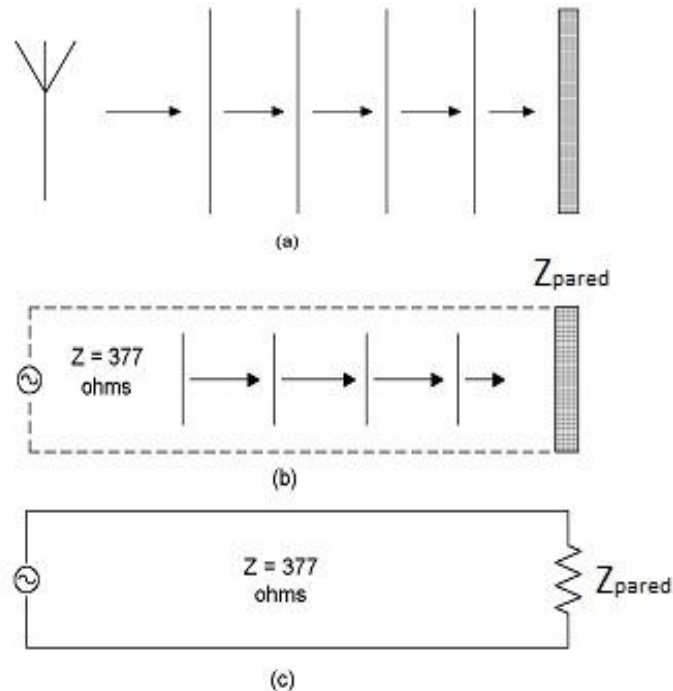


Figura 4-2. Modelado de la señal emitida en el espacio libre [13].

Para ver el funcionamiento de la lámina Salisbury se puede observar la Figura 4-3, que ilustra una línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda de largo con una impedancia característica de 377Ω . La carga es un corto circuito, el voltaje de la fuente también tiene una impedancia fuente de 377Ω dividido en dos resistencias de 188.8Ω cada una. Cuando se enciende la señal de la fuente generadora una onda senoidal se propaga por la línea de transmisión a la carga (Figura 4-3(b)). Puesto que la impedancia característica de la línea de transmisión también es 377Ω y la amplitud de la señal es reducida a la mitad $V_{out} / 2$ (por lo menos inicialmente).

Al alcanzar la carga, una señal reflejada es enviada de vuelta. Debido a que la línea de transmisión es de un cuarto de longitud de onda, la señal reflejada está exactamente en fase con la transmitida y a medida que se devuelve hacia la fuente la amplitud del voltaje a través de la línea de transmisión es el doble.

En el punto A en la Figura 4-3(a), exactamente un cuarto de longitud de onda lejos de la carga, la línea de transmisión tiene una impedancia igual a la de un circuito abierto.

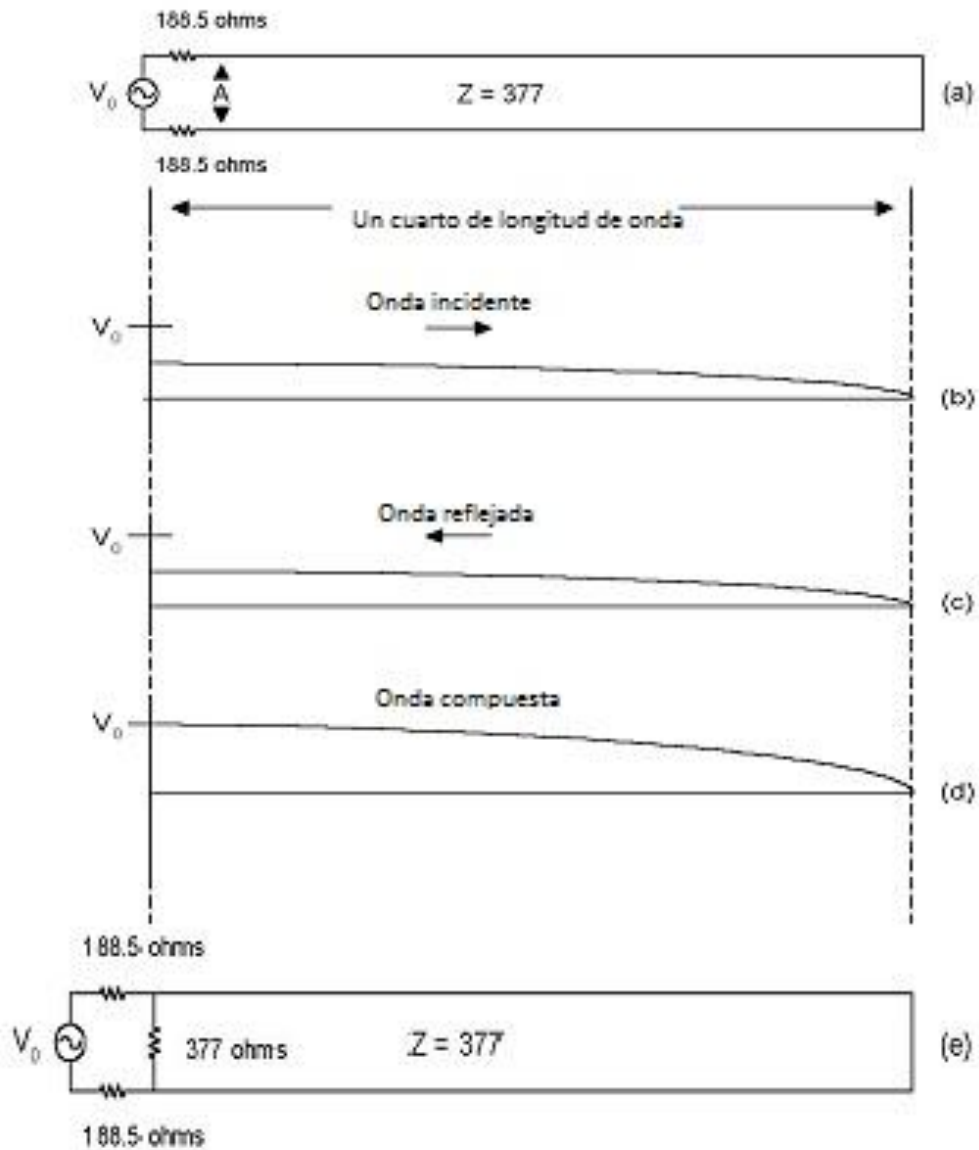


Figura 4-3. Modelo de línea de transmisión para una lamina [13].

Esta es una buena solución pero tiene limitaciones obvias debido a que es demasiado gruesa, solo funciona para una banda de frecuencias y una variación de ángulo estrechas. Con el fin de hacer que la lámina de Salisbury trabaje sobre una amplia gama de frecuencias, se pueden usar varias

láminas como se muestra en la Figura 4-4. En este modelo varias láminas de diferente resistividad superficial se colocan en intervalo de un cuarto de longitud de onda cada una. El modelo de línea de transmisión equivalente también es mostrado en la Figura 4-4.

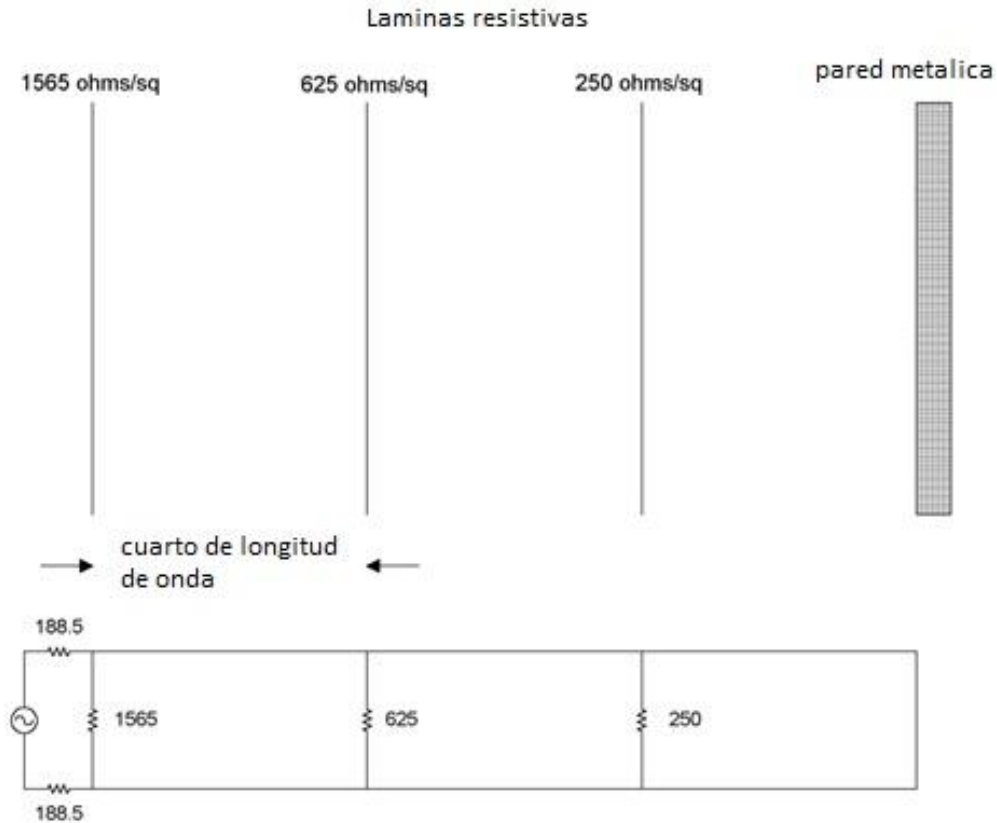


Figura 4-4. Modelo de línea de transmisión para varias laminas [13].

Esta disposición reduce el coeficiente de reflexión de 1 a menos de 0.1 (igual a una reducción de la intensidad de la señal reflejada mayor a 20dB) y esto funciona sobre un ancho de banda de 2,5:1 centrado en una longitud de onda.

Otro enfoque es conocido como el “Jaumann Sandwich”. En este, tanto las resistencias como las distancias que hay entre la pared metálica son cónicas. El “jaumann Sandwich” usa una matriz escalonada y se dice que alcanza unos 20dB de reducción en la señal reflejada sobre un ancho de banda 5:1. Para el caso de incidencia normal, esto puede ser modelado usando el modelo de línea de transmisión que se ve en la Figura 4.5ª. Un absorbente piramidal puede causar este mismo efecto para reducir la reflexión.

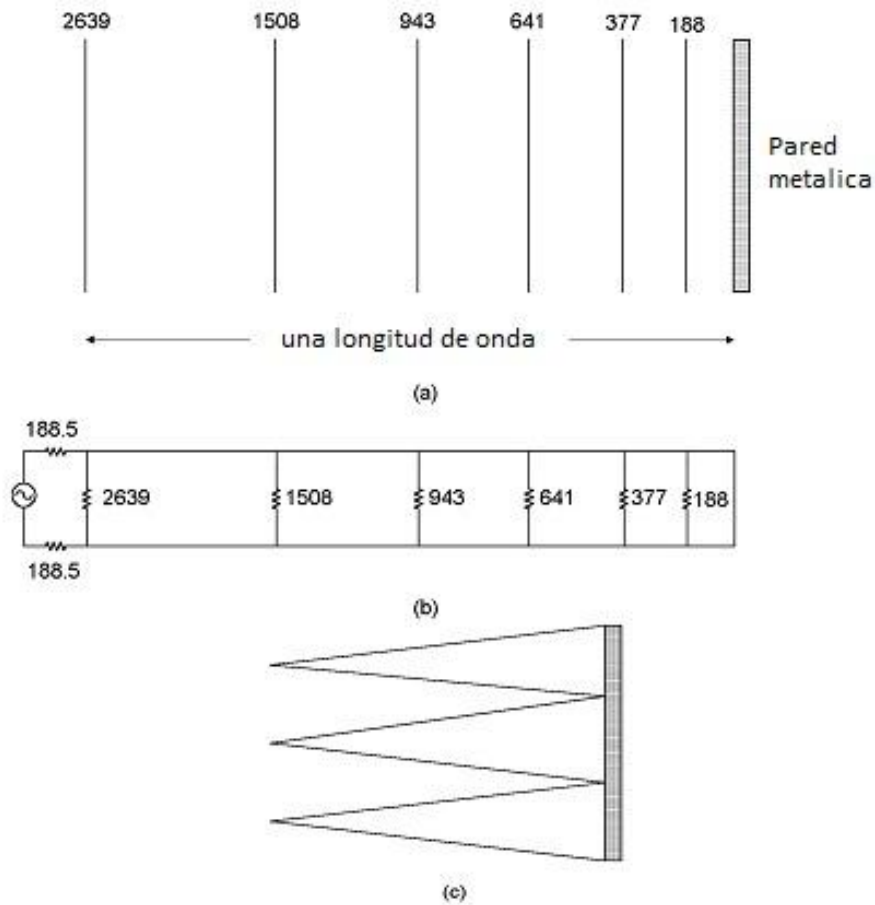


Figura 4-5. Modelo de línea de transmisión de “JaumannSandwich” (valores en ohm) [13].

En las implementaciones modernas de esta técnica cónica se emplean absorbentes piramidales (Figura 4.5c). La forma cónica del material piramidal realiza una función similar a las resistencias cónicas del “Jaumann Sandwich” y muchas reflexiones pequeñas son creadas con el paso de la onda electromagnética dentro de la pirámide y estas reflexiones tienden a cancelarse. Sin embargo, para ser efectivo, las pirámides deben ser al menos un medio de largo de la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés. El tamaño de la pirámide es importante para conseguir este efecto de mitigación, esto es reducido a un factor de:

$$\lambda_r = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.3)$$

Donde: λ_r es la longitud de onda en el medio (con el material absorbente), y ϵ_r es la permitividad relativa del espacio libre.

Debido a su tamaño, para proporcionar efectos anecóicos en frecuencias por debajo de 100 Mhz, se requiere la utilización de tecnología que no sean absorbentes piramidales. En los últimos 30 años, las baldosas de ferrita han llegado a ser ampliamente utilizadas como un mecanismo absorbente. La baldosa de ferrita presenta una impedancia aproximadamente igual a 377Ω . Esto se logra haciendo que la relación de permeabilidad con la permitividad sea igual que la del espacio libre que, a su vez, se logra manteniendo la relación de μ_r con ϵ_r igual a 377Ω .

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (4.4)$$

$$Z_{\text{espacio libre}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (4.5)$$

$$Z_{\text{medio}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (4.6)$$

El material por sí solo no puede evitar reflexiones. Sin embargo, lo que hace que las baldosas de ferrita trabajen como absorbente es que tanto la permeabilidad como la permitividad son complejas, de manera que el material tiene pérdidas. Un material de ferrita típico podría tener estas propiedades.

$$\mu_r = 60(2 - j1) \quad (4.7)$$

El resultado de una impedancia característica de:

$$Z = 377 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = 377\Omega \quad (4.8)$$

El resultado complejo de la permeabilidad y permitividad en pérdidas cuando la onda pasa a través de la ferrita está dada por:

$$Pérdida = e^{-\alpha d} \quad (4.9)$$

Donde d es el espesor del material en metros,

$$\alpha = \operatorname{Re} \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon} \quad (4.10)$$

$$\alpha = \operatorname{Re} \left[j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right] \quad (4.11)$$

$$\alpha = \left[j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) 60(2 - j1) \right] = \frac{120\pi}{\lambda} \quad (4.12)$$

La conductividad de la baldosa de ferrita puede ser considerada cero a 100Mhz. La pérdida a 1 cm de la baldosa de ferrita podría ser:

$$Pérdida = e^{-\alpha d} = e^{-\frac{120\pi}{\lambda}(0.01)} = e^{-1.26} = 0.28 \quad (4.13)$$

$$Pérdida(dB) = 20 \log(0.28) = -11dB \quad (4.14)$$

En el paso de la onda a través del material de ferrita ésta es atenuada $-11dB$. Como la señal es reflejada por la superficie metálica detrás del material absorbente, la onda es atenuada otros $11dB$, para un total de una atenuación de $-22dB$. Las baldosas de ferrita conservarán este efecto absorbente en todas las frecuencias para las cuales la permeabilidad y la permitividad conserven estos valores.

Hasta el momento se pudo observar el comportamiento de las baldosas de ferrita, las cuales son utilizadas dentro de una cámara anecóica o como material absorbente, pero a bajas frecuencias. La forma piramidal es otra clase de materiales, que como se dijo anteriormente por su forma cónica permite trabajar en una alta gama de frecuencias [13].

4.5.2. Absorbente Piramidal

Los paneles absorbentes piramidales en su mayoría son elaborados con espumas sólidas. Este material sólido (por lo general polímeros) es impregnado con carbón activado y se usa para el recubrimiento interno de la cámara para trabajar en frecuencias entre 1 a 40 Ghz.

En el mercado se encuentra en diferentes medidas y elaborado en diferentes polímeros, dependiendo de la frecuencia de trabajo de las antenas. En la siguiente tabla se pueden ver las características de las pirámides a nivel industrial.

Tabla 4-3. Características de las pirámides absorbentes [2].

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	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

Estos paneles son recubiertos usualmente con pintura azul de látex, con el fin de mejorar el desempeño del material absorbente y su apariencia, ya que estos inicialmente son de color negro [7].

5. Capítulo 5 – Recomendaciones para la Construcción de una Cámara Anecóica.

5.1. Medidas reales de la cámara Anecóica.

Basados en los parámetros de frecuencia, reflectividad y atenuación, se seleccionaron los paneles con referencia EHP-12PCL del fabricante ETS-LINDGREN, con medidas de $61 \times 61 \text{ cm}^2$ [11]. Para optimizar el material evitando desperdicios en los cortes de los paneles absorbentes, se ajustaron las medidas de la cámara anecóica para que haya una facilidad en el momento de la construcción de está.

Puesto que las paredes que se encuentran en la trayectoria de rayo directo (son las paredes que se encuentran detrás de la antena fuente y de la AUT) deben quedar totalmente cubiertas por el material absorbente, se diseñó cada pared de 5×5 paneles absorbentes alcanzando un área de $305 \times 305 \text{ cm}^2$ en cada pared (cabe anotar que este ancho, no es el ancho de la cámara anecóica, sino el ancho de las paredes que se encuentran detrás de la antena fuente y de la AUT). Respetando la medida de estas dos paredes, se parte para ajustar las medidas de la cámara anecóica.

Partiendo del hecho que la altura de las pirámides del panel absorbente es aproximadamente de $31,1 \text{ cm}$ y teniendo presente que las paredes en dirección de rayo directo son las que quedan inicialmente cubiertas, se tiene una longitud de $62,2 \text{ cm}$ en dicha dirección. Como la medida que se calculó para el largo de la cámara era de 5 m incluyendo el espesor del panel absorbente y la altura de las pirámides y recordando que el área de los paneles absorbentes es de $61 \times 61 \text{ cm}^2$, se determinó cubrir la distancia faltante con 7 paneles, quedando un largo de $4,27 \text{ m}$, obteniendo así un largo total de $4,892 \text{ m}$ o $489,2 \text{ cm}$.

$$L = 31,1 \text{ cm} + 7 * 61 \text{ cm} + 31,1 \text{ cm} \quad (5.1)$$

$$L = 489,2 \text{ cm} \quad (5.2)$$

El ancho que va a tener la cámara anecóica es de $306,2 \text{ cm}$. Esto es debido a que en el techo y en el piso de la cámara se ubican 4 paneles absorbentes los cuales miden 244 cm de ancho, como se puede observar en la Figura 5.1. Además de estos paneles, se cuenta con las paredes laterales que adicionan al ancho de la cámara $31,1 \text{ cm}$ cada pared, o sea $62,2 \text{ cm}$ más, para tener un ancho total de $306,2 \text{ cm}$.

$$w = 31,1 \text{ cm} + 4 * 61 \text{ cm} + 31,1 \text{ cm} \quad (5.3)$$

$$w = 306,2 \text{ cm} \quad (5.4)$$

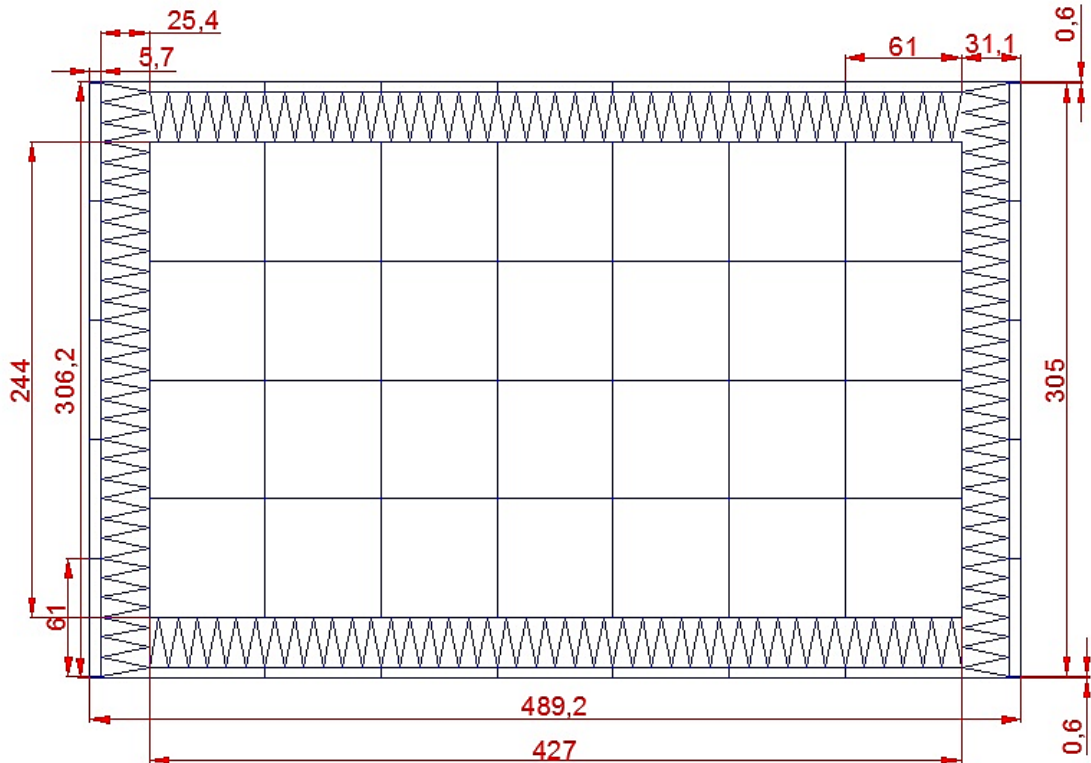


Figura 5-1. Medidas reales de la cámara anecóica en cm, vista superior.

La altura de la cámara anecóica es igual a 305 *cm* que equivale a 5 paneles absorbentes. En la figura 5.2 se puede observar una imagen 3D con una vista general de la estructura de la cámara anecóica.

Para las dimensiones de la puerta se analizó que al realizar un corte en los paneles, estos cortes queden al ras con las bases de las pirámides para tener un mejor ajuste y evitar daños en las pirámides.

Para el ancho de la puerta se selecciona el ancho de uno y medio paneles absorbentes, quedando un ancho de la puerta de 91,5 *cm*. Este es el ancho de la puerta que se va a observar por la parte interna de la cámara anecóica. En la parte externa se deja un espacio mayor debido a un posible mal corte y también a un espacio para colocar algunos materiales que lleva la puerta como guardas de seguridad, bisagras, sellos y demás. El ancho externo de la puerta de la cámara anecóica es de 96 *cm*.

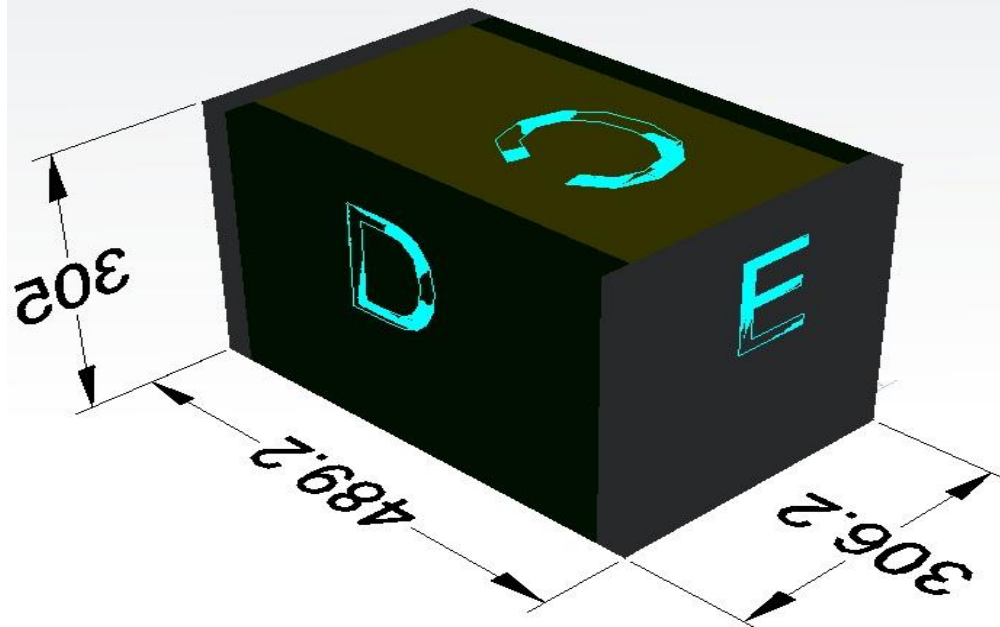


Figura 5-2. Imagen en 3D de la cámara anecoica con sus dimensiones en cm.

Para la altura de la puerta se selecciona el ancho de tres paneles absorbentes más el ancho de dos pirámides, lo que da un alto de la puerta de 203,33 *cm*. Esta es la altura de la puerta que se va a observar en el interior de la cámara anecoica. En la parte externa se deja un espacio mayor como se explicó en el párrafo anterior. La altura externa que se observa en la puerta de la cámara anecoica es de 210 *cm*.

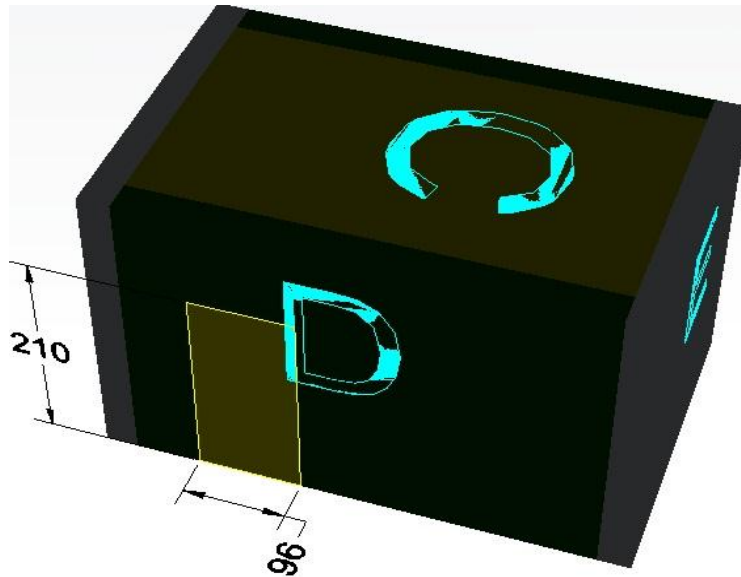


Figura 5-3. Medidas de la puerta de la cámara anecoica en cm.

5.2. Estructura.

Siguiendo con el respectivo diseño, la estructura de la cámara anecoica debe cumplir con las medidas asignadas. Con el fin de evitar cortes en las pirámides de los paneles absorbentes, la estructura debe asegurar las medidas internas de la siguiente manera:

Tabla 5-1. Medidas de la cámara anecoica.

Sector	Longitud (cm)
Largo (L)	489.2
Ancho (w)	306.2
Alto (h)	305

La estructura de la cámara anecoica, es una estructura metálica con paredes en Drywall.

Las paredes de Drywall que quedan en el interior de la cámara deben ser recubiertas por láminas de hierro galvanizado calibre 22. Este recubrimiento es el que va actuar a manera de jaula de Faraday y debe estar en contacto con la estructura y conectada a un punto de tierra, tal como se muestra en la Figura 5.4. Esta consideración debe cumplirse tanto en las 4 paredes como en el piso y techo de la cámara anecoica.

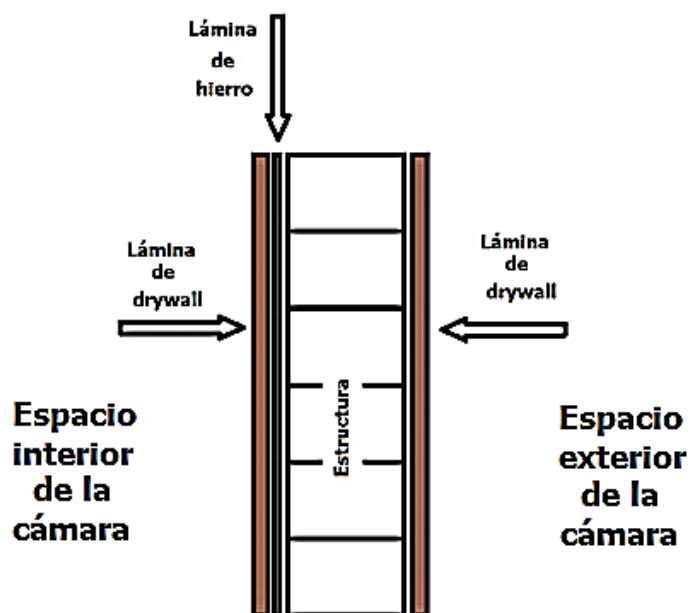


Figura 5-4. Corte de una pared de la cámara anecoica.

5.3. Recubrimiento con los Paneles Absorbentes.

Las cuatro paredes, el techo y el piso deben quedar recubiertos con el material absorbente. Teniendo en cuenta las medidas de la cámara y la longitud de los paneles en la Tabla 5.2 se puede ver la distribución de estos en el interior de la cámara.

Tabla 5-2. Distribución de los paneles absorbentes de la cámara anecoica.

Superficie de la Cámara	Número de paneles
Piso.	28
Techo.	28
Pared laterales derecha.	35
Pared lateral izquierda.	35
Pared anterior.	25
Pared posterior.	25
TOTAL	176

En este caso se denominó pared anterior y pared posterior a las paredes que están en la trayectoria de rayo directo y se le da a estas paredes prioridad a la hora de pegar los paneles. Se debe cubrir cada una con 5 paneles de ancho por 5 de alto para un total de 25 paneles por pared, quedando un ancho de 305 cm. El ancho real de la cámara es de 306,2 cm. Esos 1,2 cm de

diferencia se recomienda distribuirlos en $0,6\text{ cm}$ y $0,6\text{ cm}$ a cada lado, como se muestra en la Figura 5.5.

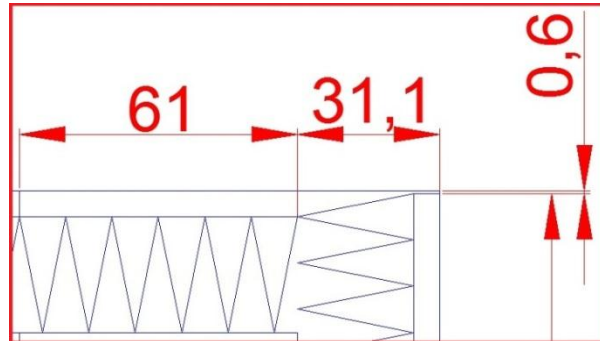


Figura 5-5. Detalle constructivo.

En la Figura 5.6 también se puede observar que en el piso se ubican 4 paneles, para un ancho de 244 cm ($4 \times 61\text{ cm}$). Adicional a esto, el ancho de la cámara debe contar con la longitud de los paneles de las paredes laterales $62,2\text{ cm}$ ($31,1\text{ cm} \times 2$), teniendo en realidad un ancho de $306,2\text{ cm}$. Debido a esto es que se deben dejar $0,6\text{ cm}$ de separación entre las paredes laterales y la primera columna de paneles.

Pegados los paneles de las paredes anterior y posterior, se procede a pegar los paneles del techo. El recubrimiento del techo se realiza con un total de 28 paneles 4 de ancho por 7 de largo.

En las paredes laterales se ubicarán 35 paneles en cada una, 7 a lo largo y 5 a lo ancho. En la pared donde se ubica la puerta se debe tener especial cuidado como se indicó al inicio de este capítulo.

Para el piso se instala la misma cantidad de paneles que en el techo (28). Es necesario dejar un camino desmontable para poder realizar cambios en las antenas bajo prueba, por lo cual en estos senderos desmontables no se usa ninguna clase de pegante. Se recomienda, para evitar daños en estos paneles, colocar debajo de ellos un paño o un tapete.

5.4. Instalaciones Internas.

5.4.1. Iluminación

La iluminación de la cámara anecóica consta de dos lámparas tipo LED, ubicadas en cada uno de los mástiles. Se usan lámparas tipo LED ya que estas producen buena iluminación y poco calor, a diferencia de otro tipo de

lámparas que producen calor y podrían causar daño en el material absorbente.

5.4.2. Instalaciones Eléctricas y de Datos.

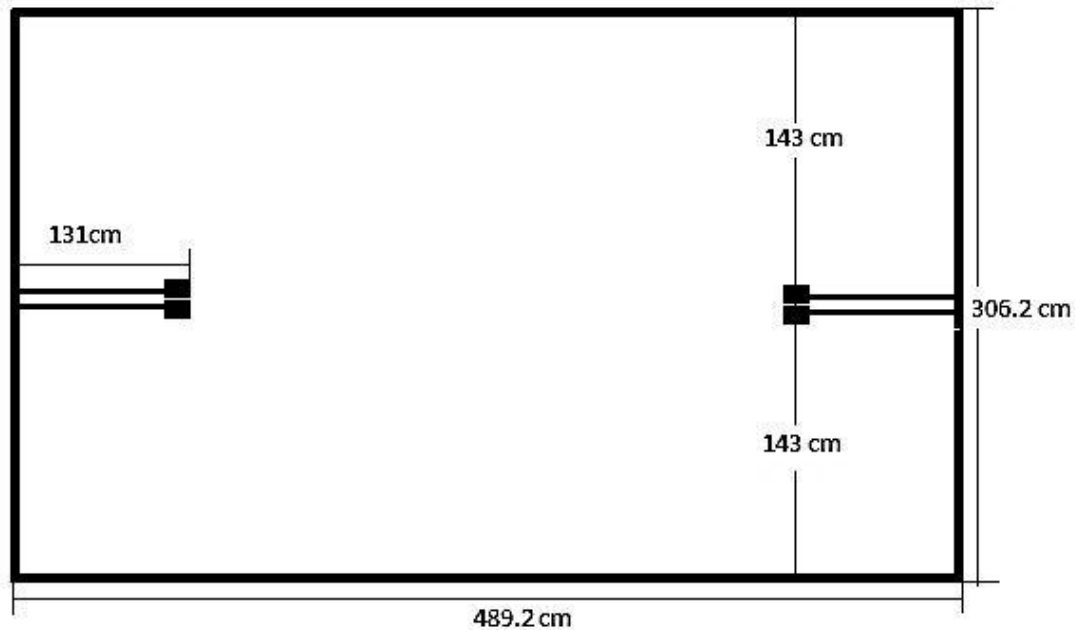


Figura 5-6. Distribución eléctrica de la cámara anecoica.

En el interior de la cámara se deben instalar dos cajas debajo de cada una de las mesas donde irán los mástiles, una caja para corriente y otra para datos, tal como se indica en la Figura 5-6.

5.5. Mesas para los Mástiles.

Tanto la antena fuente como la antena bajo prueba deben tener una altura mayor a 1 m y menor 2,05 m. Esta consideración se estipuló en el capítulo 3. Se recomienda que la altura de las antenas sea en el punto medio es decir a 1,525 m. En esta altura se debe contemplar la medida que tienen los mástiles con su respectiva base, el orientador y la mesa en donde se colocará la antena.

En las Figuras 5-7 y 5-8 se puede observar el mástil con su base y el orientador que maneja la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.



Figura 5-7. Mástil con base [14].

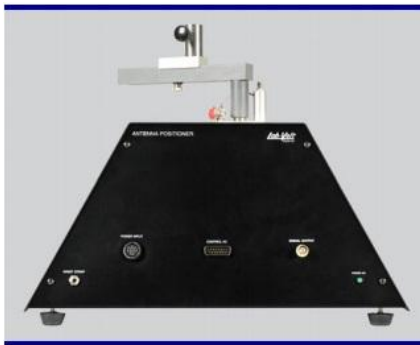


Figura 5-8. Orientador [14].

Partiendo de la medida de estos elementos, la altura de la mesa debe ser el complemento para alcanzar la altura deseada que requieren las antenas.

Esta mesa debe ser de un material no conductor ya que los materiales conductores dentro de la cámara anecoica pueden causar efectos no deseados en las pruebas que allí se realicen. Se recomienda que sea de madera y en lo posible no usar clavos o puntillas. En vez de esto usar un pegante especial para madera.

Las mesas que se utilicen para el soporte de las antenas deben estar recubiertas con el panel absorbente.

6. Capítulo 6 – Pruebas en la Cámara Anecóica

6.1. Introducción.

Como se ha mencionado a lo largo de este documento una cámara anecóica es un recinto capaz de simular espacio libre, dentro del cual se pueden realizar diferentes pruebas a dispositivos que irradian, la cámara anecóica diseñada para la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga tendrá el fin de poder medir patrones de radiación de antenas con un rango de operación entre 1GHz y 40 GHz.

En la actualidad los sistemas inalámbricos de comunicaciones tienen una frecuencia de operación entre 2.4 y 5 Ghz. Bluetooth, según el estándar IEEE 802.15.1 de 2002, trabaja a 2.4 Ghz, también wi-fi, con estándares como IEEE 802.11b, IEEE 802.11g y IEEE 802.11n tiene frecuencia de operación de 2.4Ghz, mientras que el estándar IEEE 802.11a trabaja a una frecuencia de 5Ghz. Contando con una cámara anecóica y con dispositivos dedicados a la medición de radiación, utilizando métodos como la comparación del patrón de radiación y la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR), se pueden realizar pruebas de radiación sobre algunos de estos dispositivos [2], [15].

6.2. Patrón de Radiación.

El patrón de radiación es el parámetro más importante de las antenas. Se define como una representación gráfica de la energía radiada por una antena, la intensidad de campo o las densidades de potencia en varias posiciones angulares.

La representación gráfica normalmente se hace para campo lejano y se construye en un plano cartesiano, en dos o en tres dimensiones. Dependiendo de la antena, se pueden ver tres tipos de patrones de radiación [1] :

6.2.1. Patrón isotrópico.

Cuando una antena (idealmente sin pérdidas) irradia la misma energía en todas las direcciones.

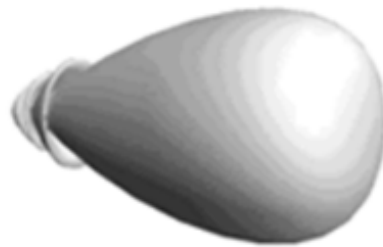
6.2.2. Patrón directivo.

La energía puede depender de la dirección angular en el plano Azimutal, en el plano de elevación o de ambos.



ISOTRÓPICO

Figura 6-1. Patrón de radiación isotrópico [20].



DIRECTIVO

Figura 6-2. Patrón de radiación directivo [20].

6.2.3. Patrón omnidireccional.

Representa a un patrón no direccional en un plano, y un patrón direccional en otro plano.



OMNIDIRECCIONAL

Figura 6-3. Patrón de radiación omnidireccional [20].

6.3. Otros Parámetros de las Antenas.

6.3.1. Directividad.

Es un parámetro para una antena y está definido como la razón de la intensidad radiada en una dirección, a la intensidad promedio en todas las direcciones [1].

6.3.2. Ganancia.

La definición de ganancia está dada por la razón de la intensidad de radiación de una antena cualquiera respecto de radiación de una antena isotrópica.

6.3.3. Ancho de banda.

El ancho de banda se describe como “el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena con respecto a alguna característica se ajusta a un estándar específico”. De manera más sencilla el ancho de banda es el rango de frecuencias donde la antena cumple con algunas características deseadas.

6.3.4. Eficiencia de la antena.

“La eficiencia de la antena es la relación de la potencia irradiada por ella entre la suma de la potencia irradiada y disipada” la eficiencia está dada por [21]:

6.4. Instrumentos de Medida.

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga cuenta con un sistema didáctico de medición en antenas (SDMA) modelo 8092 del fabricante Lab-Volt. En la figura 6.4 se muestra este equipo.

Este sistema es capaz de realizar prácticas sobre las antenas en las bandas de 1 GHz y 10 GHz. El equipo incluye un conjunto de antenas de 1 GHz, otro de 10 GHz, un generador RF, un sistema de recepción y el software de adquisición de datos (LVDAM-ANT). El sistema de recepción incluye orientador de antenas giratorio acoplado a una interfaz para adquisición de datos y está a su vez conectado a un puerto USB.

El SDMA está diseñado para trabajar de manera segura a baja potencia en las bandas de 1 GHz y 10 GHz. Este es un sistema autónomo completo y no requiere ningún otro equipo para su funcionamiento.



Figura 6-4. Equipo didáctico y de medición de antenas 8092 [14].

6.4.1. Generador RF.



Figura 6-5. Generador RF[14].

El generador RF incluye dos generadores independientes, cada uno capaz de entregar una señal RF continua o una señal modulada en amplitud mediante una onda cuadrada de 1 GHz en las bandas de 915 MHz y 10,5 MHz.

6.4.2. Orientador de antenas.

El orientador de antenas consiste en un mástil para la antena receptora o antena bajo prueba, un motor de arrastre, un detector de señales, un atenuador variable y un codificador del eje. El motor hace girar el mástil mientras el software comanda dicha rotación.



Figura 6-6. Orientador de la antena [14].

6.4.3. Interfaz para la adquisición de datos / fuente de alimentación.

Esta interfaz es el enlace de comunicación entre el orientador de antenas y la computadora personal donde se esté ejecutando el software. Ese enlace se logra mediante un puerto USB. La interfaz para la adquisición de datos convierte la señal proveniente del orientador de antenas en una señal digital para que el computador las pueda procesar.



Figura 6-7. Interfaz para adquirir datos [14].

6.4.4. Antenas.

El equipo incluye una amplia gama de antenas de 1 GHz y 10 GHz [14].

Antenas de 1 GHz:

- Dipolos ($\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$).
- Dipolo plegado.
- Dipolo plegado con balún.
- Monopolo (a nivel del suelo).
- Monopolo de brazos inclinados.
- De cuadros (circular, cuadrada, losange).
- Fija yagi.
- Ajustable yagi.

Antenas de 10 GHz:

- Guía de onda abierta a un extremo.
- Guía de ondas ranurada (de una ranura o multiranura).
- De bocina (de abertura grande y pequeña).
- Helicoidal (con polarización circular a la derecha o a la izquierda).
- De placas (rectangular, red alimentada en paralelo o en serie).

6.4.5. Software para la adquisición de datos (LVDAM-ANT).

Este software fácil de usar funciona en sistema operativo Microsoft Windows. Cuenta con una caja de herramientas que se utiliza para controlar la rotación de la antena y la adquisición de datos, así como la visualización de las características E y H. A partir de estos resultados es posible obtener diferentes representaciones en 2D y 3D [14].

6.5. POSIBLES PRUEBAS A REALIZAR.

6.5.1. Método de espacio libre de relación de onda estacionaria de voltaje ROE o VSWR (Voltage stationary wave ratio).

El método de espacio libre VSWR de la evaluación de la cámara anecóica electromagnética ha tenido un estándar en la industria desde los años 70. Este método usa una AUT (antena sonda) ubicada en la región de prueba de la cámara anecóica, con un orientador y una apropiada instrumentación para pruebas, para registrar la interacción del camino de la señal directa de la antena fuente y las reflexiones en las superficies de la cámara. A partir de los datos, es posible determinar el nivel de señales extrañas presentes en la región de prueba y determinar el impacto, en términos de incertidumbre, que la señal tendrá en las medidas llevadas a cabo en la región de prueba.

El concepto original fue deducido a partir de las mediciones realizadas en las antenas al aire libre como se ve en la Figura 6-8. En esta figura se pueden ver dos antenas localizadas a una distancia entre sí. El camino de la señal es una trayectoria de rayo directo y es denotado en la figura por el término E_d , y la onda reflejada de la tierra es denotada como E_r . Las dos ondas interactúan en la apertura de la AUT.

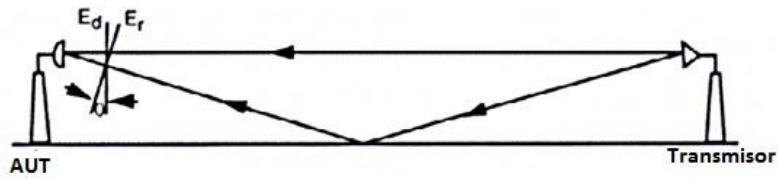


Figura 6-8. Como se refleja la señal en el aire libre [2].

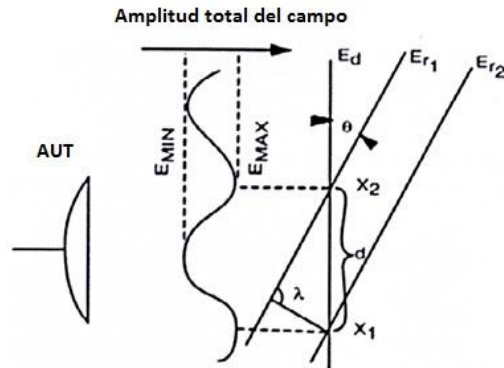


Figura 6-9. Como interactúan dos ondas [2].

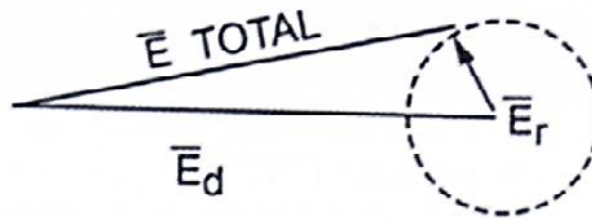


Figura 6-10. Representación vectorial de dos frentes de onda interactuando [2].

La relación entre el nivel de la señal y su impacto sobre la incertidumbre en los datos medidos en la apertura de prueba es deducida de la siguiente manera:

$$E_{max} = E_d + E_r \quad (6.1)$$

$$E_{min} = E_d - E_r \quad (6.2)$$

$$\Delta E = 2E_r \quad (6.3)$$

$$20 \log(E_{max}) = 20 \log(E_d + E_r) \quad (6.4)$$

$$20 \log(E_{min}) = 20 \log(E_d - E_r) \quad (6.5)$$

$$\sigma = \frac{E_{max}}{E_{min}} = 20 \log \left[\frac{(E_d + E_r)}{E_d - E_r} \right] \quad (6.6)$$

$$\log \left[\frac{1 + \frac{E_r}{E_d}}{1 - \frac{E_r}{E_d}} \right] = \frac{\sigma}{20} \quad (6.7)$$

$$\left[\frac{1 + \frac{E_r}{E_d}}{1 - \frac{E_r}{E_d}} \right] = 10^{\sigma/20} \quad (6.8)$$

$$\frac{E_r}{E_d} = \frac{(10^{\sigma/20} - 1)}{(10^{\sigma/20} + 1)} \quad (6.8)$$

$$20 \log \left(\frac{E_r}{E_d} \right) = 20 \log \left[\frac{(10^{\sigma/20} - 1)}{(10^{\sigma/20} + 1)} \right] \quad (6.9)$$

La ecuación 6.9 es graficada en la Figura 6-11, como posible error en los niveles de medida en la relación a señales extrañas, con niveles de $+20dB$ a $-30dB$.

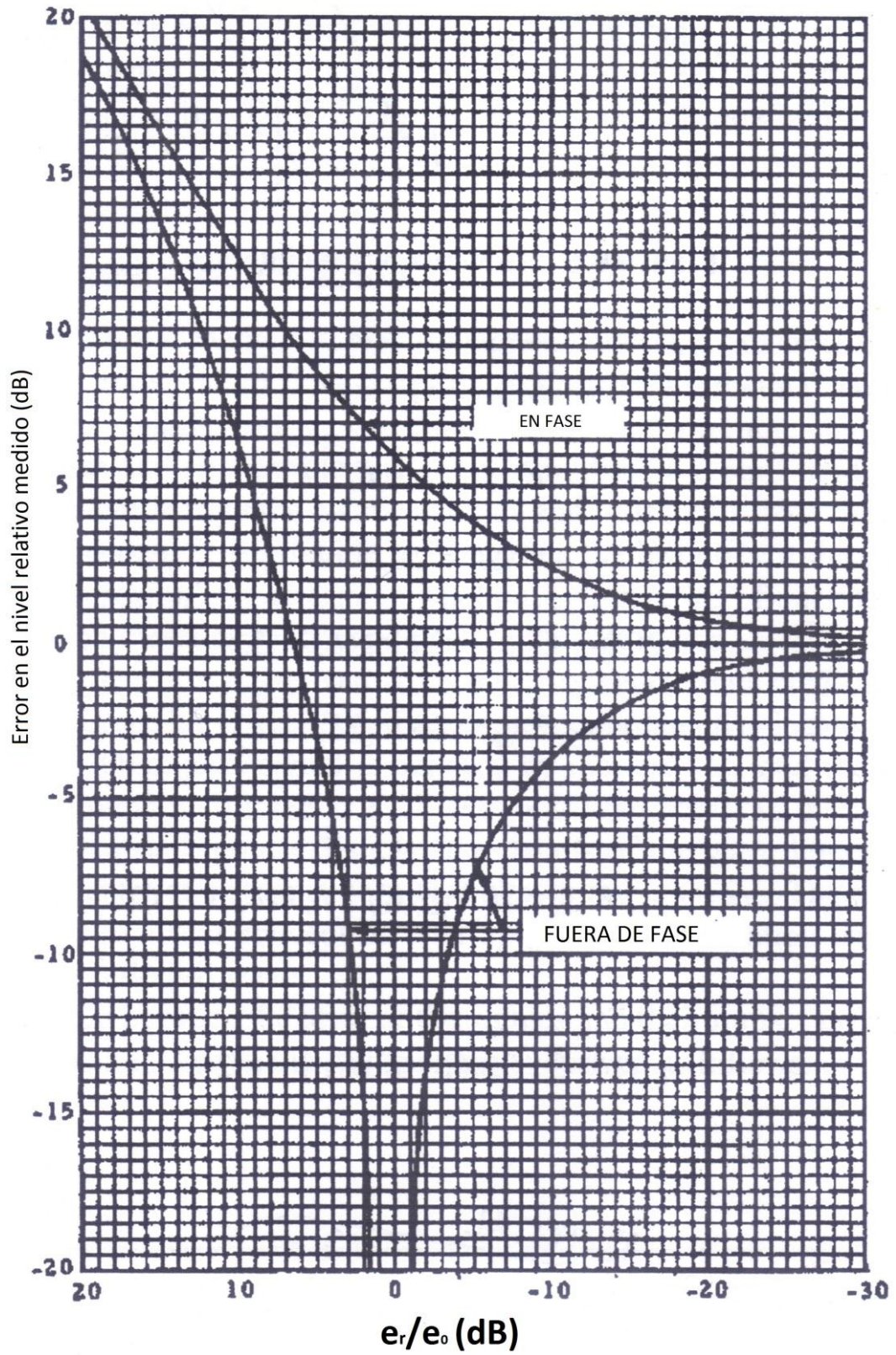


Figura 6-11. Error de incertidumbre vs nivel de señales extrañas [2].

En la Figura 6-12 se puede ver la misma relación de señal con niveles entre $-25dB$ a $-75dB$.

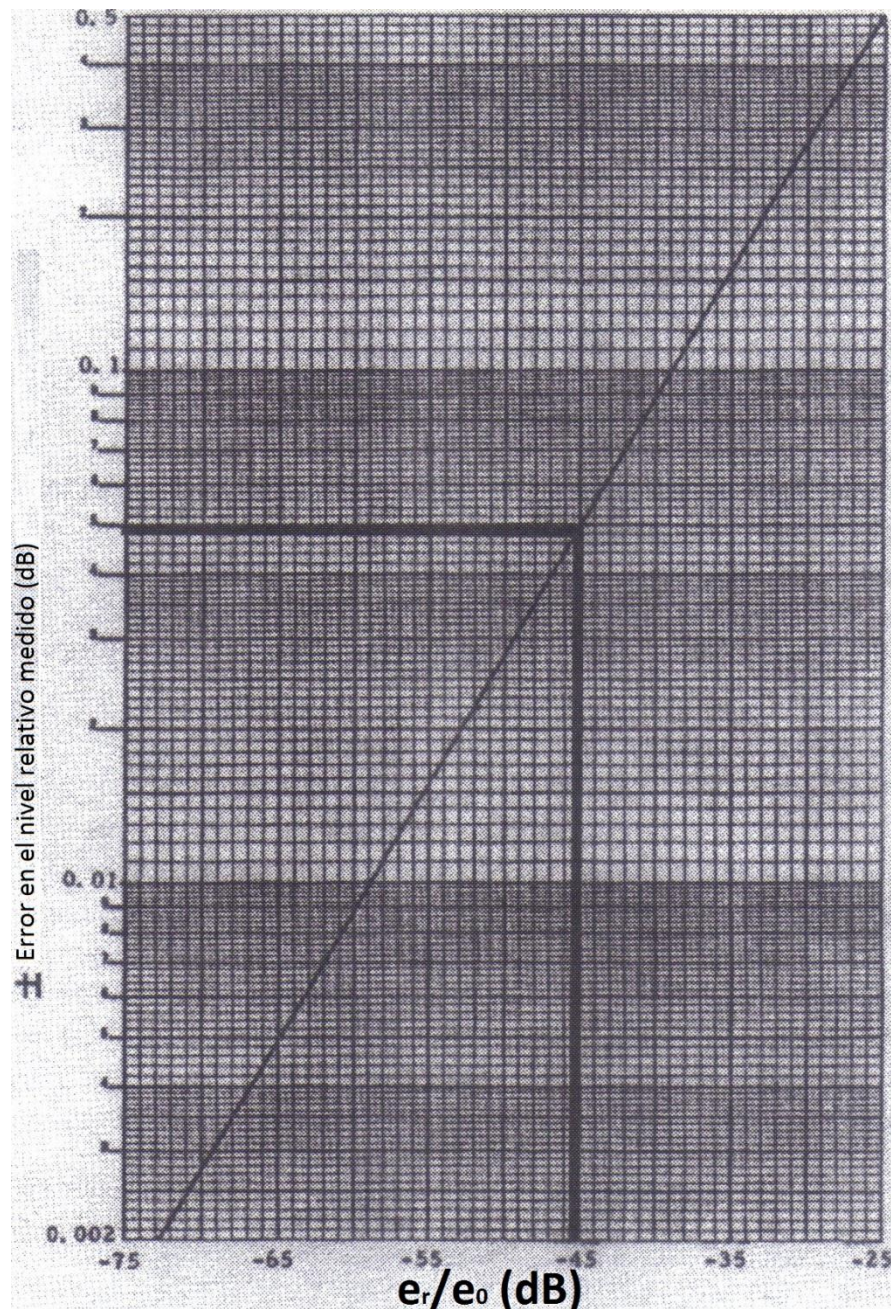


Figura 6-12. Error de incertidumbre vs el nivel de energía de señal extraña [2].

Los errores son esencialmente iguales para las proporciones de $-25dB$ o menos tal como se observa en la Figura 6.12. Esta relación asume que los niveles de señal que llegan a la región de prueba, son recibidos por una antena que tiene un patrón isotrópico. Cuando una antena direccional es

usada para sondear la región de prueba, la diferencia en el patrón corresponde a las señales directas y reflejadas, debe ser considerado en la evaluación de nivel de señal extraña. En la Figura 6.13 se puede ver una gráfica de reflectividad, con un parámetro como una función del nivel de un patrón de sondeo Vs el rizado pico a pico observado en ese punto del patrón.

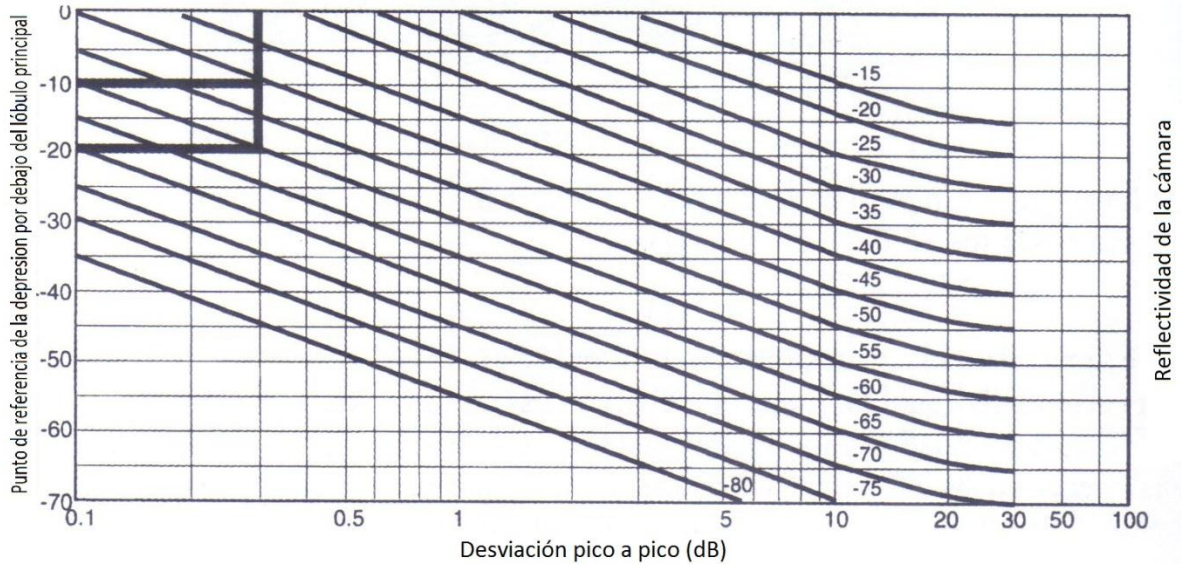


Figura 6-13. Reflectividad vs rizado y el nivel del patrón de radiación [2].

Como es ilustrado, si un rizado de $-0.3dB$ es observado en el patrón de sondeo de $20dB$ bajo el pico del patrón, entonces el nivel de señal extraña es igual a $-55dB$. Si el nivel patrón fue de $-10dB$, entonces el nivel de señal extraña podría ser $-45dB$.

Si se conoce el nivel de señal extraña, entonces la incertidumbre que ocurra en una medida isotrópica, puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$r = \text{Rizado pico a pico}$$

$$r = 20 \log \left[\frac{(1 + R)}{(1 - R)} \right] \quad (6.10)$$

Donde R es el nivel de energía extraña o reflectividad como se llama normalmente en la literatura de diseño de cámaras anecoicas.

A manera de ejemplo, se asume que $R = -45dB$, que es el nivel medido de señal extraña que fue encontrado usando el método de espacio libre VSWR. La amplitud del rizado que podría superponerse en la trayectoria de rayo directo podría ser:

$$R = -45dB$$

$$Voltaje = 0.0562$$

$$r = 20 \log \left[\frac{(1 + 0.0562)}{(1 - 0.0562)} \right] \quad (6.11)$$

$$r = 0.0977 \text{ o } \pm 0.0489 \quad (6.12)$$

Por conveniencia, la misma información puede ser obtenida usando las graficas de las Figuras 6-12 y 6-13. El nivel de señal extraña medido usando el método de espacio libre VSWR fue de $-45dB$. Entonces la incertidumbre en una señal isotrópica podría ser ± 0.05 o $0.1dB$ pico a pico. Esto se puede ver en la Figura 6-14.

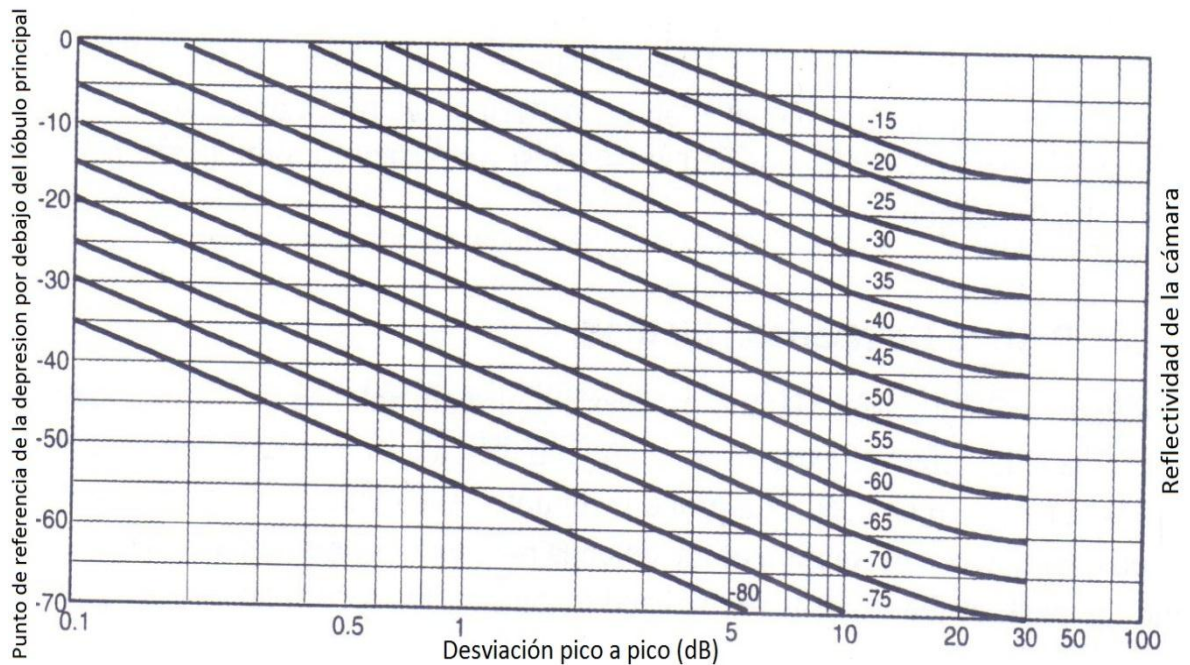


Figura 6-14. Ejemplo del uso de la tabla de reflectividad [2].

En este método una AUT es movida a través del espacio de la región de prueba en algún tipo de mecanismo de sondeo lineal. Una AUT direccional es la antena deseada, porque cuando se utilizan las propiedades direccionales de sondeo, una evaluación se puede realizar debido a que la antena fuente y el nivel de cualquier energía extraña se encuentran. Debajo de 1 GHz, es común usar antenas LPA (Logic Periodic Antenna) como AUT, mientras que las antenas SGH (Standart Gain Horn) son usadas por encima de 1 GHz.

El procedimiento usual es colocar la AUT de modo que haga una exploración de la cámara en forma perpendicular al eje de la cámara y por el centro de la región de prueba. Un nivel de referencia se establece por la AUT apuntando a la antena fuente. Entonces la AUT es movida a través de la cámara, y se hace una toma de muestra de la variación de la señal. Dos elementos se notan de inmediato: la señal podría variar dependiendo de la forma como la AUT se mueva de izquierda a derecha, en parte debido a la presencia de niveles de señal extraña los cuales causan rizado en los datos registrados, y que en cámaras de alto rendimiento los equipos de grabación deben ser capaces de resolver rizados menores que 0.1dB, pico a pico. En cámaras de baja frecuencia, la sonda debe mover al menos una longitud de onda a través del espacio con el fin de resolver el rizado pico a pico causado por la energía extraña. Después de grabar el patrón con la antena a cero grados, la antena es rotada 10-15 grados, y el procedimiento se repite. Como la antena es rotada, el patrón se moverá en el eje hacia abajo del patrón de la AUT. En cualquier nivel de patrón dado, el rizado pico a pico causado por la señal extraña es sobrepuesto sobre el patrón de la AUT. Del análisis dado anteriormente, la señal de nivel extraño que ocurre en el lugar que señala la antena es determinado. El procedimiento de rotación se puede ver en la Figura 6.15.

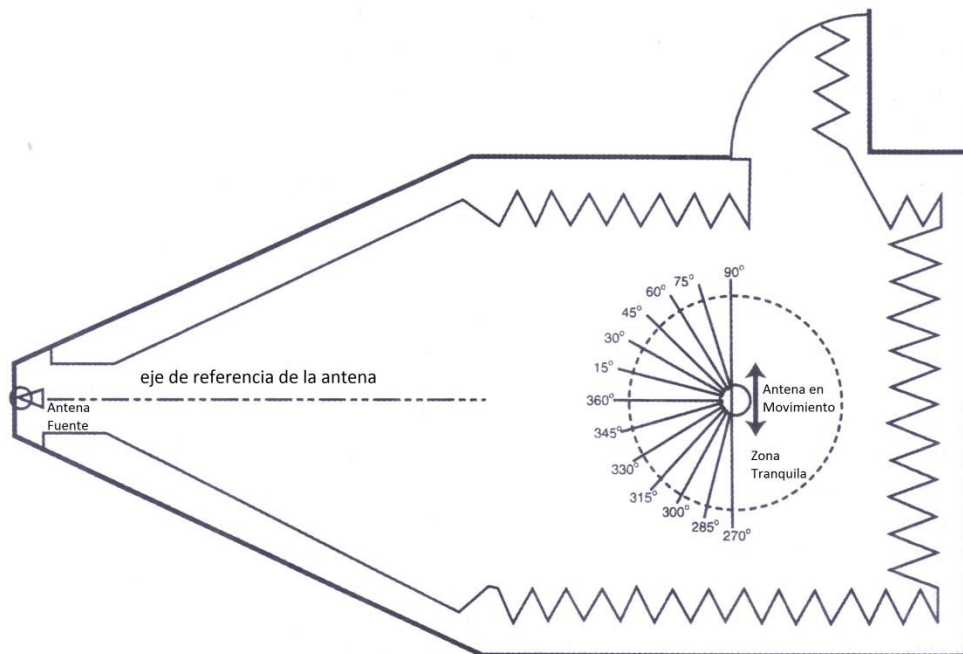


Figura 6-15. Orientaciones de las antenas en las pruebas transversales de espacio libre [2].

A continuación, el mecanismo de sondeo debe estar configurado abajo del eje de la cámara. El procedimiento es repetido por un movimiento de la

antena en sentido horario de 90 grados a 180 grados mientras mira a la pared trasera. La antena mira directamente hacia la pared como se indica en la Figura 6.16. El eje es usado también como el punto de referencia del patrón para determinar el nivel sobre el patrón de la AUT. Este procedimiento se debe repetir en cada frecuencia de prueba para la polarización horizontal y vertical.

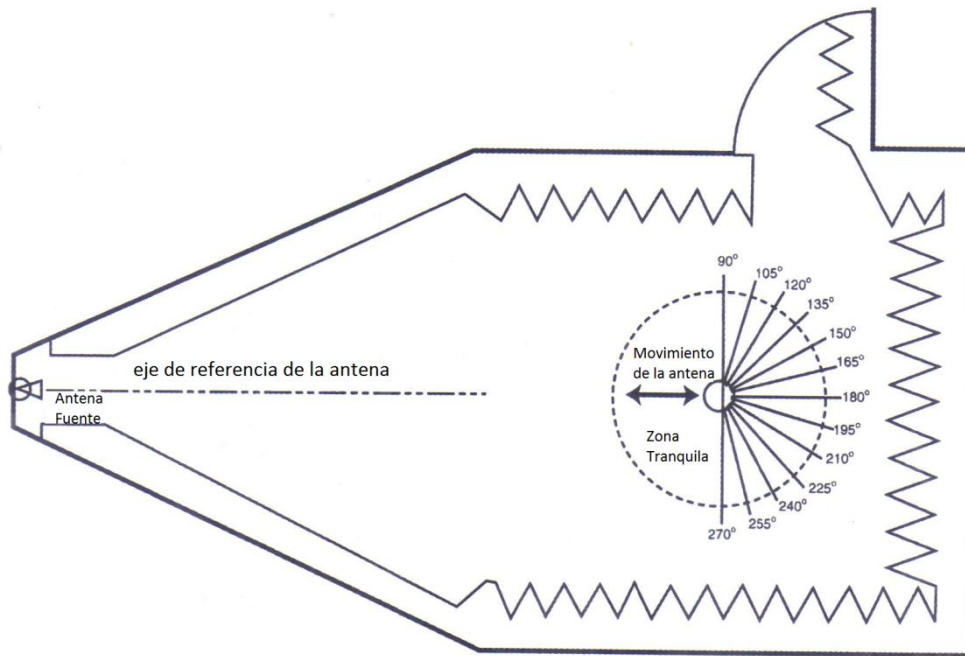


Figura 6-16. Orientaciones de las antenas en las pruebas longitudinales de espacio libre [2].

6.5.2. Método de patrón de comparación.

Este método de patrón de comparación usa una antena de alta ganancia ($> 25dB$) con el fin de evaluar el efecto de energía extraña en el proceso de medida del patrón.

La antena que se utiliza como antena prueba está montada de tal manera que su centro de fase se encuentre sobre el eje de la rotación de la antena posicionadora. Un patrón de referencia es cortado, y el pico del rayo es normalizado a cero en el dispositivo de grabación o de toma de datos. La antena y el posicionador son trasladados a lo largo del eje de la cámara alrededor de un octavo de longitud de onda. La medida es repetida con el pico del rayo otra vez normalizado a cero en el dispositivo de adquisición de datos. El procedimiento es repetido cinco veces mientras se asegura que el movimiento de translación se mueva por lo menos en media longitud de onda de la frecuencia de prueba.

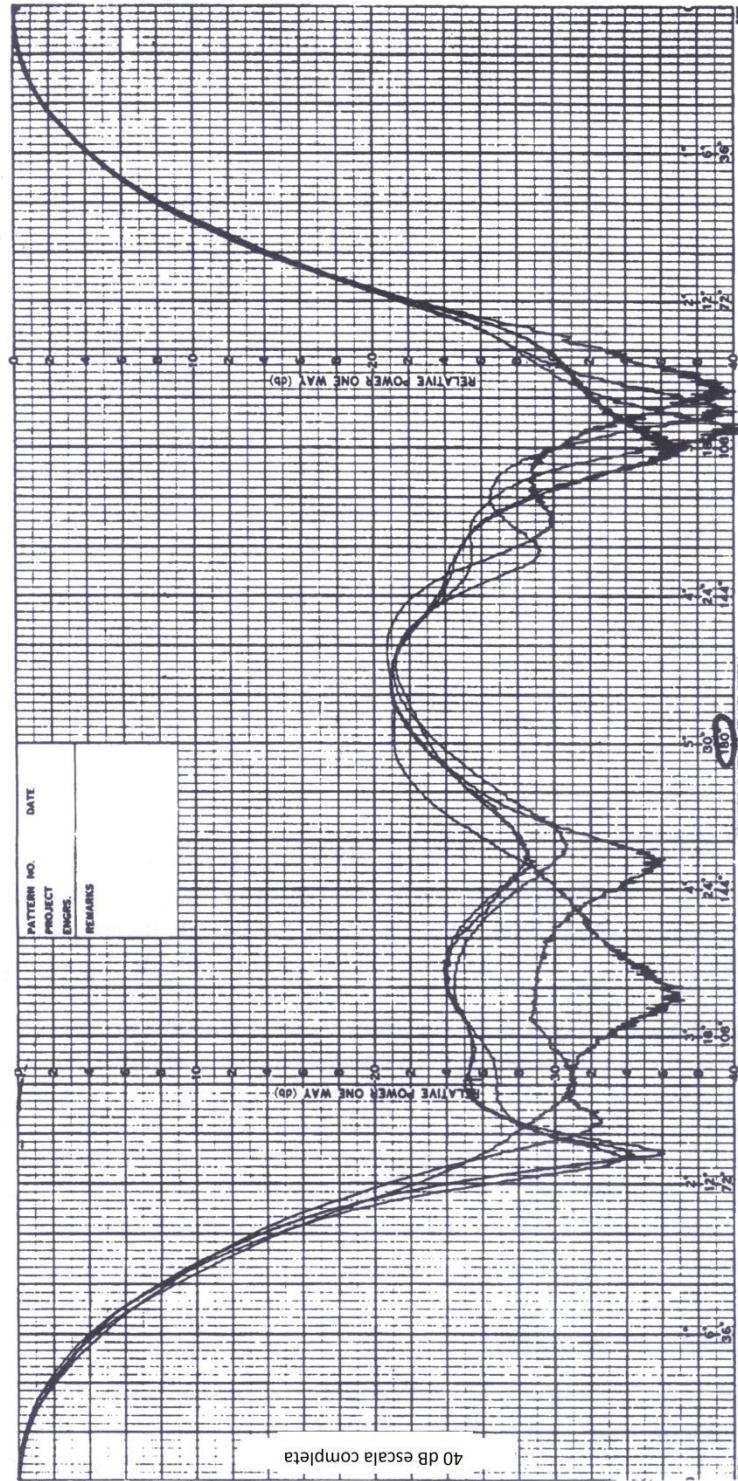


Figura 6-17. Ejemplo del procedimiento del patrón de prueba [2].

Un ejemplo de este procedimiento se ilustra en la Figura 6-16. El nivel de energías extrañas para varios ángulos de llegada en la zona de prueba, se encuentran escogiendo un ángulo en el conjunto del patrón, determinando el nivel del patrón promedio y el factor de rizado pico a pico, y mirando arriba el nivel de energía extraña de la gráfica mostrada en la Figura 6-11. En este caso, esto hace posible evaluar el efecto de las energías extrañas que llegan en cualquier dirección. Debido al procedimiento de normalización, esto dificulta la evaluación del rendimiento en el eje. Sin embargo en un rango de 10 a 350 grados es preciso para determinar el nivel de energías extrañas que se encuentran en la región de prueba de la cámara cuando se usa una antena con un ancho de potencia mitad menor a 5 grados. El procedimiento es repetido para cada frecuencia de prueba y para ambas polarizaciones. El resultado de tal procedimiento de prueba es graficado en la Figura 6-18. Esta prueba utiliza una antena de ganancia moderada que muestra la dificultad para resolver los cambios del patrón cerca al rayo principal.

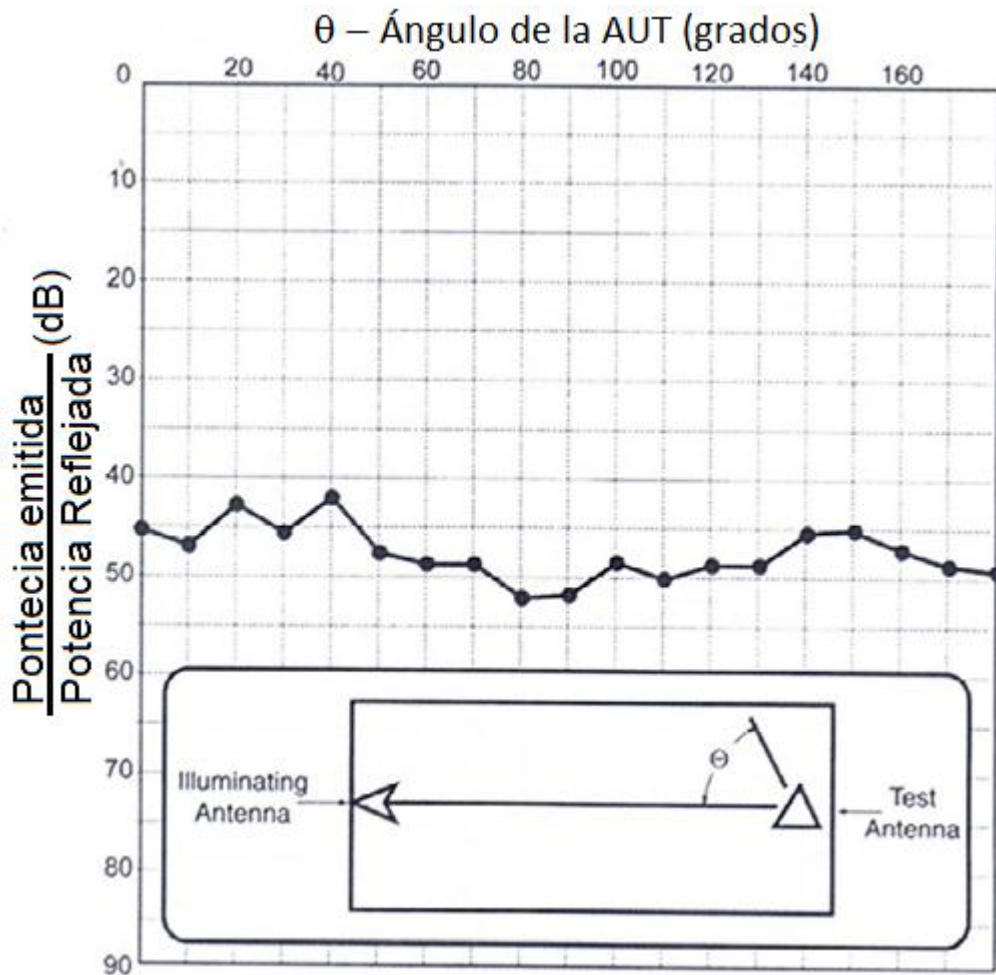


Figura 6-18. Ejemplo de los niveles de reflectividad de una cámara anecoica típica [2].

6.5.3. Prueba usando el método trazado de rayos

En la Figura 6.19 se representa el método de trazado de rayos. El método de diseño está relacionado con los procedimientos utilizados para probar la cámara. Cuando una cámara es probada, un sondeo del campo se ejecuta por primera vez transversalmente a través de la cámara y por el centro de la región de prueba, como se observa en la Figura 6.19 como una línea T. Con el fin de que el sondeo pueda detectar una fuente de energía extraña, se debe cambiar su fase con respecto a la trayectoria directa. En el caso del sondeo transversal, solo la energía reflejada de las paredes podría ser detectada porque todas las superficies son paralelas con el movimiento del sondeo. Por lo tanto, nosotros necesitamos considerar solo la energía reflejada de estas superficies. El otro ítem que debe ser considerado es la Directividad de la antena fuente, porque el nivel de iluminación en las paredes laterales es una función del ángulo del rayo principal de la antena fuente.

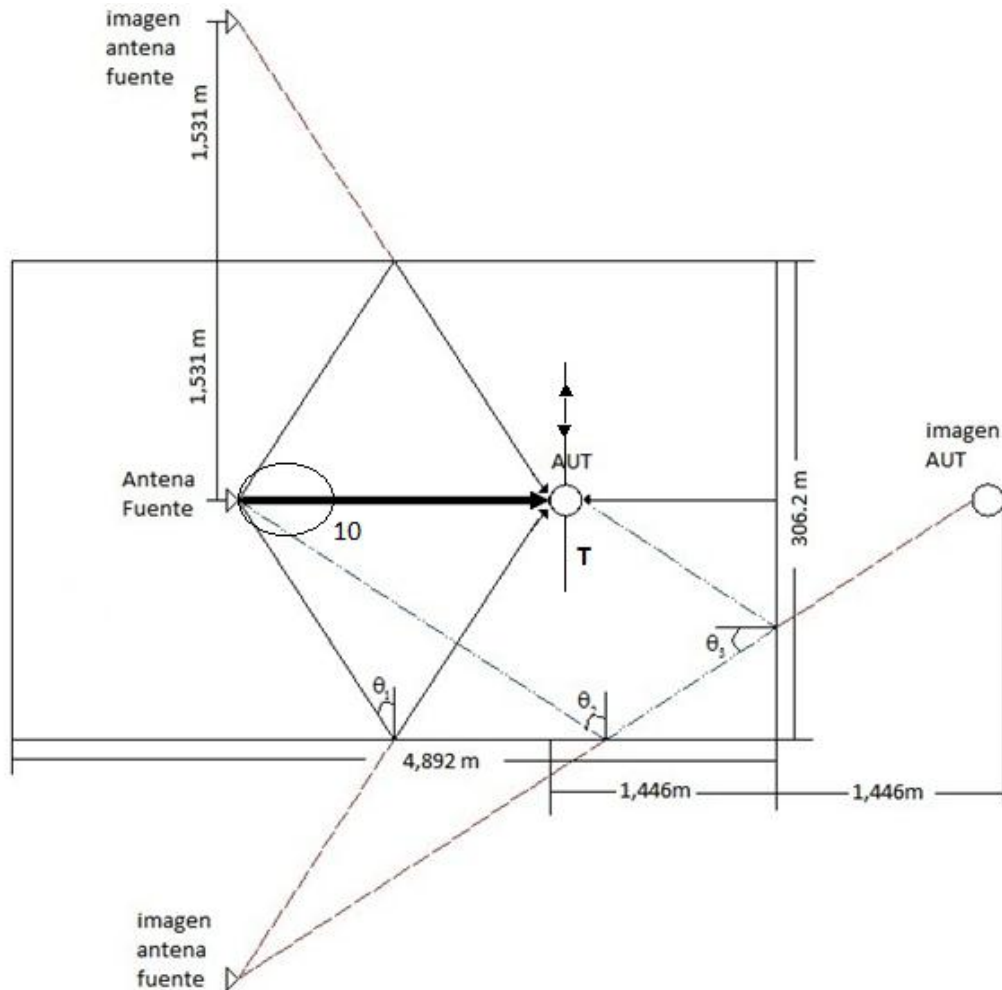


Figura 6-19. Método de trazado de rayos

En la Figura 6.20 se puede observar un patrón de radiación de una antena horn tomado del programa LVDAM-ANT.

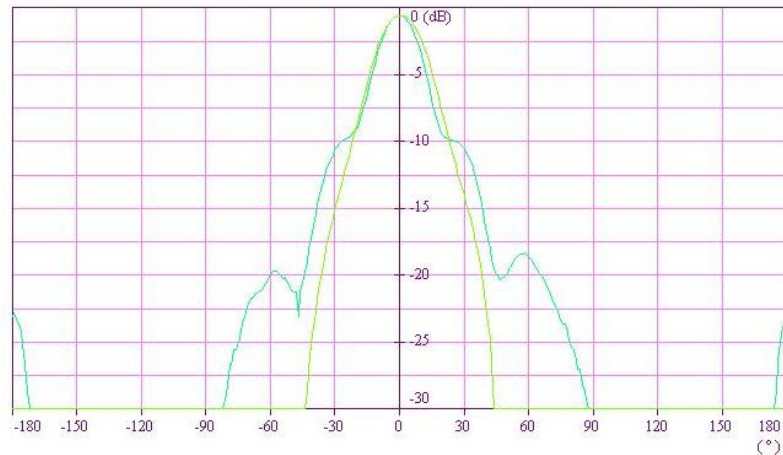


Figura 6-20. Patrón de radiación de una antena horn.

En la Figura 6.21 se ve el patrón de radiación de la misma antena horn normalizado y tomado desde 0° hasta 40° grados para analizar su comportamiento. Se puede observar que a -10 dB de atenuación se obtiene un ángulo de 31° , teniendo así un ángulo de incidencia de 59° ($90^{\circ} - 31^{\circ}$), y, comparando con el método de trazado de rayos visto en el capítulo 3, se puede concluir que tiene un comportamiento aceptable dentro de los rangos de diseño.

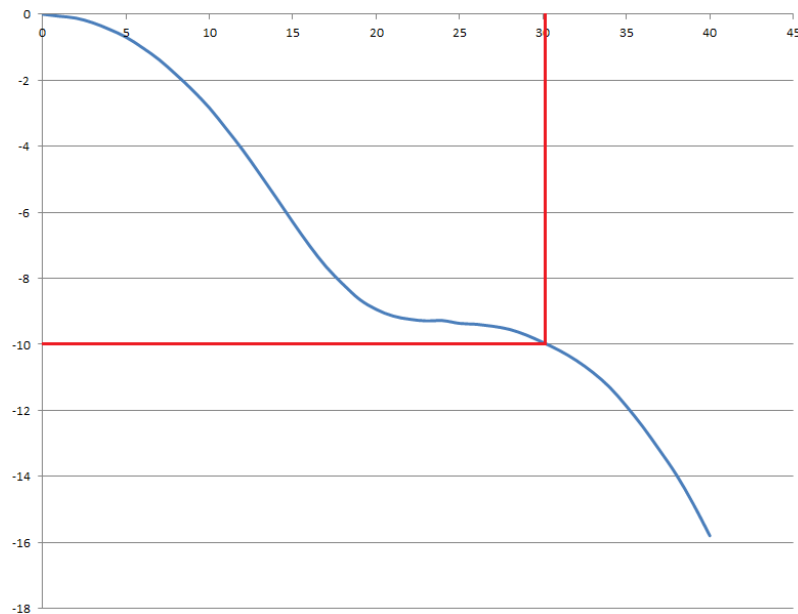


Figura 6-21. Patrón de radiación normalizado de una antena horn.

Se hace el mismo análisis para una antena dipolo. En la Figura 6.22 se puede observar el patrón de radiación de una antena dipolo.

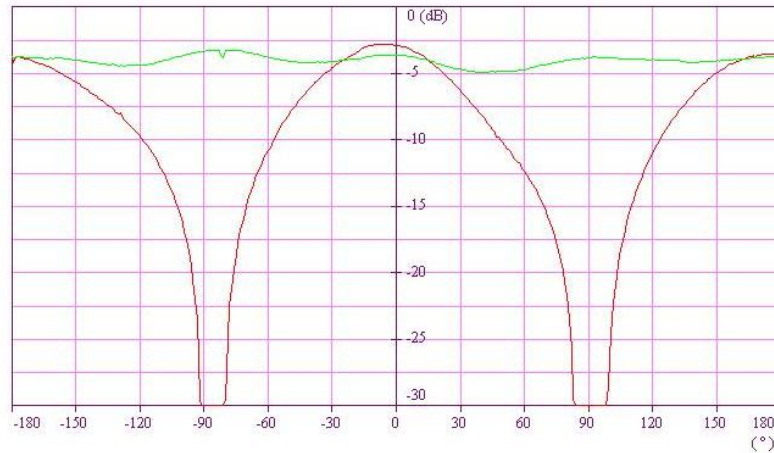


Figura 6-22. Patrón de radiación de una antena dipolo.

En la Figura 6.23 se observa el patrón de radiación de la misma antena dipolo normalizado y tomado desde 0° hasta 80° grados. Para poder analizar su comportamiento, se puede ver que a -10 dB de atenuación se obtiene un ángulo de 62° , teniendo así un ángulo de incidencia de 28° ($90^{\circ} - 62^{\circ}$), y comparando con el método de trazado de rayos visto en el capítulo 3, se puede concluir que tiene un comportamiento que no es aceptable dentro de los rangos de diseño. También se puede observar que la antena dipolo es menos directiva que la antena horn; debido a esto se pierde información que esté por encima de los 50° [2].

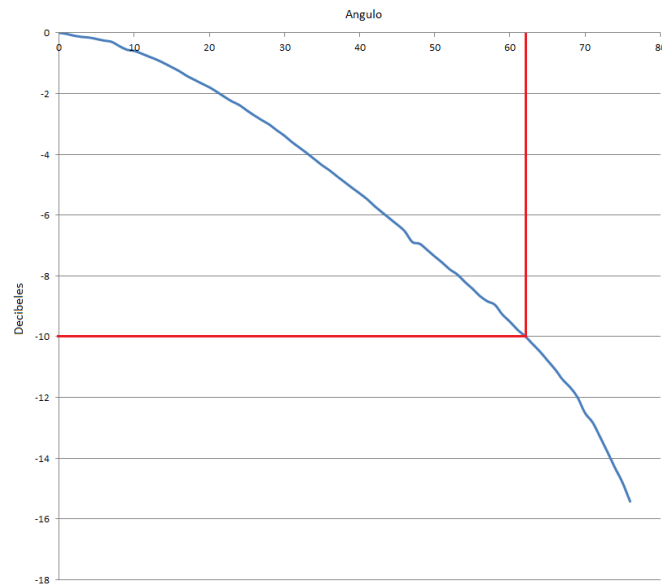


Figura 6-23. Patrón de radiación normalizado de una antena dipolo.

Conclusiones

- El material metálico que se determinó es el hierro galvanizado debido a sus características conductoras, físicas y de costo.
- Se diseñó una cámara anecóica de radiofrecuencia, la cual cumple con un funcionamiento en un ancho de banda de frecuencias de 1 a 10 GHz; además, por las características de los paneles absorbentes seleccionados, es posible realizar pruebas en una banda superior a 10 Ghz, sin exceder un límite de 40 Ghz.
- Mediante el desarrollo del diseño se analizaron las características de los paneles absorbentes piramidales, identificando sus medidas, material de fabricación y fabricante proveedor para que la cámara anecóica cumpla con su función.
- Se hicieron recomendaciones para la construcción de la cámara anecóica, explicando la distribución de los paneles absorbentes en el interior de la misma, el recubrimiento de hierro galvanizado, las instalaciones internas de la cámara, iluminación y los soportes para las antenas bajo prueba.
- Se sugirieron unas pruebas para realizar en la cámara anecóica que verifiquen el funcionamiento de está.
- Se elaboró una manual que explica como se debe trabajar dentro del laboratorio donde se construirá la cámara anecóica (Anexo 1).

Bibliografía

- [1]. C. A. Balanis., *Antenna Theory, Analysis And Design.*, Tercera Edition., John Wiley y Sons., 2005,
- [2]. L. H. Hemming, *ELECTROMAGNETIC ANECHOIC CHAMBERS A Fundamental Design and Specification Guide*, Wiley, Canada, 2002.
- [3]. R. Serway, *Fisica*, Volumen II, Editorial Thomson, Mxico, 2005.
- [4]. A. Hermosa, *Principios de electricidad y electrónica II*, Marcombo S.A., Barcelona España, 1999.
- [5]. P. Tipler, *Fisica preuniversitaria*, volumen II, editorial Reverté. S.A., Barcelona, España, 2006.
- [6]. D. Vázquez, *Diccionario de ciencias*, primera edición, Editorial complutense. S.A., España, 2006
- [7]. P. Brito y M. Lopez, *Diseño y construcción de una cámara anecóica para la facultad de Ingeniería Electrónica*, Escuela Politécnica del ejercito, Ecuador, 2006.
- [8]. P. Brito, M. Lopez y F. Sáenz, *Implementación de una cámara anecóica en la banda de 2-3 GHz*, Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE
- [9]. W. H. Emerson, *Electromagnetic Wave Absorber and Anechoic Chambers Through the Years*, Unatransacción IEEE sobre antenas y propagación, vol. AP-21, No. 4, Julio 1973.
- [10]. F.T: Ulaby, *Fundamentals or Applied Electromagnetics*, editorial Prentice- Hall, New York, USA, 1998.
- [11]. <http://ets-lindgren.com/RFAbsorbers>
- [12]. L. Bilubina, *Materiales no metálicos resistentes a la corrosion*, Editorial Marcombo. S.A., Barcelona, España, 1990.
- [13]. http://www.glendash.com/Dash_of EMC/Anechoic Chambers/Anechoic Chambers.pdf

[14]. <http://www.labvolt.com>

[15]. <http://standards.ieee.org/index.html>

[20]. T. Wayne, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta Edición, Editorial Pearson Education, México, 2003.

ANEXO 1

MANUAL DE USO DE LA CÁMARA ANECOICA Y RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

Contenido

1. USO DE LA CÁMARA ANECOICA	II
1.1. INTRODUCCIÓN	III
1.2. INDICACIONES PARA LAS ANTENAS.....	III
1.2.1. Frecuencia de operación	III
1.2.2. Elevación de las antenas.....	III
1.2.3. Cambio de antenas.....	III
1.3. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	IV
2. RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD.....	IV
2.1. INTRODUCCION.....	IV
2.2. REGLAS BASICAS DE SEGURIDAD.....	V
2.3. OTROS CONSEJOS DE SEGURIDAD.....	V
3. OTRAS RECOMENDACIONES.....	V

1. USO DE LA CÁMARA ANECOICA

1.1. INTRODUCCIÓN

La cámara anecoica es un recinto en el cual se puede simular espacio libre, permitiendo hacer pruebas de radiación de equipos electrónicos y obtener el patrón de radiación de diferentes tipos de antenas. Para el correcto funcionamiento de la cámara es importante tener en cuenta los siguientes aspectos.

1.2. INDICACIONES PARA LAS ANTENAS.

1.2.1. Frecuencia de operación

El diseño de la cámara anecoica fue realizado para operar con el sistema didáctico y de medición de antenas (SDMA) con el cual cuenta la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, este SDMA tiene dos frecuencias de operación 1 GHz y 10 GHz, por lo tanto dentro de la cámara anecoica se puede manejar este rango de frecuencia de 1 GHz a 10 GHz, no obstante gracias al material absorbente se pueden realizar pruebas por encima de los 10 GHz sin sobrepasar los 40 GHz ya que a altas frecuencias el material absorbente y la pintura de estos mismos pueden presentar disminución en la atenuación.

1.2.2. Elevación de las antenas.

Sabiendo que el alto de la cámara anecoica es de 3,05 metros, se recomienda que tanto la antena fuente como la antena bajo prueba (AUT) estén aproximadamente en la mitad de esta altura 1,52 metros y que ambas antenas se encuentren a la misma altura con el fin de que queden en línea de vista perfecta.

1.2.3. Cambio de antenas.

La cámara anecoica cuenta con caminos de paneles desmontables sobre el piso, los cuales llevan a la antena fuente y la antena bajo prueba, esto con el fin de realizar cambios respectivos en cada una de las antenas. A la hora de realizar estos cambios se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Remover con sumo cuidado los paneles del camino desmontable.
2. Caminar por el sendero desmontable con medias, con el fin de evitar daños en los paneles aledaños a este camino.
3. Realizar los cambios respectivos en las antenas.

4. Verificar la conexión de las antenas, transmisor y orientador de antena.
5. Colocar nuevamente los paneles desmontables en su sitio.

1.3. ADQUISICIÓN DE DATOS.

El computador donde se van a adquirir los datos debe estar en el exterior de la cámara, se debe iniciar el software LVDAM-ANT y verificar las conexiones entre los equipos de medición del sistema didáctico.

Una vez verificadas las conexiones, se debe hacer una prueba sencilla para comprobar el funcionamiento del orientador de antenas, esto se puede lograr manteniendo apagado el transmisor y desde el software se da inicio para que empiece a girar el orientador de antena, a la vez se comprueba el funcionamiento del sistema de adquisición de datos, ya que este con el transmisor apagado recibe una señal bastante atenuada que se considera ruido y al encender el transmisor se debe observar la señal en el computador. Para tomar pruebas dentro de la cámara Anecoica es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Verificar las conexiones de las antenas y de los instrumentos de medida.
2. Verificar el correcto funcionamiento de las antenas y del sistema de adquisición de datos.
3. Hacer ajustes de ubicación de ángulo de las antenas y de atenuación de la potencia recibida.
4. No deben quedar personas ni objetos en el interior de la cámara Anecoica.
5. Durante la prueba no se puede abrir la puerta ni realizar cambios en las antenas, de lo contrario la prueba será nula.
6. Evitar el uso de dispositivos inalámbricos dentro del laboratorio.

2. RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD.

2.1. INTRODUCCION.

La seguridad y el cuidado de la integridad de docentes, estudiantes y demás personal que haga uso de la cámara Anecoica es un ítem importante para tener en cuenta, por lo tanto en este laboratorio se deben cumplir reglas básicas de seguridad.

2.2. REGLAS BASICAS DE SEGURIDAD.

1. No correr en el interior de la cámara.
2. Si se van a realizar cambios en las antenas, estos los debe realizar solo una persona, es decir solo puede entrar una persona a la cámara Anecoica.
3. El ingreso a la cámara es necesario hacerlo con casco de seguridad, evitando causar daños en los paneles y evitando hacer contacto con alguna superficie conductora.
4. Como es un recinto de poca ventilación, al ingresar no se debe cerrar la puerta, permitiendo la ventilación y la iluminación del lugar.
5. No jugar en el laboratorio.
6. Mantener el orden y la limpieza en el laboratorio, ya que estos son factores básicos para mantener los estándares de seguridad.
7. Al terminar las pruebas realizadas todos los dispositivos se deben dejar en su respectivo sitio y apagar todos los equipos.
8. Prestar atención al trabajo que se están realizando y estar alerta.
9. Si se ingresa a la cámara se debe llevar ajustada la ropa, es peligroso llevar partes desgarradas, sueltas o que cuelguen.
10. Identificar donde está ubicado el extintor, verificar su estado, vigencia y que sea del tipo adecuado para extinguir fuego en espumas.

2.3. OTROS CONSEJOS DE SEGURIDAD.

Se debe tener en cuenta que se trabaja en un recinto especial, por lo tanto por seguridad y para su buen funcionamiento, es necesario cumplir las normas, no improvisar y seguir cada una de las instrucciones.

3. OTRAS RECOMENDACIONES.

1. Si se observa alguna anomalía en el interior de la cámara o en los equipos, se debe parar las pruebas y reportar a las personas encargadas.
2. No ingerir, ni ingresar alimentos ni bebidas a el laboratorio.
3. En caso de emergencia evacuar de inmediato el lugar siguiendo las rutas demarcadas en el edificio.
4. Si se requiere el ingreso de un equipo extra, este debe ser autorizado por el personal encargado o docente.
5. Al ingresar alguna herramienta que no haga parte del SDMA, debe ser retirada antes de realizar alguna prueba.

6. Llegado el caso se requiera el ingreso de más de una persona a la cámara Anecoica, se debe hacer con responsabilidad evitando juegos y movimientos bruscos.