



Análisis, diseño y simulación de cámaras anecoicas en la banda X y adaptativa en las bandas HF a UHF.

Iza Paucar Fabián Alexander

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Duque Cajas, Manuel Darío Ms.

30 de agosto del 2021



Document Information

Analyzed document	Proyecto_de _grado_ Fabián Iza.pdf (D111833837)
Submitted	8/30/2021 3:20:00 PM
Submitted by	
Submitter email	biblioteca@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	ilbbioteca.GDC@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: http://oa.upm.es/33831/1/PFC_danielLlilescas_sanchez.pdf Fetched: 12/1/2020 9:30:29 PM	 1
W	URL: https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/629572/33068001030506.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 7/12/2020 9:27:41 PM	 1
W	URL: http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/23362/1/T-ESPE-044109.PDF Fetched: 8/27/2021 10:28:20 PM	 1



Financiado por:
**MANUEL DARIO
DUQUE CAJAS**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Análisis, diseño y simulación de cámaras anecoicas en la banda X y adaptativa en las bandas HF a UHF**”, fue realizado por el señor **Iza Paucar, Fabián Alexander** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de Agosto del 2021

Firma:



.....
Firma digitalizada por:
**MANUEL DARIO
DUQUE CAJAS**
.....

Ing. Duque Cajas, Manuel Darío Ms.

C. C: 1707106025



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Iza Paucar, Fabián Alexander**, con cédula de ciudadanía n°1717362568, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Análisis, diseño y simulación de cámaras anecoicas en la banda X y adaptativa en las bandas HF a UHF"**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de Agosto del 2021

Firma

Iza Paucar, Fabián Alexander

C.C.: 1717362568



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Iza Paucar, Fabián Alexander**, con cédula de ciudadanía n°1717362568, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Análisis, diseño y simulación de cámaras anecoicas en la banda X y adaptativa en las bandas HF a UHF"**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 30 de Agosto del 2021

Firma



.....
Iza Paucar, Fabián Alexander
C.C.:1717362568

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios por haberme brindado la vida y por permitirme cada día alcanzar mis logros y metas, a mis padres Fabián y Anita, por ser el pilar fundamental de mi vida, por cada día darme ánimos y consejos para seguir adelante, con su amor incondicional, sus palabras de aliento y especialmente por brindarme la educación, a mi padre que desde el cielo es mi luz para alcanzar mis sueños, y estará muy orgulloso de cumplir todas mis metas, siempre estarás en mi corazón Campeón guiándome a ser mejor, a mis hermanas Andrea y Grace, por todo el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y por los momentos maravilloso juntos como familia y a todos las personas que me apoyaron alcanzar este peldaño y siempre me ayudaron, confiaron y brindaron ánimos para seguir adelante.

Fabián Alexander Iza Paucar

Agradecimiento

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, brindarme la sabiduría para poder realizar el presente proyecto.

Agradezco a mis padres, Fabián y Anita, por siempre apoyarme en todo momento, brindarme su amor incondicional y motivarme a crecer como persona y profesional.

Agradezco a mis hermanas Andrea y Grace, por apoyarme a lo largo de la carrera y por siempre permanecer juntos como familia.

Agradezco a los docentes de la carrera por brindarme los conocimientos académicos, y por guiarnos a lo largo de la etapa universitaria, especialmente al Ing. Darío Duque, por brindarme su apoyo, guía y consejos a lo largo del desarrollo del presente proyecto.

Agradezco a mis amigos que han formado parte de mi vida, mis amigos del colegio, la danza y la universidad, por siempre brindarme su apoyo incondicional cuando más lo he necesitado.

Agradezco a mis abuelitos, tíos y primos por siempre apoyar a mi familia en todo momento y demostrarnos su aprecio y cariño.

Fabián Alexander Iza Paucar

Tabla de contenido

Urkund.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	24
Abstract	25
CAPITULO I	26
INTRODUCCIÓN	26
Antecedentes	26
Justificación	26
Objetivos.....	27
General	27
Específicos	27
Trabajos relacionados.....	28
Descripción general del proyecto	29
CAPITULO II	31
MARCO TEORICO	31
Fundamentos teóricos de electromagnetismo	31
Ondas Electromagnéticas	31

Espectro electromagnético.....	31
Propagación de ondas planas.....	33
Propiedades electromagnéticas del medio.....	34
Conductividad	34
Permitividad eléctrica.....	35
Permeabilidad Magnética	35
Velocidad de propagación e impedancia intrínseca	36
Medios sin pérdidas y con pérdidas el producto de la permitividad eléctrica	36
Constante de atenuación	36
Reflexión y refracción.....	37
Leyes de Snell	38
Antenas	39
Parámetros de medición de antenas	39
Patrón de radiación.....	39
Directividad	41
Ganancia	41
Impedancia.....	41
Ancho de Banda	42
Tipos de Antenas.....	42
Antenas alámbricas	42
Arreglo de antenas.....	43

	10
Antenas de apertura y reflectoras	43
Antenas microstrip o patch	43
Regiones de campo.....	44
Región de campo cercano reactiva.....	44
Región de campo cercano radiante	45
Región de campo lejano	45
Fundamentos teóricos de una cámara anecoica	46
Tipos de cámaras anecoicas.....	47
Cámara Rectangular.....	47
Cámara cónica o ahusada.....	48
Cámara Compacta.....	48
Parámetros básicos para el diseño de la cámara anecoica rectangular	49
Materiales Absorbentes de Radiación	50
Estructura de absorbentes principales para microondas	51
Estructura Piramidal.....	51
Estructura en forma de cuña	55
Estructura contorneada	56
Estructura de absorbentes para bajas frecuencias	56
Absorbentes de ferrita	56
Simulación de material absorbente.....	57
Elementos complementarios de la cámara anecoica.....	58

	11
Blindaje o Jaula de Faraday.....	58
Blindaje soldado.....	59
Blindaje prefabricado.....	59
Blindaje arquitectónico.....	60
Puerta blindada de acceso.....	61
Paneles de Ventilación.....	62
Panales de penetración.....	63
Iluminación.....	64
Protección contra incendios.....	65
Sistema de rociadores.....	65
Sistema de descarga de gas.....	66
Contención.....	66
Problemas en el diseño de una cámara anecoica.....	66
SIMULADOR CST STUDIO SUITE.....	67
Modelado de estructuras en CST STUDIO SUITE.....	68
Creación de un bloque.....	68
Agrupar formas en componentes y asignar propiedades de material.....	69
Simulación en CST STUDIO SUITE.....	70
CAPITULO III.....	71
DISEÑO DE LA CAMARA ANECOICA EN LA BANDA X.....	71
Diseño de la cámara anecoica en la banda X.....	71

	12
Descripción Técnica Antenas Sistema MAT20.....	72
Bocina Sectorial del plano E.....	72
Bocina sectorial de plano H.....	73
Bocina Piramidal	74
Bocina Cónica	75
Microstrip Patch X Band	76
Microstrip Patch Array 4X4	76
Obtención de la longitud mínima para cumplir con la ecuación de campo lejano. ..	77
Determinación del diámetro máximo de la antena fuente donde el cono de amplificación se limita a 0.25 dB.....	79
Obtención del rango elevado de la antena a prueba AUT o antena receptora.	79
Determinación del ancho W efectivo de la cámara	80
Determinación de las dimensiones del material absorbente de radiación (RAM), para las paredes laterales, techo y piso de la cámara.	82
Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para las paredes posteriores a las antenas.	86
Análisis de la Zona de Fresnel.....	89
Diseño de los elementos complementarios de la cámara anecoica	96
Blindaje	96
Puerta.....	97
Piso Flotante	98
Panel de penetración.....	99

	13
Cables de RF	100
Conectores de RF	101
Sistema de ventilación	102
Iluminación	103
Modelamiento de las estructuras piramidales	104
Modelamiento de la pirámide IS-030A2	108
Modelamiento de la estructura de la cámara anecoica rectangular	114
CAPITULO IV	116
DISEÑO DE LA CÁMARA ANECOICA ADAPTATIVA EN EL RANGO DE HF A UHF	116
Diseño de la cámara anecoica en el rango de HF a UHF	116
Consideraciones de diseño	116
Obtención del área rectangular de la cámara anecoica	118
Obtención de la sección cónica o ahusada	119
Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para la pared posterior de la zona de quietud QZ	120
Absorbente piramidal EHP – 72PCL	122
Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para las paredes laterales, piso y techo del área rectangular	123
Absorbente piramidal EHP – 48PCL	123
Absorbente tipo cuña TDK IP – 150C	125
Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para las paredes de la sección cónica	127

Absorbente de cuña ETS-LINDGREN EHP - 36WGCL	127
Modelamiento de las estructuras piramidales y tipo cuña.....	129
Modelamiento de las estructura de la cámara anecoica cónica.....	131
CAPITULO V.....	133
SIMULACIÓN Y ANALISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS	133
Simulación del material absorbente de radiación.....	133
Materiales absorbentes de radiación cámara anecoica rectangular	134
Absorbente piramidal IS – 015A.....	135
Absorbente piramidal IS – 023A.....	136
Absorbente piramidal IS – 030A2.....	138
Materiales absorbentes de radiación cámara anecoica cónica.....	139
Absorbente tipo cuña TDK IP – 150C	139
Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-48PCL.....	141
Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-72PCL.....	141
CAPITULO VI.....	143
Presupuesto	143
Presupuesto cámara anecoica rectangular	143
Material Absorbente de Radiación	143
TDK IS-015A.....	143
TDK IS-023A.....	143
TDK IS-030A.....	143

Blindaje	144
Puerta	145
Sistema de iluminación	145
Sistema de ventilación.....	145
Piso flotante	145
Cables RF	145
Panel de penetración RF.....	146
Costos totales de implementación	146
Presupuesto cámara anecoica cónica.....	147
Material Absorbente de Radiación	147
TDK IP - 150C.....	147
ETS-LINDGREN EHP-26WW	147
ETS-LINDGREN EHP-36WGCL	148
Blindaje	148
Puerta	149
Sistema de iluminación	149
Sistema de ventilación.....	149
Piso flotante	149
Cables RF	150
Panel de penetración RF.....	150
Costos totales de implementación	150

CAPITULO VII.....	152
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	152
Conclusiones.....	152
Recomendaciones	155
Trabajo futuros	156
Referencias.....	157

Índice de Tablas

Tabla 1	Bandas de microondas estándar IEEE.....	33
Tabla 2	Características de absorción típicas absorbentes piramidales.....	52
Tabla 3	Características de absorción típicas absorbentes en forma de cuña.....	55
Tabla 4	Características de la Bocina Sectorial del plano E.....	72
Tabla 5	Características de la Bocina Sectorial del plano H.....	73
Tabla 6	Características de la Bocina Piramidal.....	74
Tabla 7	Características de la Bocina Cónica.....	75
Tabla 8	Características de la Microstrip Patch.....	76
Tabla 9	Características de la Microstrip Patch Array 4x4.....	76
Tabla 10	Características típicas de absorción IS-30A2.....	86
Tabla 11	Características del absorbente IS-030A2.....	86
Tabla 12	Características típicas de absorción IS-015A e IS-023A.....	88
Tabla 13	Características del absorbente IS-015A e IS-023A.....	88
Tabla 14	Características electrónicas del cable coaxial.....	101
Tabla 15	Características electrónicas del conector SMA.....	102
Tabla 16	Dimensiones de los absorbentes TDK IS-015A, IS-023A, IS-030A2.....	105
Tabla 17	Características de la cámara anecoica rectangular diseñada.....	115
Tabla 18	Características del absorbente EHP-72PCL.....	123
Tabla 19	Características del absorbente EHP-48PCL.....	123
Tabla 20	Características típicas de absorción IP-150C.....	126

Tabla 21	Características del absorbente IP-150C	126
Tabla 22	Dimensiones de los absorbente EHP-48PCL, EHP-72PCL	130
Tabla 23	Dimensiones de los absorbentes IP-150C, EHP-48WCL	131
Tabla 24	Características de la cámara anecoica cónica diseñada	132
Tabla 25	Alturas totales del absorbente IS-015A, IS-023A, IS-030A2	135
Tabla 26	Estimación del presupuesto material absorbente	144
Tabla 27	Estimación de presupuesto de la estructura del blindaje	144
Tabla 28	Estimación de presupuesto total de la cámara anecoica rectangular	146
Tabla 29	Estimación del presupuesto material absorbente	148
Tabla 30	Estimación de presupuesto de la estructura del blindaje	149

Índice de Figuras

Figura 1	Espectro electromagnético.....	32
Figura 2	Onda aproximadamente plana.....	34
Figura 3	Incidencia normal y oblicua	38
Figura 4	Diagrama de radiación	40
Figura 5	Diagrama de radiación en el plano 2D.....	40
Figura 6	Tipo de Antenas	43
Figura 7	Antena Patch	44
Figura 8	Regiones de campo.....	45
Figura 9	Medición de radiación de vehículos dentro de una cámara anecoica	46
Figura 10	Cámara Rectangular	47
Figura 11	Cámara ahusada	48
Figura 12	Cámara compacta	49
Figura 13	Absorbente piramidal.....	51
Figura 14	Rendimiento de incidencia normal para el absorbente piramidal	53
Figura 15	Rendimiento de incidencia oblicua para el absorbente piramidal	54
Figura 16	Absorbente en forma de cuña.....	55
Figura 17	Absorbente contorneado	56
Figura 18	Absorbente de ferrita y sus características de absorción.....	57
Figura 19	Modelo de simulación de un absorbente piramidal	58
Figura 20	Blindaje de pared solida prefabricado.....	60

	20
Figura 21 Blindaje arquitectónico	61
Figura 22 Puertas blindadas RF	62
Figura 23 Panel de ventilación con guía de onda en forma de panal	63
Figura 24 Paneles de penetración.....	64
Figura 25 ILUMINACIÓN LED	65
Figura 26 Interfaz de usuario CST STUDIO SUITE	67
Figura 27 Creación de bloque CST STUDIO SUITE	68
Figura 28 Creación de materiales CST STUDIO SUITE	69
Figura 29 Parámetros – S de un filtro pasa bajos.....	70
Figura 30 Antenas del Sistema de Microondas MAT20.....	71
Figura 31 Bocina Sectorial del plano E	73
Figura 32 Bocina Sectorial del plano H	74
Figura 33 Bocina Piramidal.....	75
Figura 34 Bocina Cónica.....	75
Figura 35 Microstrip Patch X Band.....	76
Figura 36 Microstrip Patch Array 4x4	77
Figura 37 Diseño de trazado de rayos cámara anecoica rectangular	81
Figura 38 Obtención de la altura del absorbedor para incidencia oblicua.....	83
Figura 39 Absorbente piramidal TDK serie IS.....	84
Figura 40 Dimensiones del absorbente piramidal TDK serie IS	85
Figura 41 Obtención de la altura del absorbente para incidencia normal	87

Figura 42	Dimensiones optimas de la cámara anecoica rectangular banda X	89
Figura 43	Límites de la zona de Fresnel en una superficie plana	92
Figura 44	Dimensiones del área especular de la cámara anecoica rectangular.....	96
Figura 45	Dimensiones del blindaje de la cámara anecoica rectangular	97
Figura 46	Área de la puerta blindada en la cámara anecoica	98
Figura 47	Vista preliminar del piso flotante en la cámara anecoica	99
Figura 48	Atenuación de los cables coaxiales TOTUKU Electronic	100
Figura 49	Estructura del cable coaxial TOTUKU Electronic	101
Figura 50	Vista preliminar de la ventilación y panel de penetración	103
Figura 51	Modelamiento de un absorbente piramidal.....	104
Figura 52	Creación nueva plantilla CST STUDIO SUITE	105
Figura 53	Flujo de trabajo de la plantilla CST STUDIO SUITE	106
Figura 54	Solucionador de la plantilla CST STUDIO SUITE	106
Figura 55	Unidades de la plantilla CST STUDIO SUITE	107
Figura 56	Configuración de la plantilla CST STUDIO SUITE	107
Figura 57	Detalle de la plantilla creada CST STUDIO SUITE	108
Figura 58	Diseño de la base de la pirámide IS-030A2	109
Figura 59	Diseño de la altura de la pirámide IS-030A2	109
Figura 60	Modelamiento de la forma piramidal.....	110
Figura 61	Aplicación de la herramienta “extrude curve” a la estructura lateral	110
Figura 62	Aplicación de la herramienta “extrude curve” estructura total	111

Figura 63	Diseño final de la estructura piramidal IS-030A.....	111
Figura 64	Creación del material poliuretano	112
Figura 65	Asignación del material a la estructura piramidal	113
Figura 66	Estructura piramidal IS-015A , IS-023A e IS-030A2.....	113
Figura 67	Estructura interna cámara anecoica	114
Figura 68	Iluminación de la zona de prueba	117
Figura 69	Característica de una cámara cónica	118
Figura 70	Obtención de la altura del absorbente para incidencia normal	121
Figura 71	Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-72PCL	122
Figura 72	Características típicas de absorción ETS-LINDGREN EHP-48PCL.....	124
Figura 73	Retrodispersión cámara cónica.....	124
Figura 74	Absorbente tipo cuña TDK serie IP	125
Figura 75	Dimensiones del absorbente tipo cuña TDK serie IP	126
Figura 76	Absorbente de pasarela ETS-LINDGREN EHP-26WW	127
Figura 77	Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-36WGCL	128
Figura 78	Dimensiones de la cámara anecoica cónica	128
Figura 79	Modelamiento de un absorbente piramidal.....	129
Figura 80	Modelamiento de un absorbente tipo cuña.....	130
Figura 81	Estructura interna cámara anecoica cónica.....	131
Figura 82	Simulación de un absorbente piramidal.....	134
Figura 83	Rendimiento del absorbente simulado IS – 015A.....	135

Figura 84	Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente simulado IS – 015A	136
Figura 85	Rendimiento del absorbente simulado IS – 023A.....	137
Figura 86	Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente simulado IS – 023A	137
Figura 87	Rendimiento del absorbente simulado IS – 030A.....	138
Figura 88	Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente simulado IS – 030A	138
Figura 89	Simulación de un absorbente tipo cuña.....	139
Figura 90	Rendimiento del absorbente simulado TDK IP – 150C.....	140
Figura 91	Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente TDK IP – 150C.....	140
Figura 92	Rendimiento del absorbente simulado ETS-LINDGREN EHP-48PCL	141
Figura 93	Rendimiento del absorbente simulado ETS-LINDGREN EHP-72PCL	142
Figura 94	Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente EHP-72PCL	142

Resumen

La diversificación de la industria de las telecomunicaciones a evolucionando en los últimos años brindado dispositivos inalámbricos, con la capacidad de transmitir ondas electromagnéticas a través del espectro electromagnético, cada dispositivo inalámbrico cuenta con características técnicas que especifican su correcto funcionamiento como la caracterización del patrón de radiación para antenas de RF, permitiendo de esta manera ser homologados por instituciones públicas encargadas de la regulación y control del espectro electromagnético.

Debido a lo cual es indispensable conocer las características técnicas de los dispositivos inalámbricos, mediante el uso de cámaras anecoicas con la finalidad de emular un espacio libre, y evitar interferencias electromagnéticas externas. Asimismo la Universidad de Las Fuerzas Armadas "ESPE", cuenta con el sistema de microondas MAT20, el cual incluye diferentes tipos de antenas en rango de la banda X, con la finalidad de caracterizar su patrón de radiación.

Por lo tanto este proyecto se enfoca en el diseño de dos cámaras anecoicas para el rango de la banda X y el rango de HF a UHF; para el diseño de la banda X se diseñó una cámara anecoica rectangular con un rendimiento promedio de -40dB, y finalmente se diseñó una cámara anecoica cónica para el rango de 30MHz a 3000MHz, obteniendo un rendimiento de la cámara anecoica promedio de -35dB.

PALABRAS CLAVES

- **CÁMARA ANECOICA**
- **REGIÓN DE CAMPO LEJANO**
- **MATERIAL ABSORBENTE DE RADIACIÓN**

Abstract

The diversification of the telecommunications industry has evolved in last years, providing wireless devices, with the ability to transmit electromagnetic waves through the electromagnetic spectrum; each wireless device has technical characteristics that specify its correct operation, such as specific absorption rate for mobile devices or the characterization of the radiation pattern for RF antennas, thus allowing them to be homologated by public institutions in charge of the regulation and control of the electromagnetic spectrum.

Due to which it is essential to know the technical characteristics of wireless devices, through the use of anechoic chambers in order to emulate a free space, and avoid external electromagnetic interference. Likewise, the University of the Armed Forces "ESPE" has the MAT20 microwave system, which includes different types of antennas in the X band range, in order to characterize their radiation pattern.

Therefore this project focuses on the design of two anechoic chambers for the X-band range and the HF to UHF range; For the X-band design, a rectangular anechoic chamber was designed with an average performance of -40dB, additionally frequencies were covered from the 2GHz range and finally a conical anechoic chamber was designed for the 30MHz to 3000MHz range, due to the fact that the radiation absorbing material RAM manufactured by the market is available from 30MHz, for which reason the range from 3MHz to 30MHz could not be covered, obtaining an average anechoic chamber performance of -35dB.

KEYWORDS

- **ANECHOIC CHAMBER**
- **FAR FIELD REGION**
- **RADIATION ABSORBING MATERIAL**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El estudio de los parámetros de una antena es un factor importante en el área de las telecomunicaciones, cada antena cuenta con su datasheet u hoja de especificaciones, la cual permite identificar los parámetros principales de la misma. De modo que es indispensable corroborar esta información, mediante el uso de cámaras anecoicas.

La Universidad De Las Fuerzas Armadas cuenta con el Sistema de Microondas MAT20, el cual cuenta con antenas tipo bocina (cónica, piramidal y sectorial), y antenas tipo patch microstrip (un solo elemento y arreglos de elementos), estas antenas se encuentran en la frecuencia de 8 a 12 GHz, la cual se considera como la banda X.

Por lo tanto es indispensable conocer los parámetros de las antenas en este dominio de frecuencia, y darle un uso adecuado al Sistema MAT20, para que los estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones, puedan conocer acerca de las funcionalidades y utilidades del Sistema MAT20 y las antenas pertenecientes a la frecuencia de la banda X.

Justificación

Las cámaras anecoicas son salas diseñadas para absorber en su totalidad las ondas acústicas y electromagnéticas, de la misma manera posee un aislamiento en la parte exterior para evitar que ningún ruido u onda ingrese a la misma. Simulando a un espacio libre, el cual permite que la onda incidente en las paredes de la cámara anecoica no genere reflexión alguna (Miranda et al., 2002).

Actualmente La Universidad De las Fuerzas Armadas ESPE dispone de una cámara anecoica construida en el año 2006 cuyo rango de operación es de 2 GHz a 3 GHz, con un costo de USD. 4.500,00 (López & Brito, 2006). En los últimos 5 años se han realizado mediciones en dicha cámara con resultados aceptables. Sin embargo en la última adquisición de equipos para el laboratorio de Antenas y Electromagnetismo denominado Sistemas Avanzados de Antenas de RF y Microondas para entrenamiento en Radiocomunicaciones (Marca AMITEC, Modelo MAT20) se dispone de antenas que trabajan en el rango de frecuencias en la banda X, HF y UHF por lo cual se desea analizar, diseñar y simular cámaras anecoicas que permitan identificar las especificaciones técnicas de estas antenas y además a futuro con su implementación, poder homologar equipos que se encuentren en esta banda para garantizar su funcionalidad.

Objetivos

General

Analizar, diseñar y simular cámaras anecoicas en la banda X y adaptativa en las bandas de HF a UHF.

Específicos

- Analizar el estado de arte de las cámaras anecoicas referentes a su funcionamiento y aplicación.
- Diseñar una cámara anecoica para el rango de frecuencias de la banda X.
- Diseñar una cámara anecoica adaptativa en el rango de HF a UHF.
- Utilizar simuladores de cámaras anecoica para garantizar el funcionamiento óptimo de la misma, garantizando sus especificaciones técnicas de acuerdo al rango asignado y a las especificaciones obtenidas en el diseño teórico.

- Analizar la factibilidad de implementación de una cámara anecoica en cuanto a su funcionalidad y dimensiones
- Analizar los costos que representaría su implementación y construcción así: parte eléctrica, material absorbente, estructura de Faraday, ductos para cables de RF y posición de los puntos de Transmisión como de Recepción (ubicación del servomotor).

Trabajos relacionados

El estudio de los parámetros de las antenas se ha vuelto muy importante en los últimos años, en virtud de que se garantiza las características técnicas del dispositivo, en consecuencia se ha buscado maneras de obtener las caracterizaciones de los elementos radiantes sin interferencias externas, por lo tanto se ha diseñado recintos capaces de emular el espacio libre.

Tanto las universidades y entidades gubernamentales han diseñado cámaras anecoicas con la finalidad de obtener las mediciones más óptimas de la antena a prueba. En este sentido la Universidad Nacional de Singapur junto al Ministerio de Defensa de dicho país, han diseñado una cámara anecoica multipropósito en el rango de 200MHz a 18 GHz, con un monto aproximado de 42 millones de dólares, proporcionando una investigación de vanguardia en áreas como la nanotecnología, electromagnetismo, procesamiento de señal, entre otras. La cámara anecoica diseñada dispone de mediciones tanto en campo lejano como cercano permitiendo realizar diferentes tipos de mediciones con una alta precisión. La cámara se encuentra revestida con material absorbente de la empresa ETS LINDGREN, e incluye software especializado para el análisis en campo cercano (ETS Lindgren, 2011) .

En la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, en el año 2006, se diseñó e implementó una cámara anecoica en el rango de 2GHz a 3GHz para la medición de antenas LPDA y espiral, adicionalmente se elaboró y procesó el material absorbente de

radiación, obteniendo buenos resultados de absorción de ondas electromagnéticas, el blindaje de la cámara se diseñó en base a maderas contrachapadas recubiertas de láminas de aluminio con una gran efectividad a frecuencias bajas. (López & Brito, 2006)

La Universidad de las Américas “UDLA”, elaboró un diseño para el rango de 200MHz a 2.4GHz, mediante el uso del software CST STUDIO SUITE, permitiendo analizar las características del blindaje de la cámara anecoica y la absorción del material absorbente de radiación, adicionalmente se detalló los elementos que conforman una cámara anecoica (Buitrón & Pérez, 2018).

En la Universidad Católica de San Pablo de Arequipa en Perú, mediante el apoyo de INNOVATE Perú, adquirió e implementó una cámara anecoica en el rango de 400MHz a los 6GHz, con un costo aproximado de \$200.244USD, con la capacidad de trabajar en diversas tecnologías dentro de un amplio rango como telefónica, microondas, Wi-Fi, entre otros. Esta cámara está diseñada para mediciones en campo cercano, la cual es la parte reactiva y mediante un software se realiza el proceso para calcular el patrón de radiación en la región de campo lejano (Castillo, 2016).

Descripción general del proyecto

El presente proyecto de investigación se encuentra conformado por siete capítulos, distribuidos de tal manera que el lector pueda comprender de manera sencilla el diseño del proyecto.

En el primer capítulo se detalla una breve descripción general del proyecto, mediante los antecedentes, justificación, objetivos a alcanzar y trabajos relacionados, sustentando la investigación.

En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico, describiendo fundamentos teóricos de electromagnetismo, parámetros de medición de antenas, región de campo cercano y lejano, fundamentos teórico para el diseño cámaras anecoicas incluyendo su

diferentes estructuras en base a su geometría, y el material absorbente de radiación RAM.

En el tercer capítulo se detalla la metodología y el diseño de la cámara anecoica para la banda X, con su respectivo análisis para determinar las dimensiones de su estructura, el material absorbente de radiación y elementos adicionales a la cámara anecoica como la puerta blindada RF, sistema de iluminación , sistema de ventilación, entre otros.

En el cuarto capítulo se detalla el diseño de la cámara anecoica para el rango de frecuencias HF a UHF, con su respectivo análisis, determinando su geometría para garantizar el rango de frecuencias, sus dimensiones, material absorbente de radiación y elementos adicionales.

En el quinto capítulo se procede a la realizar las simulaciones de los diferentes materiales absorbentes de radiación para el diseño de las cámaras, y posteriormente a realizar un análisis de los resultados obtenidos, en este caso los niveles de absorción de cada material.

En el sexto capítulo se realiza una estimación del presupuesto de la implementación de las dos cámaras anecoicas diseñadas, mediante los costos provistos por las empresas fabricantes de cada elemento.

En el séptimo capítulo se detalla los objetivos alcanzados mediante las conclusiones y recomendaciones del proyecto, adicionalmente se proponen trabajos futuros complementarios al proyecto de investigación.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

Fundamentos teóricos de electromagnetismo

Ondas Electromagnéticas

Un campo eléctrico que varía con el tiempo $E(t)$ produce un campo magnético $H(t)$ y a la inversa. Este patrón cíclico genera ondas electromagnéticas (OEM) capaces de propagarse en el espacio libre y en medio materiales. Cuando su propagación sigue el curso de una estructura material, como una línea de transmisión, se dice que la OEM viaja a través de un medio guiado, mientras si la propagación de la OEM viaja a través del espacio libre se considera un medio sin fronteras (Ulaby, 2007).

Las características principales de las ondas electromagnéticas son: la frecuencia, el periodo y la longitud de onda.

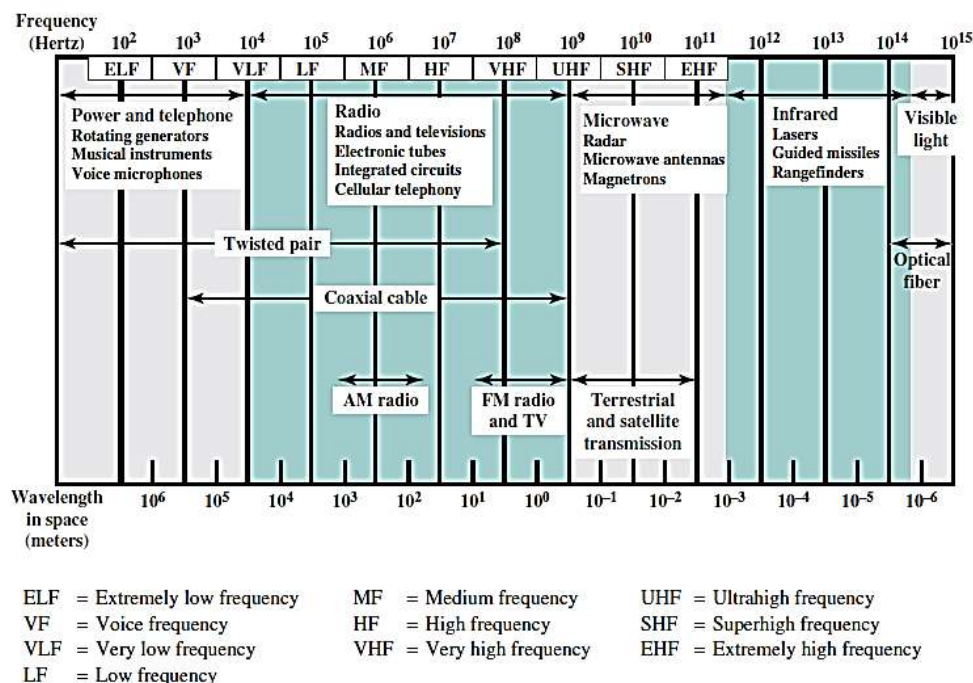
Espectro electromagnético

Cada onda electromagnética se distingue por su propia longitud de onda λ , o de forma equivalente por su propia frecuencia de oscilación f , dando como resultado un conjunto de frecuencias que se agrupan para formar bandas y determinar definir todo el espectro electromagnético. Permitiendo de esta manera brindar varios servicios como servicios de comunicaciones inalámbricas, radiodifusión sonora, televisión, sistemas de seguridad, salud publica entre otras (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2017).

La Unión internacional de Telecomunicaciones (UIT), recomienda el empleo de hertzio (Hz) como unidad de frecuencia y la designación de las bandas de frecuencia en base a la recomendación UIT-R V.431-8.

Figura 1

Espectro electromagnético



Nota. La figura representa el espectro electromagnético y sus principales aplicaciones en base a la recomendación de la UIT, (Stallings, 2014).

Para las frecuencias en el rango de microondas, consideradas en el rango de 1GHz a 40GHz, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), designó mediante letras las bandas para determinados rangos de frecuencias.

En el rango de microondas existe una variedad de aplicaciones incluyendo control de tráfico aéreo, radar, control de misiles, aviación, servicio móvil y mucho más debido a que las antenas son más direccionales, por lo tanto existe una adecuada conexión punto a punto (Stallings, 2014).

Tabla 1*Bandas de microondas estándar IEEE*

Banda	Frecuencia
L	1 – 2 GHz
S	2 – 4 GHz
C	4 – 8 GHz
X	8 – 12 GHz
Ku	12 – 18 GHz
K	18 – 27 GHz
Ka	27 – 40 GHz

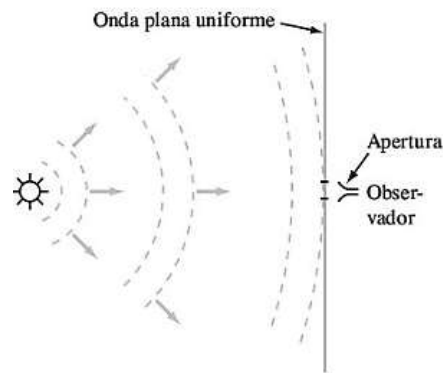
Nota. Esta tabla muestra las bandas de microondas asignadas por la IEEE.

Propagación de ondas planas

Una antena emite ondas electromagnéticas, las cuales se expanden hacia el exterior de la fuente en forma de ondas esféricas. Aun cuando la antena irradie mayor energía en ciertas direcciones, las ondas esféricas viajan con la misma rapidez en todas las direcciones. Por consiguiente para un observador lejano de la fuente, el frente de la onda irradiada aparece aproximadamente plano, por lo tanto se analizará las ondas planas uniformes en el diseño de la cámara anecoica (Ulaby, 2007).

Figura 2

Onda aproximadamente plana



Nota. La figura representa ondas planas uniformes vistas por un observador lejano a través de una apertura, (Ulaby, 2007) .

Propiedades electromagnéticas del medio

Un medio se caracteriza por tener propiedades tanto eléctricas como magnéticas, considerando sus parámetros constitutivos, su permitividad eléctrica ϵ , permeabilidad magnética μ y conductividad σ .

Se dice que un medio es homogéneo si sus parámetros constitutivos son constantes en todo el medio.

Conductividad

La conductividad mide la capacidad de transportar electrones de un punto a otro por la influencia de un campo eléctrico externo. Se puede clasificar como conductores o dieléctricos (aislantes). Un conductor posee gran cantidad de electrones débilmente adheridos en las capas más externas de los átomos, permitiendo de esta manera un flujo de electrones al incidir con un campo eléctrico, mientras que un dieléctrico posee electrones fuertemente adheridos, por lo tanto es muy difícil producir un flujo de electrones al incidir con un campo eléctrico (Cheng, 1997).

Un conductor perfecto se caracteriza por tener una conductividad infinita mientras que un dieléctrico por una conductividad de 0.

Permitividad eléctrica

La permitividad eléctrica es una medida de la facilidad de polarización de un material en un campo eléctrico (Moreno et al., 2007).

Se expresa por su valor relativo con respecto a la permitividad del vacío.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Permitividad eléctrica en el espacio vacío:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [F/m] \quad (2)$$

Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética es la relación entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético. Se puede dar una comparación entre la conductividad que respeta a la electricidad mientras que la permeabilidad al magnetismo (De La Vega, 1995).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

Permeabilidad en el espacio vacío

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m] \quad (4)$$

Velocidad de propagación e impedancia intrínseca

La velocidad de propagación viene dada por el producto entre la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética, cuando la onda electromagnética se encuentra en el vacío, da como resultado:

$$u_p = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} \quad (5)$$

La impedancia intrínseca relaciona las magnitudes de campo magnético con campo eléctrico, y en el vacío tiende a:

$$\eta = \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377(\Omega) \approx 120\pi \quad (6)$$

Medios sin pérdidas y con pérdidas el producto de la permitividad eléctrica

Un medio sin pérdida se caracteriza por tener una conductividad de cero, en este caso un dieléctrico perfecto, como el espacio libre, mientras que un medio con pérdidas se caracteriza por tener una conductividad diferente de cero, donde la potencia transmitida por la onda electromagnética es convertida en calor similar a lo que ocurre en una línea de transmisión (Ulaby, 2007).

Constante de atenuación

Se define a la constante de atenuación como la ecuación para expresar la atenuación de la onda y el desplazamiento de fase. Al ser un medio con pérdidas el coeficiente se expresa de la siguiente manera:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (7)$$

Donde α es la constante de atenuación del medio y β es la constante de fase.

Si la onda viaja en la dirección z positivo, para una onda plana uniforme, la atenuación de la onda es afectada a través del factor $e^{-\alpha}$ (Xu & Huang, 2018).

Mediante el coeficiente de atenuación podemos obtener la profundidad de penetración δ_s , la cual es inversamente proporcional a α , y la cual indica con qué capacidad la onda electromagnética puede penetrar el medio conductor (Ulaby, 2007).

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha} \quad (8)$$

Por consecuencia un dieléctrico perfecto, $\sigma = 0$, su constante de atenuación $\alpha = 0$, y su profundidad de penetración $\delta_s = \infty$, define que una onda plana en el espacio libre puede propagarse sin pérdidas. De la misma manera a la inversa si es un conductor perfecto su profundidad de penetración $\delta_s = 0$. Por lo tanto en un conductor perfecto, las ondas electromagnéticas no podrán penetrar su superficie.

Reflexión y refracción.

Cuando una onda plana uniforme viaja a través de un medio y se encuentra con una superficie de separación de otro medio con características diferentes, la onda incidente se refleja y se refracta, la incidencia puede ser normal u oblicua.

La incidencia normal se produce cuando la onda viaja perpendicular a la superficie del medio que incide, mientras que la incidencia oblicua se produce cuando la onda tiene un ángulo con respecto a la superficie de incidencia (Ulaby, 2007).

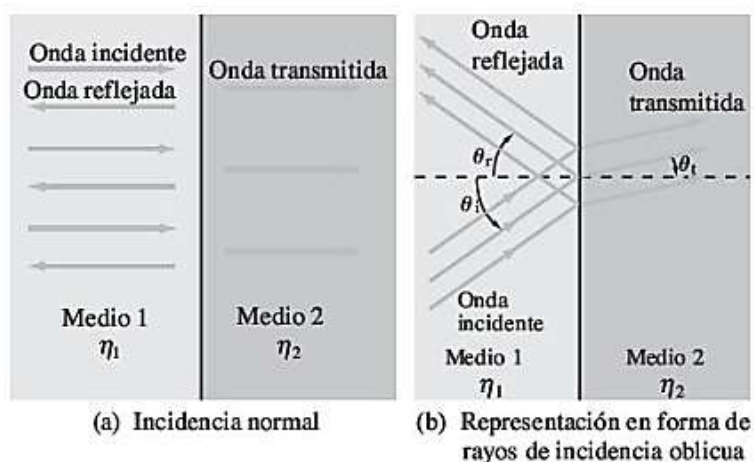
La reflexión es el cambio de dirección de la onda, la cual ocurre en el mismo medio, el ángulo de la onda incidente con la onda reflejada son iguales.

La refracción o transmisión de la onda ocurre cuando la onda traspasa de un medio a otro, en el cual la onda se propaga con una distinta velocidad.

Los ángulos formados por la onda incidente, reflejada y transmitida están relacionados por las leyes de Snell (Cheng, 1997).

Figura 3

Incidencia normal y oblicua



Nota. La figura representa en forma de rayos la reflexión y la trasmisión tanto cuando la incidencia es normal y oblicua (Ulaby, 2007).

Cada medio es caracterizado por su permitividad eléctrica ϵ , permeabilidad magnética μ y conductividad σ .

Leyes de Snell

Se definen los ángulos de incidencia, reflexión y trasmisión respectivamente como θ_i , θ_r y θ_t , estos tres ángulos se encuentran interrelacionados por las leyes de Snell.

La ley de la reflexión de Snell establece que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia y la ley de refracción de Snell proporciona una relación entre $\text{sen } \theta_t$ y $\text{sen } \theta_i$ en función de la razón de velocidades de fase (Ulaby, 2007).

Adicionalmente el índice de refracción de un medio, n , se define con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{c}{u_p} = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_0\epsilon_0}} = \sqrt{\mu_r\epsilon_r} \quad (9)$$

Por lo tanto la ley de Snell da como resultado

$$\frac{\text{sen } \theta_t}{\text{sen } \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} \quad (10)$$

Antenas

“Una antena se define como un transductor entre una onda guiada que se propaga a través de una línea de transmisión y una onda electromagnética que se propaga a través de un medio sin fronteras, o viceversa.” Este elemento cuenta con parámetros importantes que permiten garantizar la transmisión y recepción de la onda electromagnética como la direccionalidad de la antena, frecuencia de trabajo, niveles de potencia, directividad, ganancia, patrón de radiación, entre otras, dependiendo su aplicabilidad.

Parámetros de medición de antenas

La medición de antenas se realiza ampliamente a nivel mundial, tanto en instalaciones industriales para el diseño de dispositivos móviles, como también en el sector gubernamental, específicamente en el área militar. Por lo tanto es indispensable conocer los parámetros principales de las antenas. Entre los principales parámetros de medición se encuentra el patrón de la antena, su ganancia asociada y su adaptabilidad a la línea de transmisión (impedancia).

Patrón de radiación

El patrón de radiación permite observar la capacidad de una antena para radiar con una cierta direccionalidad, lo cual quiere decir que la forma del patrón de radiación puede ser casi esférico cuando radie en todas las direcciones o puede radiar en una dirección específica. Se debe definir previamente un marco de referencia donde se pueda caracterizar la antena, especialmente para la medición de las antenas se utiliza

el sistema de coordenadas esférico, los cuales se representan en diagramas de radiación (Cardama et al., 2002).

Figura 4

Diagrama de radiación

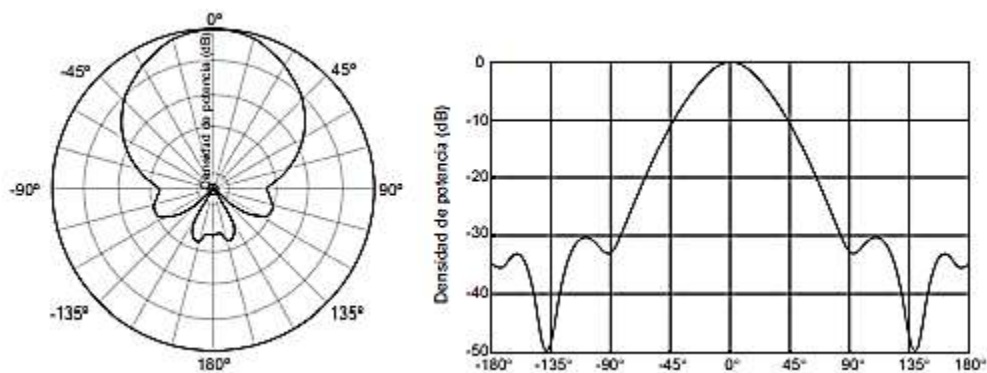


Nota. La figura representa diagramas de radiación isótropo, omnidireccional y directivo, (Cardama et al., 2002).

Adicionalmente se puede obtener cortes bidimensionales, los cuales pueden representarse en forma cartesiana o polar, en este caso la representación en coordenadas cartesianas permite observar las características principales en antenas directivas mientras que en el diagrama polar suministra una mayor información de la distribución de la potencia en diferentes direcciones del espacio.

Figura 5

Diagrama de radiación en el plano 2D



Nota. La figura representa diagramas de radiación en coordenadas polares y cartesianas respectivamente, (Cardama et al., 2002).

Directividad

La directividad es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia en ese mismo punto que radiaría una antena isotrópica a igual distancia y con la misma potencia total radiada (Gallardo, 2019).

$$D(\theta, \varphi) = \frac{S_{rad}(\theta, \varphi)}{P_{rad}/4\pi r^2} \quad (11)$$

Donde $S_{rad}(\theta, \varphi)$ es la

Tanto la directividad como la ganancia pueden estar expresadas en dBi, si su relación se basa a una antena isotrópica o dBd en relación a una antena dipolo.

Ganancia

La ganancia es la relación entre la densidad de potencia radiada y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igual distancia y con la misma potencia entregada (Gallardo, 2019) .

$$G(\theta, \varphi) = \frac{S_{rad}(\theta, \varphi)}{P_{ent}/4\pi r^2} \quad (12)$$

La ganancia y la directividad se encuentran relacionadas mediante la eficiencia de la antena.

$$G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi)\eta \quad (13)$$

Impedancia

La impedancia es un parámetro importante, dado que la antena necesita radiar al máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas garantizando la eficiencia de

la antena que viene dado por la relación entre la potencia radiada y la entregada, para obtener una mayor eficiencia es indispensable adaptar las impedancias de la antena con la línea de transmisión proveniente del transmisor (Cardama et al., 2002).

Ancho de Banda

El ancho de banda se define como la banda de frecuencias donde las propiedades de la antena se mantiene dentro de ciertos parámetros definidos alrededor de la frecuencia central, esto debido a que todas las antenas tienen una geometría finita, por lo tanto están diseñadas para operar en un rango de frecuencia determinado (Gallardo, 2019).

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (14)$$

Tipos de Antenas

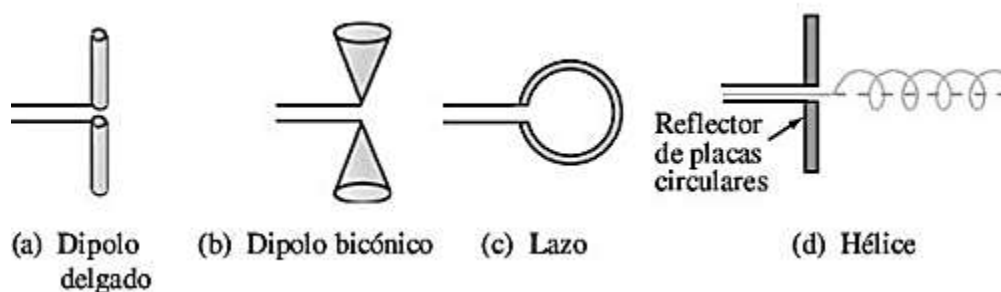
Existe gran variedad de antenas para diferentes aplicaciones y bandas de frecuencia entre las principales que se destacan son: antenas alámbricas, antenas de apertura y reflectoras, tipo patch y agrupación de antenas.

Antenas alámbricas

En esta agrupación se encuentran las antenas más fundamentales, las cuales se encuentran diseñadas por hilos conductores, capaz de soportar corrientes para formar campos electromagnéticos (Cardama et al., 2002). Donde la suma de los campos radiados por todos los elementos da como resultado el campo total radiado. Entre los principales encontramos a los monopolos, dipolos, espiras y hélices.

Figura 6

Tipo de Antenas



Nota. La figura representa diferentes tipos de antenas, (Ulaby, 2007).

Arreglo de antenas

Un arreglo de antenas es un conjunto de antenas conectadas entre sí, para comportarse como un solo elemento. Lo cual permite controlar la magnitud y fase de la señal que alimenta cada antena individual, para conformar el patrón de radiación de la antena y orientar la dirección del haz (Ulaby, 2007).

Antenas de apertura y reflectoras

A diferencia de las antenas de alambre, en las antenas de apertura la fuente de radiación es la distribución de campo eléctrico a través de la apertura y se suelen excitar con guías de onda. Las antenas que se consideran de tipo apertura son las bocinas tanto piramidales como cónicas (Cardama et al., 2002).

Las antenas reflectoras permiten aplicaciones como prestación de servicios de comunicaciones a grandes distancias, el reflector más común es el parabólico.

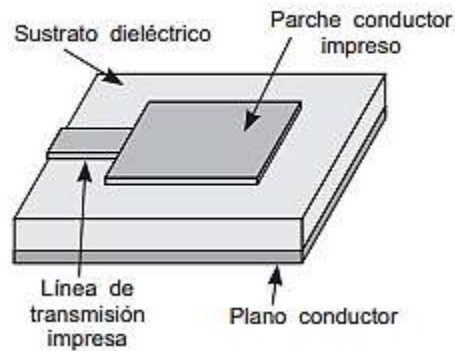
Antenas microstrip o patch

Las antenas microstrip consiste en un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico colocado encima de un plano metálico (Cardama et al., 2002), estas

antenas se han hecho más frecuentes debido a sus ventajas en sus costos, peso y facilidad de creación en masa.

Figura 7

Antena Patch



Nota. La figura representa antenas tipo patch con sus elementos fundamentales, (Cardama et al., 2002).

Regiones de campo

El espacio que rodea una antena generalmente se encuentra dividido en tres regiones: región de campo cercano reactiva, región de campo cercano radiante (Zona de Fresnel) y regiones de campo lejano (Zona de Fraunhofer). Se ha establecido varios criterios para definir los límites entre las regiones de campo.

Región de campo cercano reactiva

Región de campo cercano reactiva como su nombre lo indica es la región de campo cercano que rodea inmediatamente a la antena y predomina el campo reactivo.

El límite exterior para esta región es $R < 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$ desde la superficie de la antena (Balanis, 2005).

Región de campo cercano radiante

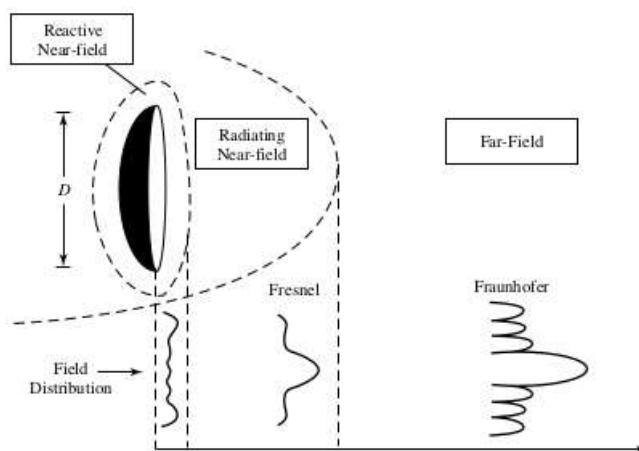
Región de campo cercano radiante se define como la región entre la región reactiva del campo cercano y la región de campo lejano donde predominan los campos radiantes y donde la distribución de campo angular depende de la distancia desde la antena. El límite interior se encuentra en $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ y el límite exterior se encuentra en $R < 2D^2/\lambda$, donde D es la dimensión más grande de la antena (Balanis, 2005)

Región de campo lejano

Región de campo lejano (Zona de Fraunhofer), se define la región donde la distribución del campo angular es independiente de la distancia desde la antena. Una antena produce un campo que es aproximadamente plano en la región de campo lejano, de manera que las ondas emitidas por la antena son aproximadamente planas en la región de campo lejano. El límite interior se puede considerar desde $R = 2D^2/\lambda$, y el límite exterior en el infinito (Balanis, 2005).

Figura 8

Regiones de campo



Nota. La figura representa las diferentes regiones de campo con sus respectivos cambios típicos del patrón de amplitud de la antena (Balanis, 2005) .

Fundamentos teóricos de una cámara anecoica

Las cámaras anecoicas son estructuras diseñadas para la medición en interiores de campos electromagnéticos, en las cuales las OEM son absorbidas por el material absorbente que se encuentran en el perímetro.

Una cámara anecoica ideal es un cuarto diseñado para emular el espacio libre, ninguna onda radio es reflejada de las paredes, techo o piso. Por lo tanto el uso de una cámara anecoica es requerido para la medición electromagnética (EM), evitando las interferencias externas fuera de la cámara (Xu & Huang, 2018).

Figura 9

Medición de radiación de vehículos dentro de una cámara anecoica



Nota. La figura representa la medición de la radiación de un vehículo dentro de una cámara anecoica de la empresa Frankonia Group (FRANKONIA GROUP, 2020) .

En la práctica una cámara anecoica no es capaz de emular un espacio libre ideal, por lo tanto es indispensable garantizar un rendimiento adecuado de las mediciones de las antenas dentro de la cámara mediante un diseño adecuado para garantizar las condiciones deseadas.

Tipos de cámaras anecoicas

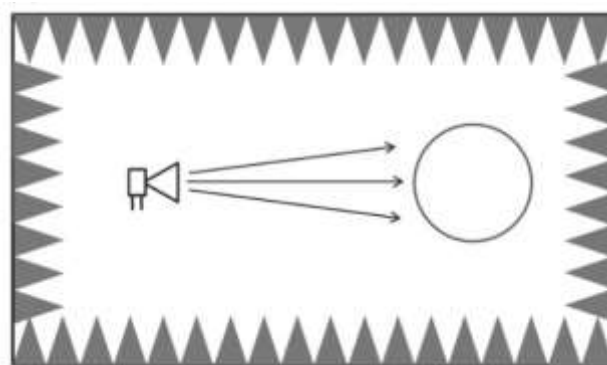
Las cámaras anecoicas según su geometría se clasifican en rectangulares, ahusadas y compactas.

Cámara Rectangular

La cámara rectangular puede optar por varios tamaños dependiendo el rango de frecuencia deseada. Puede tener dimensiones pequeñas para frecuencias de microondas o puede ser una gran estructura para realizar mediciones de compatibilidad en aviones.

Figura 10

Cámara Rectangular



Nota. La figura representa una cámara rectangular con su respectiva fuente y zona de quietud, (Xu & Huang, 2018) .

Adicionalmente se puede clasificar en según la cobertura del material absorbente en: semi- anecoica y full- anecoica.

La cámara semi-anecoica consiste en un recubrimiento del material absorbente en todas las paredes a excepción del piso, ocasionando que el piso sea un conductor, simulando un espacio abierto sobre un plano de tierra metálico (Rodríguez, 2004) mientras que la cámara full anecoica se encuentra recubierta por todas sus paredes incluido el piso con material absorbente, simulando un espacio abierto.

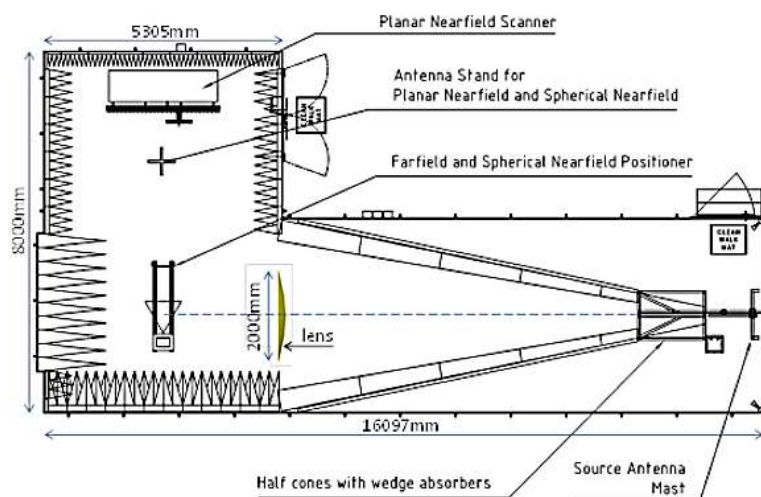
Cámara cónica o ahusada

Para realizar el análisis de las mediciones de antenas la cámara rectangular es la más común sin embargo surgen varios problemas a medida que la frecuencia de prueba se reduce, esto abarca cámaras rectangulares con tamaños significativos, por lo tanto un desafío en la actualidad es el diseño de cámaras cónicas.

En las cámaras cónicas, los reflejos especulares no se eliminan, sino que se utilizan para obtener una condición de campo lejano en la ubicación de la antena bajo prueba, adicionalmente proveen una mejor uniformidad de campo con respecto a la cámara rectangular (Hindle et al., 2017, p. 15).

Figura 11

Cámara ahusada



Nota. La figura representa el diseño de una cámara ahusada con sus respectivos componentes (Rodriguez et al., 2013).

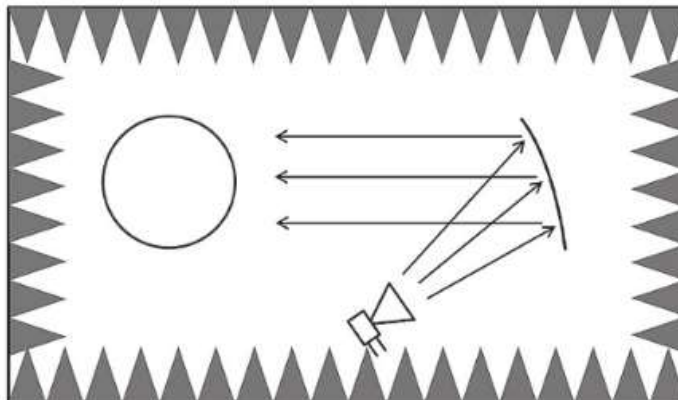
Cámara Compacta

La cámara compacta es muy útil para iluminar un objeto grande con una onda plana a frecuencias más altas porque el objeto bajo prueba debe colocarse en la región

de campo lejano. Cuando la frecuencia es alta, la condición de campo lejano no se puede satisfacer sin el uso de un reflector. Normalmente se utiliza un reflector parabólico para generar una onda plana a frecuencias más altas (Xu & Huang, 2018).

Figura 12

Cámara compacta



Nota. La figura representa una cámara compacta con su respectiva fuente , reflector y zona de quietud, (Xu & Huang, 2018) .

Parámetros básicos para el diseño de la cámara anecoica rectangular

Los parámetros básicos que se deben considerar para la obtención de las dimensiones de una cámara anecoica rectangular especializada para pruebas o mediciones de antenas:

- Ecuación de campo lejano

$$\frac{2D^2}{\lambda} \quad (15)$$

- Frecuencia de operación mínima y máxima de la antena
- Incertidumbre permitida en las mediciones de la antena
- Zona de quietud

Materiales Absorbentes de Radiación

Los materiales absorbentes de radiación o Radar Absorbing Materials (RAM) por sus siglas en inglés, existen desde los años 30 ha razón de la invención del radar, con la finalidad de absorber las ondas electromagnéticas emitidas por cualquier dispositivo de RF, de tal manera que las OEM no se han reflejadas (Xu & Huang, 2018).

La industria y universidades siguen investigando para mejorar las características de los materiales absorbentes de radiación, buscando nuevos materiales más duraderos, económicos y con la capacidad de cubrir un mayor rango de frecuencias. Adicionalmente para mejorar la efectividad del material absorbente, se puede añadir geometría a la superficie especialmente piramidal (Micromag, s. f.).

Existe una gran variedad de materiales absorbentes los cuales van desde carbono o grafito y ferritas, también se han utilizado dieléctricos artificiales añadiendo inclusiones como varillas, alambres, discos y esferas, adicionalmente se producen pequeños circuitos que resuenan a la frecuencia deseada.

Entre los materiales más comunes encontramos, los materiales absorbentes de ferrita, los cuales trabajan para frecuencias bajas (MHz) y los absorbentes dieléctricos, los cuales trabajan para frecuencias de microondas (GHz). (Hemming, 2002)

La frecuencia del material absorbente puede sintonizarse mediante la variación de los elementos resistivos y capacitivos del material absorbente, adicionalmente el material absorbente debe cumplir diferentes estándares como el NRL 8093, basado pruebas de incendios.

El absorbente ideal es difícil de fabricar para un rango de frecuencia muy amplio porque es un desafío sintetizar material con igual permitividad y permeabilidad relativa compleja, pero esto proporciona una dirección para el diseño de la RAM.(Xu & Huang, 2018)

Estructura de absorbentes principales para microondas

Estructura Piramidal

La estructura piramidal se usa principalmente para el rango de frecuencias de microondas, ofrece un cambio progresivo de adaptación de impedancia desde la impedancia de espacio libre ($377[\Omega]$) hasta la parte inferior del absorbente (Xu & Huang, 2018).

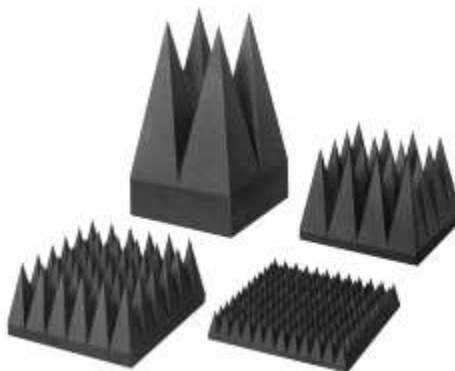
Por lo general suelen estar construidas mediante espumas de polímeros como el poliuretano y polietileno, y utilizar la pérdida óhmica del carbono para mejorar su rendimiento. (TDK, s. f.-b)

Son ideales para aplicaciones en una amplia gama de dispositivos inalámbricos especialmente en pruebas relacionadas con teléfonos móviles.

Se puede lograr un valor típico de absorción de 50dB a incidencia normal a altas frecuencias (GHz).

Figura 13

Absorbente piramidal



Nota. La figura representa diferentes estructuras de absorbentes piramidales de empresa TDK de la serie IS , (TDK, s. f.-b).

Los fabricantes de RAM, disponen de catálogos, donde se puede apreciar todas las especificaciones de cada RAM, desde las dimensiones de la estructura, el retardo al

fuego, resistencia a la humedad, dimensiones de la plancha y sus características típicas de absorción tanto de incidencia oblicua como normal.

Las características de absorción de las estructuras piramidales, se encuentran especificadas por su reflectividad en dB. Generalmente el fabricante provee sus especificaciones mediante pruebas realizadas por la fábrica.

Entre las principales fábricas disponemos la empresa TDK Corporation, que brinda una variedad de RAMs a nivel mundial, contando con un catálogo amplio. Uno de sus principales productos son los de la Serie IS-MATERIAL (TDK), los cuales están diseñados con los estándares adecuados para un correcto rendimiento como FS 209E y NRL 8093, basados en espumas de polietileno (TDK, s. f.-b).

Tabla 2

Características de absorción típicas absorbentes piramidales

SERIE	0.1 GHz	0.3 GHz	0.5 GHz	0.8 GHz	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz	30 GHz	50 GHz
IS-005A	-	-	-	-	-	15	20	30	50	50
IS-012A	-	-	-	20	20	30	40	55	55	55
IS-015A	-	-	-	20	20	35	40	55	55	55
IS-023A	-	-	-	23	30	45	50	55	55	55
IS-030A	-	-	-	30	35	45	50	55	55	55
IS-045A	-	-	30	35	45	50	55	55	55	55
IS-060	-	-	32	37	42	50	55	55	55	55
IS-075	-	25	35	40	45	55	55	55	55	55
IS-100	-	30	40	45	50	55	55	55	55	55

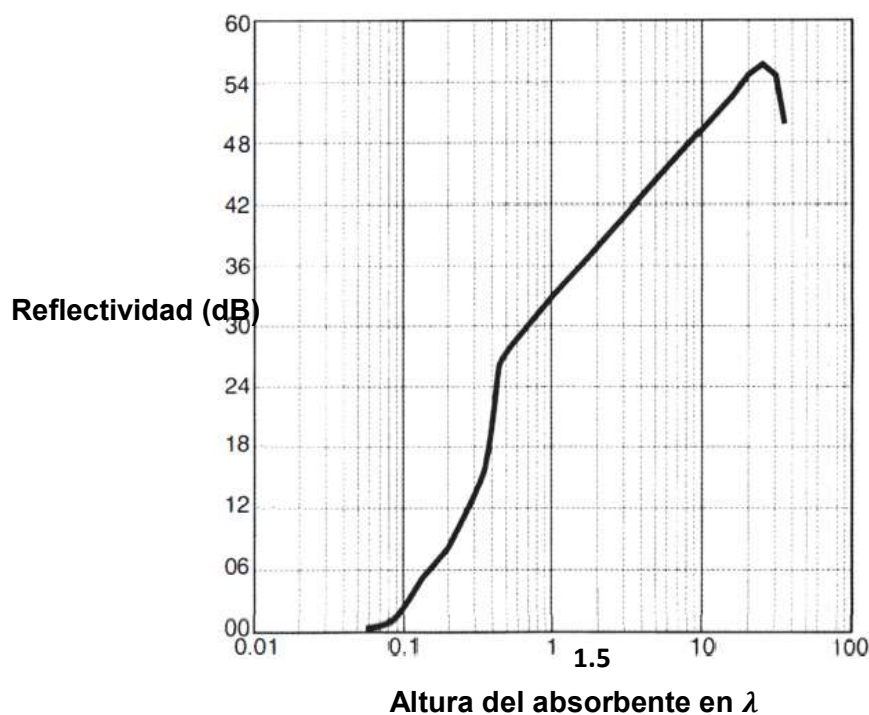
Nota. La figura representa las características de absorción típicas de absorbentes electromagnéticos piramidales de empresa TDK de la serie IS, la unidades se encuentran en dB, (TDK, s. f.-b).

Adicionalmente para un análisis más exhaustivo, se puede optar por las gráficas propuestas por Hemming (2002), donde se puede determinar la altura piramidal del material absorbente en base a la longitud de onda, el ángulo de incidencia y la reflectividad deseada.

Para la incidencia normal, que se produce en las paredes posteriores a las antenas de recepción y transmisión en la cámara anecoica se puede utilizar la Figura 14, para la obtención del material absorbente en las paredes posteriores. Adicionalmente para reducir costos, en la pared posterior a la antena de transmisión, la altura obtenida puede reducirse a la mitad (Hemming, 2002).

Figura 14

Rendimiento de incidencia normal para el absorbente piramidal

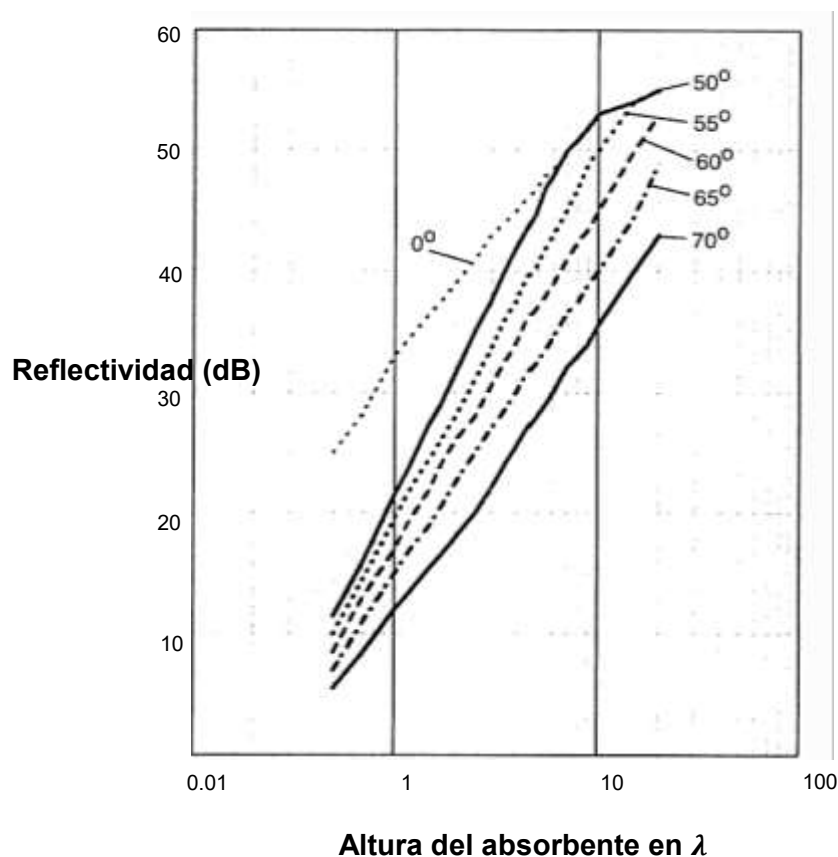


Nota. La figura representa el rendimiento de incidencia normal para un absorbente piramidal en función de la reflectividad y la altura del absorbedor en longitud de onda, (Hemming, 2002, p. 61).

Como se conoce no todas las ondas emitidas por la antena trasmisora son normales por lo tanto se dispone de Figura 15 para obtener el absorbente piramidal, para incidencias oblicuas, en consecuencia este absorbente es el más importante, el cual debe tener el mejor rendimiento posible, debido a que se trata de evitar la mayor cantidad de reflexiones posibles, para garantizar una absorción óptima se puede considerar entre 30 a 40 dB (Hemming, 2002).

Figura 15

Rendimiento de incidencia oblicua para el absorbente piramidal



Nota. La figura representa el rendimiento de incidencia oblicua mediante el ángulo de reflexión para un absorbente piramidal en función de la reflectividad y el espesor del absorbedor en longitud de onda, (Hemming, 2002).

Estructura en forma de cuña

El absorbente de cuña posee una estructura similar a la piramidal, con la diferencia que uno de sus lados cuenta con una estructura uniforme, este diseño puede ofrecer un mejor desempeño cuando la onda incidente proviene de las direcciones paralelas a la cresta del absorbente (Xu & Huang, 2018). Este tipo de absorbente se utiliza normalmente para reducir reflejos de ángulos grandes en una cámara compacta, se puede lograr una absorción de 47 dB a incidencia normal a altas frecuencias.

Figura 16

Absorbente en forma de cuña



Nota. La figura representa las características de absorción típicas de absorbentes tipo cuña de empresa TDK de la serie IP, la unidades se encuentran en dB, (TDK, 2013, p. 12).

Tabla 3

Características de absorción típicas absorbentes en forma de cuña

SERIE	30MHz	50MHz	100MHz	500MHz	1GHz	5GHz	18GHz	40GHz
IP-045E	14	14	14	20	30	40	40	40
IP-100C	17	17	18	25	30	40	40	40
IP-150C	20	23	30	30	32	40	40	40

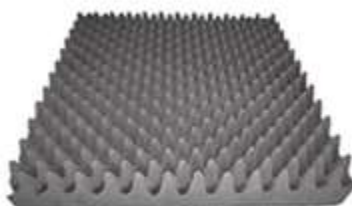
Nota. La figura representa las características de absorción típicas de absorbentes tipo cuña de empresa TDK de la serie IP, la unidades se encuentran en dB, (TDK, 2013, p. 12)

Estructura contorneada

La estructura contorneada es utilizada para absorber ondas milimétricas, el cual puede ser adquirido en varios grados de espesor, obteniendo una absorción típica 50 dB a incidencia normal a 30 GHz (Xu & Huang, 2018).

Figura 17

Absorbente contorneado



Nota. La figura representa las características de absorción típicas de absorbentes contorneado de empresa Microwave Vision Group, (Microwave Vision Group, s. f., p. 9).

Estructura de absorbentes para bajas frecuencias

Las pruebas de mediciones de cámaras anecoicas en el rango de frecuencias entre los 30 a 100 MHz, ha generado nuevos estudios para encontrar absorbentes más óptimos, entre los principales se encuentra las baldosas de ferrita, existen dos tipos de baldosas, baldosas cerámicas de un espesor aproximado de 6mm y otra en forma de rejillas. Al ser un material pesado, se lo instala en paneles de madera contrachapada unidos a la pared del blindaje. Una de sus principales ventajas, es reducir el peligro de incendio y el volumen de la cámara (Hemming, 2002).

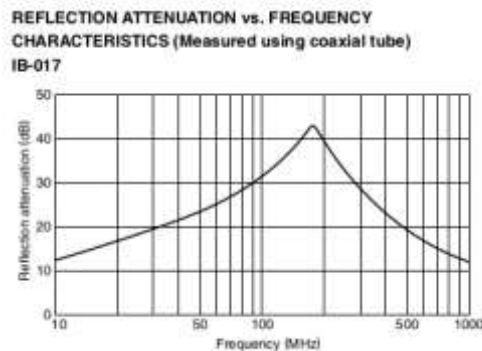
Absorbentes de ferrita

Los absorbentes de ferrita normalmente utilizan la pérdida de resonancia magnética, por lo tanto poseen una permeabilidad magnética muy alta, a diferencia de los absorbentes dieléctricos. Cabe señalar que los espacios de aire entre las baldosas

de ferrita degradan el rendimiento de absorción y deben controlarse cuidadosamente.(Xu & Huang, 2018)

Figura 18

Absorbente de ferrita y sus características de absorción



Nota. La figura representa las características de absorción típicas de absorbentes de ferrita en función de su coeficiente de reflexión y la frecuencia de empresa TDK Electronics serie IB, (TDK, 2013, p. 6).

Simulación de material absorbente

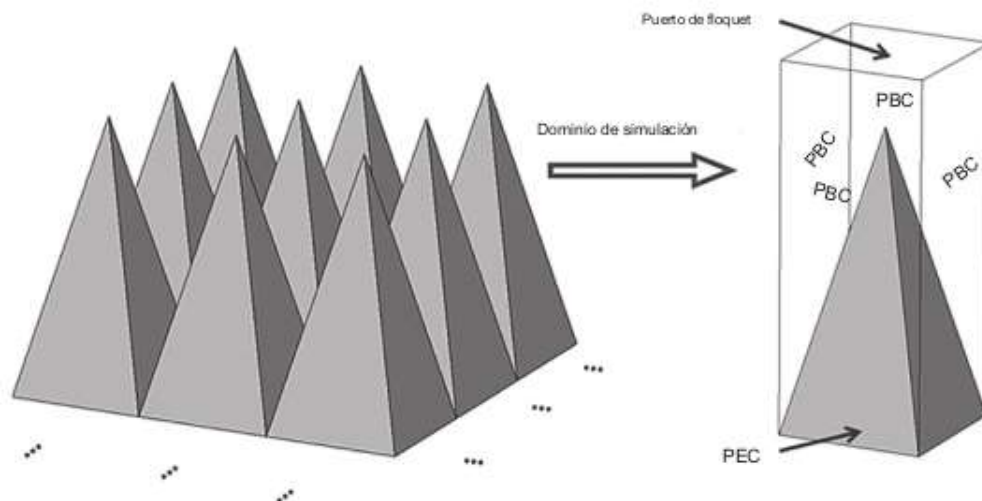
Mediante los parámetros constitutivos de un medio, permitividad, conductividad y permeabilidad de la RAM, teóricamente se puede determinar el coeficiente de reflexión.

Existen muchos métodos para analizar el rendimiento de absorción de un absorbente:

Se pueden utilizar los siguientes métodos numéricos para analizar el rendimiento del absorbente : El método de diferencias finitas (FDFD) , el método de elementos finitos (FEM) y el método de ecuación integral (IE), además se puede implementar en simuladores como CST STUDIO para obtener el rendimiento del absorbente. Al aplicar estos métodos, no es necesario simular un panel grande con muchos absorbentes, se puede aplicar la condición de contorno periódico (PBC) y solo se necesita discretizar y simular una celda unitaria(Xu & Huang, 2018).

Figura 19

Modelo de simulación de un absorbente piramidal



Nota. La figura representa el modelo de simulación de un absorbente en programas de diseños asistidos por simulador como CST STUDIO, (Xu & Huang, 2018, p. 16).

Elementos complementarios de la cámara anecoica

Los elementos complementarios cumplen funciones tales como prevenir interferencias exteriores, extraer gases nocivos, evitar incendios, iluminación entre otras, con la finalidad de resguardar la funcionalidad de la cámara anecoica y brindar una mejor eficiencia (Hemming, 2002).

Blindaje o Jaula de Faraday

La jaula de Faraday es un contenedor metálico protector de los campos eléctricos estáticos, en su interior el campo eléctrico es nulo y se utiliza en la protección de dispositivos electrónicos de descargas eléctricas (Muñoz, s. f.).

Se utiliza principalmente en laboratorios biomédicos, en cámaras anecoicas, en el sector de las telecomunicaciones para evitar interferencias electromagnéticas de diversos tipos tanto naturales como artificiales.

Por lo tanto el blindaje o jaula de Faraday evitara que la energía radiada desde el exterior ingrese a la cámara anecoica o viceversa. Este tipo de blindaje se encuentra en función del desempeño de la cámara anecoica. El material usado en estos tipos de blindaje comúnmente son paneles de madera contrachapada laminado a ambos lados con acero galvanizado u hojas de aluminio de cobre, instaladas sobre las paredes de la cámara (Pinto, 2004).

Existen diferentes tipos de blindaje, se requiere blindajes de alto rendimiento, cuando los equipos dentro de la cámara son sensibles y la cámara anecoica se encuentra cerca de interferencias electromagnéticas de alta potencia.

Se puede usar un blindaje moderado cuando solo se desee controlar el entorno electromagnético en el interior de la cámara. Adicionalmente si se desea brindar un soporte adicional al material absorbente se puede usar acero galvanizado calibre 28, o si se desea probar equipos de alta potencia o la compatibilidad electromagnética de una aeronave, el blindaje debe ser un blindaje soldado (Hemming, 2002).

Los blindajes se pueden clasificar según su estructura en tres tipos:

Blindaje soldado

Para el blindaje de esta estructura se utiliza generalmente acero galvanizado calibre 16 o más grueso, al ser soldado las costuras tienden a ser más confiables, garantizando hermeticidad; con la ayuda de equipos para fugas de costura se puede determinar la efectividad de estos blindajes proporcionando así más de 120dB de efectividad de blindaje en todo el espectro de electromagnético(Hemming, 2002).

Blindaje prefabricado

El blindaje de prefabricado es el más común. La mayoría de empresas brindan este tipo de diseños de cámara, debido a que brinda una fácil instalación y además puede ser reubicado en caso de necesitarlo. El material más común son paneles de madera contrachapada recubierta con láminas con acero galvanizado. Su diseño se

basa en canales donde se introduce los paneles y se los ajusta con tornillos, dando la forma de la cámara, estos diseños brindan una eficiencia de 100 dB a 18 GHz, y se puede operar hasta 40 GHz (Hemming, 2002).

Figura 20

Blindaje de pared solida prefabricado



Nota. La figura representa un blindaje de pared sólida de la empresa Universal Shielding Corp, (RA Mayes, s. f.-b).

Blindaje arquitectónico

Se lo conoce de esta manera, debido que el blindaje se construye sobre una edificación existente. Se adhiere las láminas de acero sobre la superficie con una cinta adhesiva especializada y adicionalmente se sella las uniones para evitar fugas electromagnéticas. Su eficiencia es de 60 dB hasta 1 GHz (Hemming, 2002).

Figura 21*Blindaje arquitectónico*

Nota. La figura representa un blindaje arquitectónico con su respectiva lamina de acero plegable sobre la pared de la empresa U.S. GREEN BUILDING COUNCIL, (RA Mayes, s. f.-a)

Puerta blindada de acceso

Este tipo de acceso es el más crítico de los accesos a la cámara puesto que debe asegurar que la puerta sea lo más hermética posible en los bordes de la pared y el blindaje (Hemming, 2002). La empresa Universal Shield Corp (USC), cuenta con puertas blindadas RF con un mecanismo de enclavamiento de 3 puntos para un cierre hermético y seguro, tanto las superficies de los rodillos y las levas son fabricadas de acero inoxidable para el funcionamiento prolongado evitando la atenuación debido a la fricción y desgaste. Adicionalmente las puertas son fáciles de operar, dado que requieren menos de 20 libras de fuerza en el mango. Para evitar la atenuación las puertas son diseñadas con cobre al berilio alrededor de la periferia de la puerta. Proporcionando una efectividad de 100dB a 120 dB. Para instalaciones electromecánicas, la normativa ecuatoriana de construcción manifiesta que, las puertas deben tener un mínimo de 0.9m de ancho y 2m de altura.

Figura 22

Puertas blindadas RF



Nota. La figura representa un blindaje arquitectónico con su respectiva lamina de acero plegable sobre la pared de la empresa U.S. GREEN BUILDING COUNCIL, (RA Mayes, s. f.-a)

Paneles de Ventilación

Los paneles de ventilación con guía de onda en forma de panel son indispensables en una cámara anecoica, debido a que la incidencia de las ondas electromagnéticas sobre el material absorbente produce calor y es necesario poder mantener temperaturas adecuadas en las mediciones. Los paneles de ventilación consisten en un par de marcos de latón soldados, los cuales unen una matriz tipo panel de acero, formando de esta manera una unión eléctrica y mecánica continua en toda la matriz (FRANKONIA GROUP, s. f.).

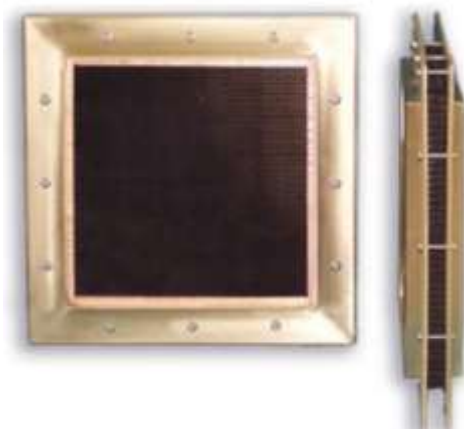
Los paneles de ventilación son instalados sobre la estructura de blindaje, cuentan con sujetadores especializados para brindar hermeticidad al momento de la

instalación evitando soldaduras. Según la necesidad se puede personalizar las dimensiones, las cuales dependen de la frecuencia máxima usada en la cámara.

Disponibilidad de las celdas de 3/16" y 1/8", las cuales tienen una efectividad de 100 dB a 1MHz a 10GHz y de 120 dB Hasta 40 GHz respectivamente (Raymond RF, s. f.).

Figura 23

Panel de ventilación con guía de onda en forma de panel



Nota. La figura representa un panel de ventilación de la empresa Raymond RF, (Raymond RF, s. f.).

Panales de penetración

Los cables que van hacia la cámara anecoica deben estar ubicados en un paneles diseñados especialmente para evitar interferencias electromagnéticas, en los cuales se instala conectores RF, conductos de alimentación y otros componente que requieran ingresar hacia la cámara anecoica.

Los tamaños son estándar o personalizables, entre los cuales se encuentra paneles entre los 300mmx300mm o 450mm x 450 mm dependiendo el funcionamiento de la cámara. En ciertas cámaras se maneja paneles de penetración móviles con la

finalidad de realizar más pruebas dependiendo la necesidad.(FRANKONIA GROUP, s. f.)

Figura 24

Paneles de penetración



Nota. La figura representa un blindaje arquitectónico con su respectiva lamina de acero plegable sobre la pared de la empresa U.S. GREEN BUILDING COUNCIL, (RA Mayes, s. f.-a).

Iluminación

Para iluminar el interior de las cámaras anecoicas, se ha diseñado nuevos tipos de iluminación que van desde las más comunes como lámparas halógenas hasta sistemas de luz de fibra óptica. Las recomendaciones provistas por la guía de FRANKONIA-EMC (FRANKONIA GROUP, 2020) , sugiere que cuando el material absorbente de las paredes de la cámara sea de ferrita, la iluminaria se encuentre en las esquinas del techo de la cámara mientras si el material es piramidal se instale entre dos puntas del material absorbente. Adicionalmente los cables que van conectados hacia la iluminaria deben ir por detrás del absorbente en tubos metálicos.

Se debe considerar al momento del diseño que cualquier accesorio de iluminación en una cámara anecoica no debe emitir niveles de energía de RF, y se debe ubicar como mínimo a 1.20m del nivel central de la cámara, y evitar el mayor número de

iluminarias, puesto que cada iluminaria puede ser una causa potencial de reflejos de RF en la habitación (Cuming Lehman Chambers, s. f.).

Con los nuevos avances el diseño de sistemas de luz de fibra óptica se encuentran en auge permitiendo de esta manera modernizar cámaras existentes, sus ventajas son penetraciones mínimas en la cámara, eliminación de posibles fuentes de EMI, mantenimiento reducido y mejor distribución de la luz en la cámara.

Figura 25

ILUMINACIÓN LED



Nota. La figura representa iluminaria LED HIGH BAY diseñadas principalmente para cámaras anecoicas de la empresa TDK, (TDK, s. f.-a).

Protección contra incendios

La protección contra incendios es fundamental en cámaras anecoicas, debido a que ciertos materiales absorbentes son altamente inflamables, aunque la industria ha optado por diseñar materiales con la capacidad de retardar incendios, siempre es necesario diseñar un sistema de emergencia.

Sistema de rociadores

Los sistemas de rociadores funcionan mediante tuberías instaladas en la parte superior del techo, se ha diseñado sistemas telescopios para evitar que las cabezas de los rociadores produzcan reflexiones no deseadas en la cámara, los cuales son

activados con detectores de humo. Aunque este tipo de sistemas ha causado grandes problemas en las cámaras, debido a que el material absorbente absorbe el agua produciendo dificultades al momento de eliminar los residuos de agua (Hemming, 2002).

Sistema de descarga de gas

Se usó químicos de Halon, debido a que es un compuesto químico capaz de extinguir el fuego y no dañar los equipos eléctricos, también se ha diseñado sistemas de gas en base a CO₂, pero se debe tener cuidado con el personal, por su compuesto tóxico (Hemming, 2002).

Contención

Se ha optado como medida de protección la contención del incendio, aislando las instalaciones alrededor de dos horas y utilizar aspersores sobre la cámara para mejorar la contención. Debido a que el material absorbente al entrar en contacto puede producir gases nocivos para el personal, es necesario contar con un equipo de inhalación de humo cerca de las puertas de acceso y verificar que todo el personal haya evacuado del lugar (Hemming, 2002).

Problemas en el diseño de una cámara anecoica

Uno de los principales inconvenientes al momento de diseñar una cámara anecoica es encontrar la mejor manera de optimizar la menor cantidad de materiales radiantes absorbentes (RAM), de tal manera que se puede minimizar costos y maximizar el rango de prueba de la cámara anecoica.

Un desafío interesante es determinar las mejores características del material absorbente, puesto que el costo depende del tamaño y del rendimiento del mismo, intuitivamente una cámara anecoica con materiales de alta calidad proporcionará un mayor rendimiento y abarcará un mayor rango de frecuencia de prueba.

Una solución factible es el uso de software asistidos para facilitar el diseño de las cámaras anecoicas como es el caso de CST STUDIO SUITE.

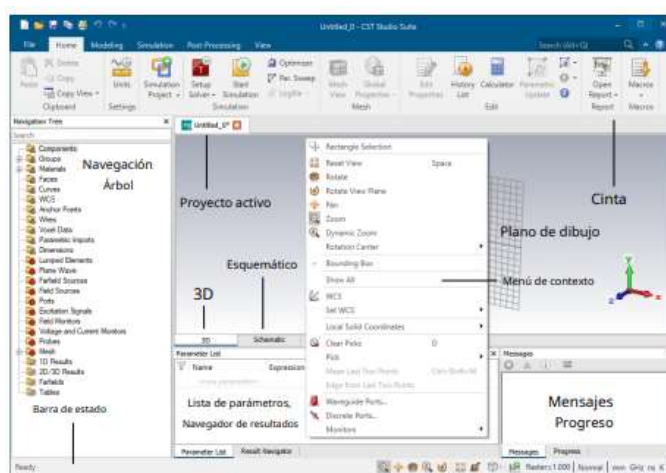
SIMULADOR CST STUDIO SUITE

CST STUDIO SUITE es una potente herramienta para la simulación de varios problemas de campos electromagnéticos y aplicaciones relacionadas. El software presenta una interfaz gráfica amigable con el usuario, facilitando el manejo de múltiples proyectos y simulaciones en tiempo real.

El software cuenta con varios métodos de simulación, proporcionando diversas opciones de simulación en 3D, para el desarrollo del análisis de las cámaras anecoicas, se utilizara CST Microwave Studio, capaz de simular problemas campos electromagnéticos de manera rápida y precisa para altas frecuencias, ofreciendo una variedad de solucionadores que operan en dominios de tiempo y frecuencia (CST STUDIO SUITE, 2010).

Figura 26

Interfaz de usuario CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la interfaz de usuario de CST STUDIO SUITE, con las ventanas de apoyo, (CST STUDIO SUITE, 2010).

Entre sus principales aplicaciones se encuentra el diseño de componentes como filtros, líneas de transmisión, antenas, entre otros, permitiendo simular sus respectivas características.

El software permite realizar los diseños y simulaciones de manera eficiente y rápida mediante la interfaz gráfica.

Modelado de estructuras en CST STUDIO SUITE

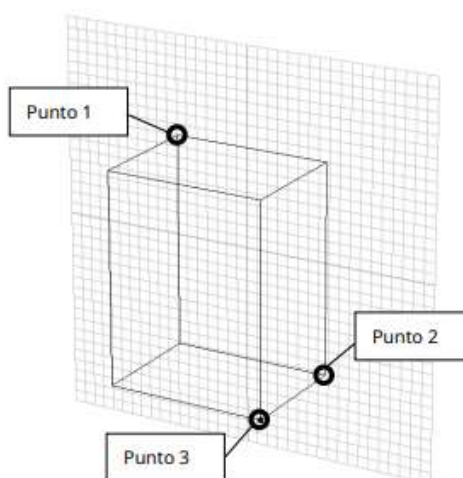
CST STUDIO SUITE tiene la capacidad de modelar estructuras simples, con la facilidad de crear estructuras complejas a partir de estructuras primitivas. Entre las estructuras primitivas se encuentra el bloque.

Creación de un bloque

- Utilizar la pestaña de modelado y activar la herramienta bloque.
- Establecer un punto de partida haciendo doble clic en una ubicación en el plano de dibujo.
- Seleccionar la esquina opuesta de la base del bloque en el plano del dibujo haciendo doble clic en ella.
- Definir la altura del bloque arrastrando el ratón, posteriormente realizar doble clic para fijar la altura del bloque.

Figura 27

Creación de bloque CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la creación de un bloque mediante la selección de tres puntos ,(CST STUDIO SUITE, 2010) .

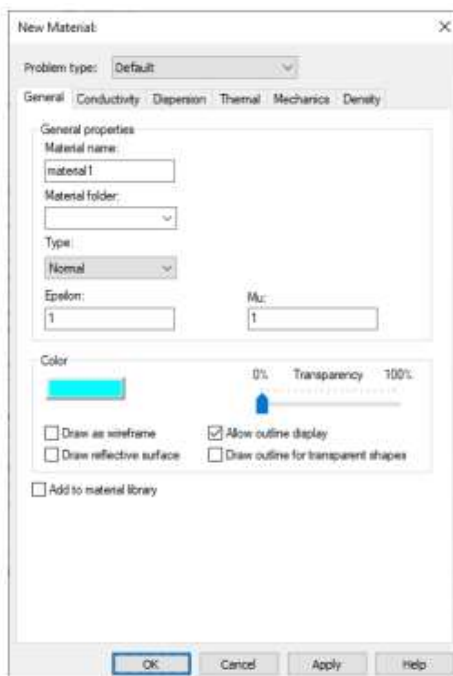
CST STUDIO SUITE cuenta con una variedad de estructuras primitivas (cilindro, esfera, cono), las cuales se pueden generar de manera similar a la estructura del bloque,

Agrupar formas en componentes y asignar propiedades de material

CST STUDIO SUITE permite agrupar las estructuras primitivas en componentes con la finalidad de crear una estructura compleja de manera ordenada, esta agrupación permite operaciones simplificadas como copias, eliminaciones, etc. Adicionalmente se puede asignar el material a cada estructura, con su color respectivo de la biblioteca de materiales o se puede crear un nuevo material con las características deseadas por el usuario.

Figura 28

Creación de materiales CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la creación de un nuevo material para los componentes diseñados en la plataforma CST STUDIO SUITE, (CST STUDIO SUITE, 2010).

Simulación en CST STUDIO SUITE

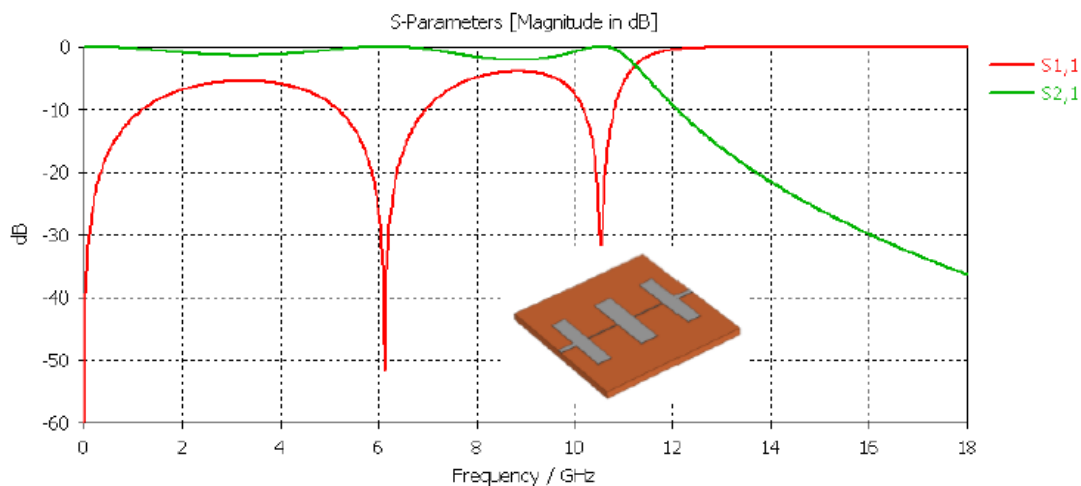
Una vez diseñado la estructura, se asigna un procedimiento de malla completamente automático antes de iniciar la simulación, el software cuenta con varias técnicas de simulación diferentes (solucionadores en el dominio del tiempo, solucionadores en el dominio de la frecuencia, solucionadores multicapa entre otros) .

La mayor flexibilidad de simulación la ofrece el solucionador de dominio del tiempo, el cual permite obtener un comportamiento de la frecuencia de banda ancha del dispositivo, ideal para simular los materiales absorbentes de radiación en su rango de absorción, para la resolución se basan en la técnica de Integración finita (FIT) (CST STUDIO SUITE, 2020).

Mediante los solucionadores se puede obtener parámetros S, Voltage Standing Wave Ratio VSWR, balance, energía, potencia, señal del puerto, entre otros parámetros.

Figura 29

Parámetros – S de un filtro pasa bajos



Nota. La figura representa los parámetros S11 y S22 de un filtro pasa bajos, (CST STUDIO SUITE, 2020) .

CAPITULO III

DISEÑO DE LA CAMARA ANECOICA EN LA BANDA X

Diseño de la cámara anecoica en la banda X

El diseño de la cámara anecoica se encuentra basado en el análisis del libro de “Cámaras anecoicas electromagnéticas” (Hemming, 2002), la cámara anecoica es diseñado a partir del límite inferior de la región de campo lejano, $R = 2D^2 / \lambda$, denominado longitud de rango R, el cual establece la distancia óptima de separación entre la antena fuente o transmisión y la antena de prueba (AUT) o recepción, en función de la frecuencia de operación y el diámetro máximo de la antena.

Por lo tanto es indispensable conocer el diámetro máximo de las antenas de prueba, en este caso del Sistema de Microondas MAT20, el cual cuenta con antenas tipo bocinas (cónicas, piramidales y sectoriales) y patch microstrip.

Figura 30

Antenas del Sistema de Microondas MAT20



Nota. La figura representa los antenas tipo bocina (sectorial, cónica y piramidal) y patch microstrip, (Aulestia & Omarza, 2012; Espinosa, 2017) .

El diseño de la cámara anecoica se lo realiza en base a la región de campo lejano, debido a que en esta región, el patrón de radiación de la antena es invariante en función de la distancia.

Existen diferentes tipos de geometrías para las estructuras de la cámara anecoica como rectangulares, cónicas o compactas, para frecuencias de microondas se recomienda usar cámaras rectangulares, debido a sus dimensiones y a su economía de diseño.

Descripción Técnica Antenas Sistema MAT20

La descripción técnica descrita a continuación se encuentra proporcionada por la empresa AMITEC, con el datasheet de cada antena disponible en el Sistema MAT20, asimismo las dimensiones de las antenas se obtuvo de (Espinosa, 2017).

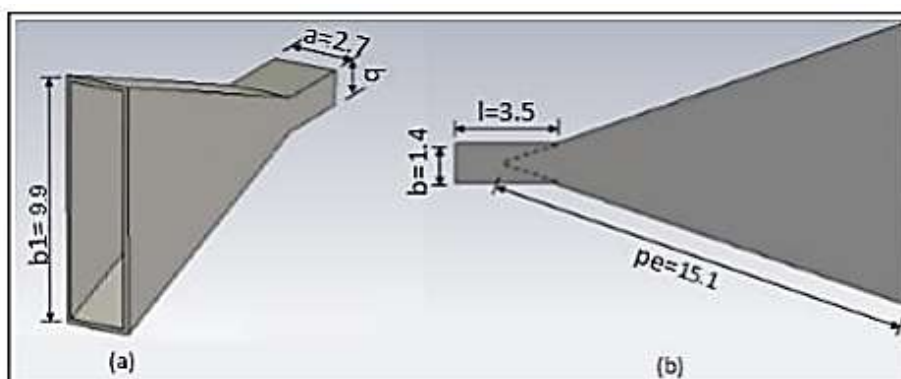
Bocina Sectorial del plano E

Tabla 4

Características de la Bocina Sectorial del plano E

Características	
Ancho de banda	8.2 – 12.4 GHz
Espesor	2 mm
Dimensiones de apertura pared ancha b1	9.9 cm
Longitud de la pared de la bocina pe	15.1 cm
Guía de onda de pared ancha a	2.7 cm
Guía de onda de la pared angosta b	1.3 cm
Longitud de la guía de onda l	3.5 cm

Nota. Esta tabla muestra las características de la bocina sectorial del plano E, (Espinosa, 2017).

Figura 31*Bocina Sectorial del plano E*

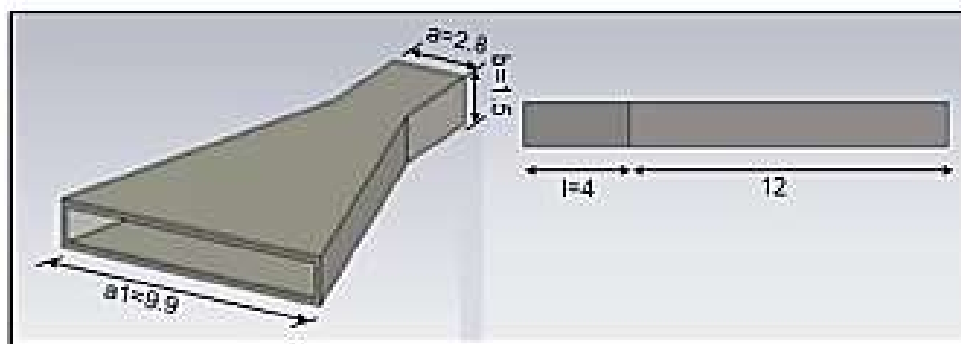
Nota. La figura representa los dimensiones de la bocina sectorial E, (Espinosa, 2017).

Bocina sectorial de plano H

Tabla 5*Características de la Bocina Sectorial del plano H*

Características	
Ancho de banda	8.2 – 12.4 GHz
Espesor	2 mm
Dimensiones de apertura pared ancha a1	9.9 cm
Guía de onda de pared ancha a	2.8 cm
Guía de onda de la pared angosta b	1.5 cm
Longitud de la guía de onda l	4 cm

Nota. Esta tabla muestra las características de la bocina sectorial del plano H, (Espinosa, 2017).

Figura 32*Bocina Sectorial del plano H*

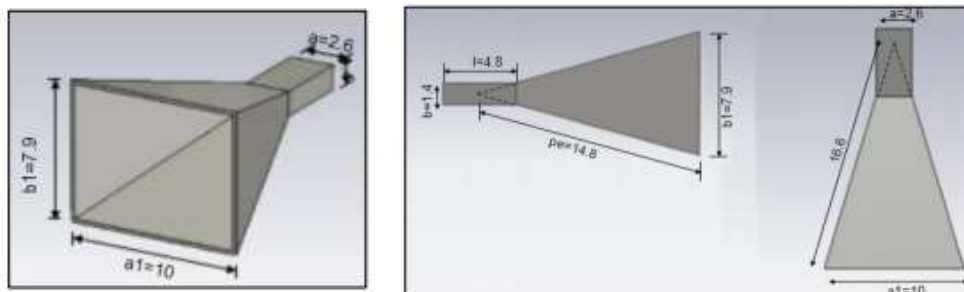
Nota. La figura representa los dimensiones de la bocina sectorial del plano H, (Espinosa, 2017).

Bocina Piramidal

Tabla 6*Características de la Bocina Piramidal*

Características	
Ancho de banda	8.2 – 12.4 GHz
Espesor	2 mm
Dimensiones de apertura pared ancha a1	10 cm
Dimensiones de apertura pared angosta b1	7.9 cm
Guía de onda de pared ancha a	2.6 cm
Guía de onda de la pared angosta b	1.4 cm
Longitud de la guía de onda l	4.8 cm

Nota. Esta tabla muestra las características de la bocina piramidal, (Espinosa, 2017).

Figura 33*Bocina Piramidal*

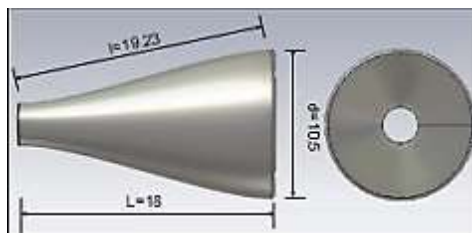
Nota. La figura representa los dimensiones de la bocina piramidal, (Espinosa, 2017).

Bocina Cónica

Tabla 7*Características de la Bocina Cónica*

Características	
Ancho de banda	8.2 – 12.4 GHz
Diámetro de apertura	10.5 mm
Longitud L	18 cm
Longitud l	19.23 cm
Perímetro de la circunferencia	32.28 cm

Nota. Esta tabla muestra las características de la bocina cónica, (Espinosa, 2017).

Figura 34*Bocina Cónica*

Nota. La figura representa los dimensiones de la bocina cónica, (Espinosa, 2017).

Microstrip Patch X Band

Tabla 8

Características de la Microstrip Patch

Características	
Ancho de banda	10.5 + 0.1 GHz
S11	> 10dB

Nota. Esta tabla muestra las características de la antena microstrip patch del sistema MAT20,(Aulestia & Omarza, 2012).

Figura 35

Microstrip Patch X Band



Nota. La figura representa la antena microstrip patch del sistema MAT20, (Aulestia & Omarza, 2012).

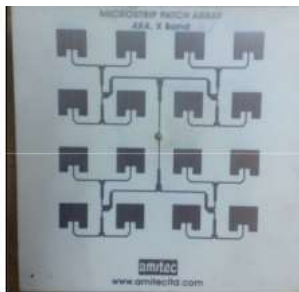
Microstrip Patch Array 4X4

Tabla 9

Características de la Microstrip Patch Array 4x4

Características	
Ancho de banda	10.5 + 0.1 GHz
S11	> 10dB

Nota. Esta tabla muestra las características del arreglo de antenas patch microstrip 4x4 del sistema MAT20,(Aulestia & Omarza, 2012).

Figura 36*Microstrip Patch Array 4x4*

Nota. La figura representa el arreglo de antenas microstrip patch 4x4 del sistema MAT20, (Aulestia & Omarza, 2012).

Obtención de la longitud mínima para cumplir con la ecuación de campo lejano.

Una vez obtenida la dimensión máxima de la antena a prueba en este caso, la bocina cónica del Sistema MAT20, se procede a obtener la longitud mínima para cumplir con el criterio decampo lejano, denominada longitud de rango R y a determinar el rango de frecuencias de la cámara.

Ecuación de campo lejano

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (16)$$

Rango de frecuencia

Las frecuencias de la banda X se encuentran en el rango de 8 GHz a 12 GHz, mediante un análisis previo se pudo determinar que se podía abarcar un rango mayor de frecuencias incluyendo la banda X con las mismas dimensiones de la cámara, por lo tanto se optó a realizar el diseño de la cámara abarcado frecuencia desde los 2 GHz a 12 GHz, los cuales incluyen la banda X.

$$f_{max} = 12.4 \text{ GHz} \quad (17)$$

Longitud de onda

$$\lambda_{f_{max}} = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{12.4 \text{ GHz}} = 0.0242 \text{ m} \quad (18)$$

Región de campo lejano

El diámetro máximo seleccionado para la realización del diseño es el de la Bocina Cónica del Sistema MAT20, con el siguiente diámetro máximo.

$$D_{max} = 10.5 \text{ cm} = 0.105 \text{ m} \quad (\text{Bocina Cónica})$$

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (19)$$

$$R > \frac{2(0.105 \text{ m})^2}{0.0242 \text{ m}} \quad (20)$$

$$R > 0.911 \text{ m} \quad (21)$$

Se asignara un $R = 2.5 \text{ m}$ cumpliendo con las condiciones de campo lejano antes preestablecidas, y para poder obtener una apertura del diámetro máximo de la antena fuente acorde con las antenas disponibles en el sistema MAT20, cabe recalcar que la antena con el diámetro máximo es de $0,105 \text{ m}$, a continuación se detallara la obtención del diámetro de la antena fuente.

Cabe aclarar que con la longitud de rango de 2.5m , se puede realizar pruebas de antenas máximo con antenas de 0.17m a 12.4GHz , garantizando el criterio de campo lejano.

Determinación del diámetro máximo de la antena fuente donde el cono de amplificación se limita a 0.25 dB

$$d \leq 0.37 \frac{\lambda R}{D} \quad (22)$$

Donde

d = Diámetro de la antena fuente

D = Diámetro de la AUT (antena a prueba)

R = Longitud de rango

λ = Longitud de onda operativa

$$d \leq 0.37 \frac{(0.0242 \text{ m})(2.5 \text{ m})}{0.105 \text{ m}} \quad (23)$$

$$d \leq 0.21 \text{ m} \quad (24)$$

Con este valor garantizamos que la antena fuente o de trasmisión pueda tener un diámetro máximo de 21 cm, lo cual cumple con los valores máximos de apertura de las antenas del Sistema Microondas MAT20.

Obtención del rango elevado de la antena a prueba AUT o antena receptora.

$$h_r \geq 4D \quad (25)$$

$$h_r \geq 4(0.105 \text{ m}) \quad (26)$$

$$h_r \geq 0,42 \text{ m} \quad (27)$$

Para garantizar las condiciones antes mencionadas tanto la altura de la antena de la fuente o transmisión y la altura de la antena de la antena puesta a prueba AUT o recepción se les asigno las mismas alturas.

h_t = Altura de la antena fuente o transmisión

h_r = Altura de la antena AUT o recepción

$$h_t = h_r \quad (28)$$

$$h_t = 1.3 \text{ m} \quad (29)$$

Este valor permite obtener una mejor iluminación cónica y además disminuye las reflexiones, en ciertos casos es indispensable colocar el soporte con vallas para ir variando la altura y obtener menos reflexiones dependiendo del tipo de antena a prueba.

Determinación del ancho W efectivo de la cámara

Para garantizar un ancho efectivo de la cámara se debe cumplir el siguiente criterio.

$$W > \frac{R}{2} \quad (30)$$

Como se conoce R es la longitud de separación entre la antena de transmisión y recepción para garantizar que se cumpla la ecuación de campo lejano.

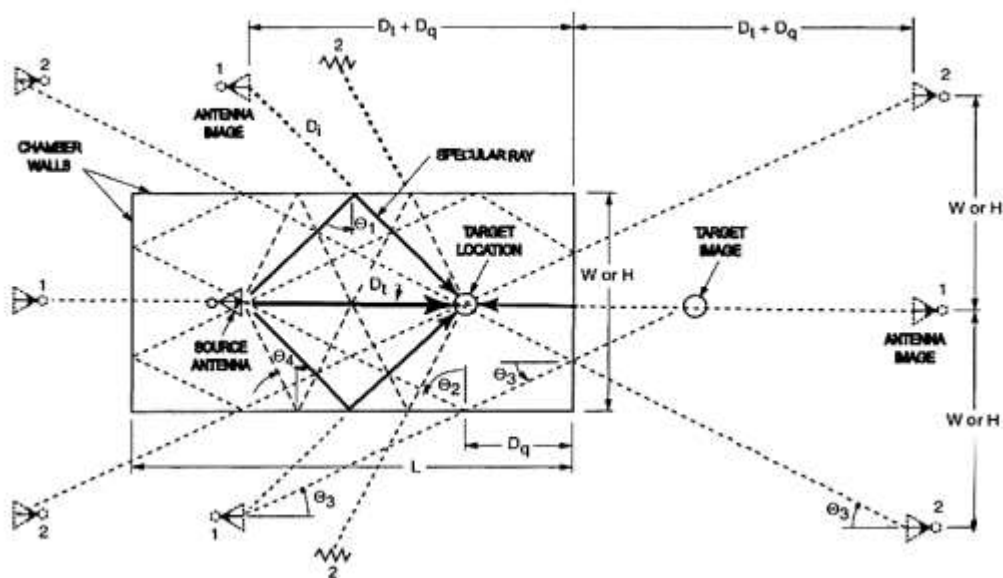
$$W > \frac{2.5 \text{ m}}{2} \quad (31)$$

$$W > 1.25 \text{ m} \quad (32)$$

Además de esta consideración, se debe analizar la teoría de trazado de rayos, permitiendo obtener la geometría óptica de la cámara.

Figura 37

Diseño de trazado de rayos cámara anecoica rectangular



Nota. La figura representa el diseño de trazado de rayos para una cámara rectangular, (Hemming, 2002).

Con esta consideración se llega a la conclusión que la relación de las dimensiones de la cámara debe ser tal que el ángulo de incidencia en las paredes adyacentes, el piso y el techo sea del orden de $< 60^\circ$.

En la Figura 37, se puede apreciar la teoría de trazado de rayos, identificando sus respectivos ángulos de incidencia formados por las reflexiones en las paredes laterales, techo y piso de la cámara en consecuencia, se puede obtener el ángulo θ_3 y respectivamente su complemento θ_2 , el cual es el ángulo de incidencia producido por la imagen de doble salto.

Mediante la utilización de razones trigonométrica, se obtiene el ángulo θ_3 de la Figura 37.

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{W}{D_t + 2D_q}\right) \quad (33)$$

Donde,

W = Ancho de la cámara

D_t = Longitud de rango entre la antena Tx y Rx, en este caso R.

D_q = Longitud entre la antena AUT o Rx, y la pared posterior.

Por lo tanto para garantizar que $W > \frac{R}{2}$, y que el ángulo de incidencia sea $< 60^\circ$.

Se asignó a W , el valor de 3.6 m, el cual permite garantizar las condiciones antes mencionadas, además se asignó el valor de $D_q = 1 \text{ m}$.

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{3.6 \text{ m}}{2.5 \text{ m} + 2(1.5 \text{ m})}\right) \quad (34)$$

$$\theta_3 = 38.65^\circ \quad (35)$$

Con lo cual se puede obtener en ángulo de incidencia θ_2 , el cual es complemento de θ_3 .

$$\theta_2 = 51.35^\circ \quad (36)$$

Con la obtención del ángulo de incidencia se puede obtener el material absorbente de las paredes laterales, techo y piso, debido a la incidencia que se produce en estas secciones es oblicua.

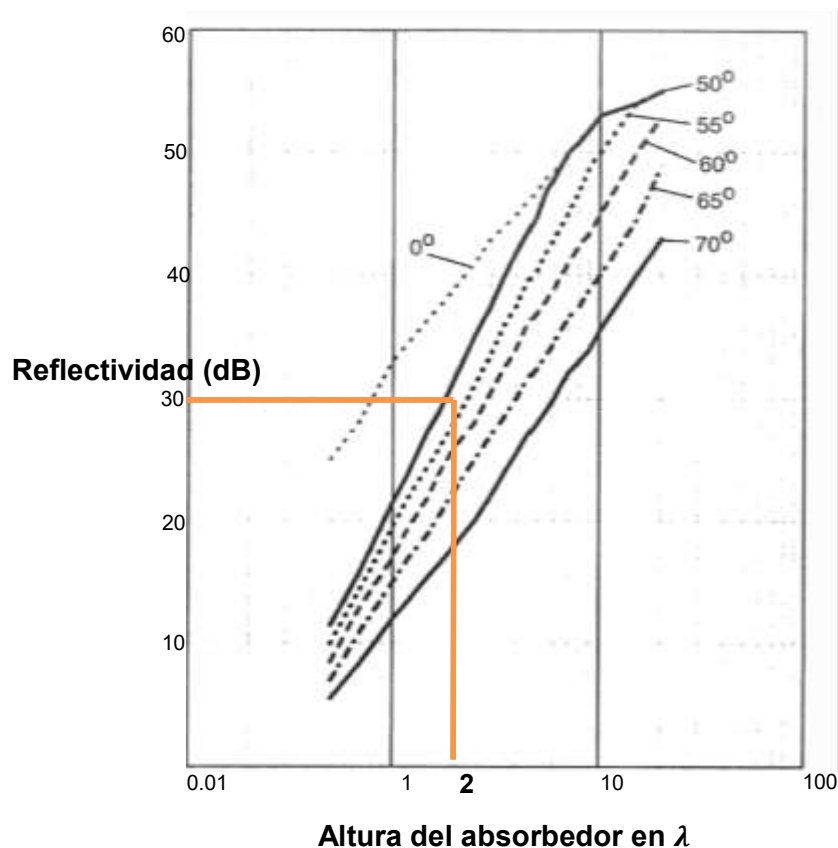
Determinación de las dimensiones del material absorbente de radiación (RAM), para las paredes laterales, techo y piso de la cámara.

Una vez obtenido el ángulo de incidencia θ_2 , podemos obtener una referencia de la altura del absorbedor piramidal, mediante la Figura 38, la cual representa los ángulos

de incidencia en función de la reflectividad en dB y la altura del absorbedor en λ , por lo tanto se desea garantizar una reflectividad de 30dB a la frecuencia mínima de funcionamiento de la cámara anecoica, y con un ángulo de incidencia de $\theta_2 = 51.35^\circ$.

Figura 38

Obtención de la altura del absorbedor para incidencia oblicua



Nota. La figura representa la obtención de la altura de estructura piramidal en λ para un rendimiento de absorción de 30dB en incidencia oblicua.

Para una absorción de onda de 30dB a la frecuencia mínima de 2 GHz, se obtiene la siguiente altura referencial del absorbedor piramidal.

Frecuencia mínima

$$f_{min} = 2 \text{ GHz}$$

(37)

Longitud de onda

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2 \text{ GHz}} = 0.15 \text{ m} \quad (38)$$

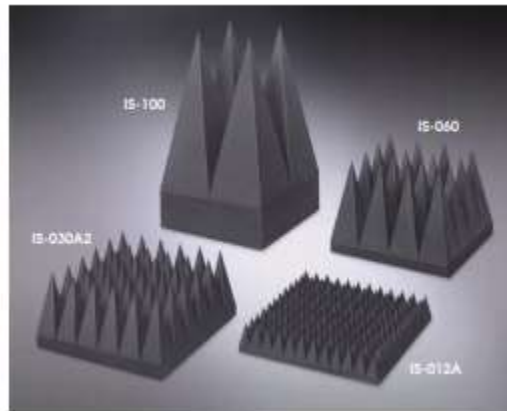
Altura referencial del absorbedor para incidencia oblicua

$$2\lambda = 2(0.15) = 0.30 \text{ m} \quad (39)$$

En este caso el material absorbente de radiación, por sus siglas en ingles RAM, se utilizara en forma piramidal, en este caso se usara productos de la empresa TDK, la serie IS – 30A2.

Figura 39

Absorbente piramidal TDK serie IS



Nota. La figura representa los absorbentes piramidales de la empresa TDK (TDK, 2013).

Absorbente Piramidal IS -30A2

Absorbente electromagnético piramidal de 30 cm de longitud. Entrega excelente rendimiento de absorción electromagnética en una amplia banda entre 0,8 y 110 GHz.

Es ideal para aplicaciones en una amplia gama de dispositivos inalámbricos, aplicaciones de acceso y cámaras anecoicas de microondas para conducción de pruebas relacionadas con teléfonos móviles (TDK, 2013).

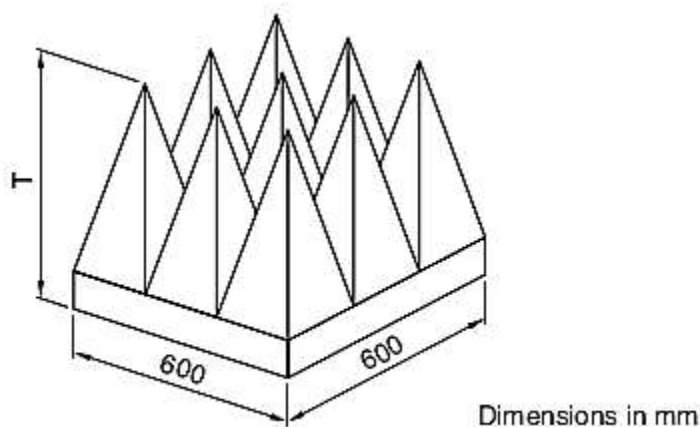
Características:

- Absorbente electromagnético de banda ultra ancha.
- Excelente rendimiento de absorción electromagnética en ondas milimétricas.
- La punta está diseñada para reducir la fluencia y ofrecer un rendimiento estable.
- Estable contra los productos químicos y ofrece una larga vida útil.
- Utiliza materiales inofensivos para los humanos al encontrarse inflamados.
- Retardante de fuego (NRL Clases 1, 2 y 3; UL-94HBF).

Forma y Dimensiones

Figura 40

Dimensiones del absorbente piramidal TDK serie IS



Nota. La figura representa los absorbentes piramidales de la empresa TDK (TDK, 2013).

Tabla 10*Características típicas de absorción IS-30A2*

SERIE	0.1 GHz	0.3 GHz	0.5 GHz	0.8 GHz	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz	30 GHz	50 GHz
IS-030A2	-	-	-	30	35	45	50	55	55	55

Nota. Esta tabla muestra las características típicas de absorción del absorbente piramidal IS-030A2 de la empresa TDK,(TDK, 2013).

Tabla 11*Características del absorbente IS-030A2*

Serie	Longitud (mm)	Peso estándar (kg)	Número de pirámides
IS-030A2	300	3.3	6 filas x 6 filas = 36

Nota. Esta tabla muestra las características básicas del absorbente piramidal IS-030A2 de la empresa TDK,(TDK, 2013).

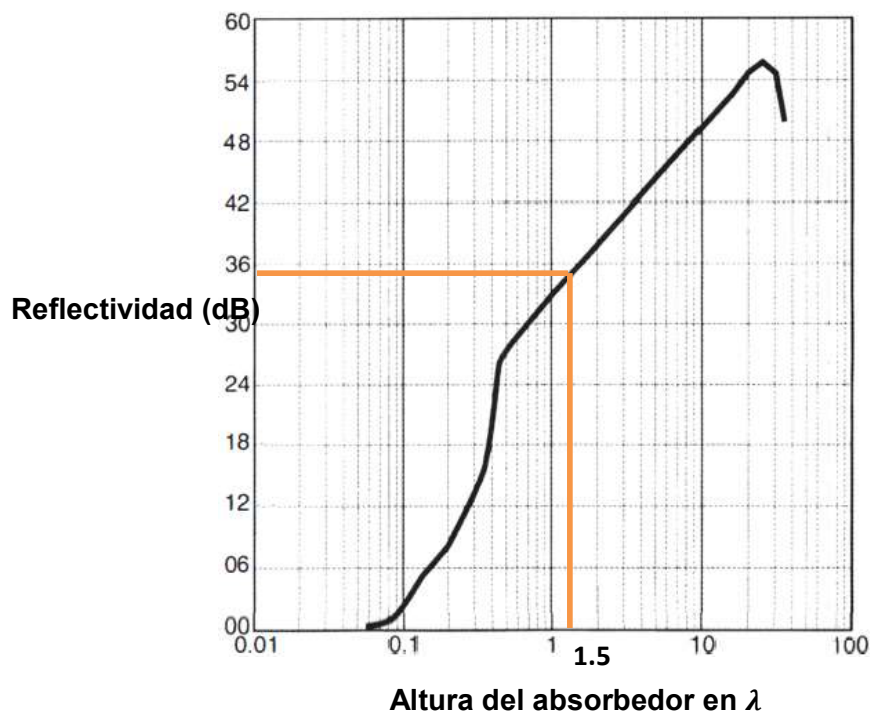
Dada las consideraciones expuestas en esta sección, se recomienda utilizar IS-030A2, el cual cuenta con una altura total de 30cm, garantizando la reflectividad deseada de 30 dB a 2 GHz, como se puede observar en la Tabla 10, el material absorbente cumple con las condiciones garantizando aproximadamente 40dB a 2GHz.

Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para las paredes posteriores a las antenas.

Para las paredes posteriores de las antenas, la incidencia es normal debido a que la antena se encuentra paralela a la pared posterior, por lo tanto se utiliza la siguiente figura para determinar, las dimensiones de los absorbentes en las paredes posteriores de la cámara.

Figura 41

Obtención de la altura del absorbente para incidencia normal



Nota. La figura representa la obtención de la longitud de onda para un rendimiento de absorción de -35dB en incidencia oblicua.

Para el diseño de la cámara, la reflectividad en las paredes debe estar en el rango de -30dB a -40dB , esto permitirá que la incertidumbre de la medida se encuentre en los parámetros correspondientes, y asemejara al espacio libre.

Para 35dB a 2 GHz , la cual es la frecuencia mínima, mediante la Figura 41 se obtiene una altura del absorbente de 1.5 longitudes de onda.

Frecuencia mínima

$$f_{\min} = 2\text{ GHz} \quad (40)$$

Longitud de onda

$$\lambda = 0.15\text{ m} \quad (41)$$

Altura del absorbente de las paredes posteriores de las antenas

$$1.5\lambda = 1.5(0.15) = 0.225 \text{ m} \quad (42)$$

Considerando lo expuesto anteriormente, se seleccionara el absorbente piramidal TCK IS-023A, el cual cuenta con una longitud de 0.23m, lo cual garantiza una reflectividad de 35 dB.

Adicionalmente se considera que la pared posterior de la antena fuente puede ser la mitad de la altura de la pared posterior de la antena a prueba o recepción. Por lo tanto en este caso se utilizara la TCK IS-015A, esto permitirá reducir costos, obteniendo la misma efectividad en las mediciones.

Tabla 12

Características típicas de absorción IS-015A e IS-023A

SERIE	0.1 GHz	0.3 GHz	0.5 GHz	0.8 GHz	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz	30 GHz	50 GHz
IS-015A	-	-	-	20	20	35	40	55	55	55
IS-023A	-	-	-	23	30	45	50	55	55	55

Nota. Esta tabla muestra las características típicas de absorción de los absorbente piramidal IS-015 y IS-023 de la empresa TDK,(TDK, 2013).

Tabla 13

Características del absorbente IS-015A e IS-023A

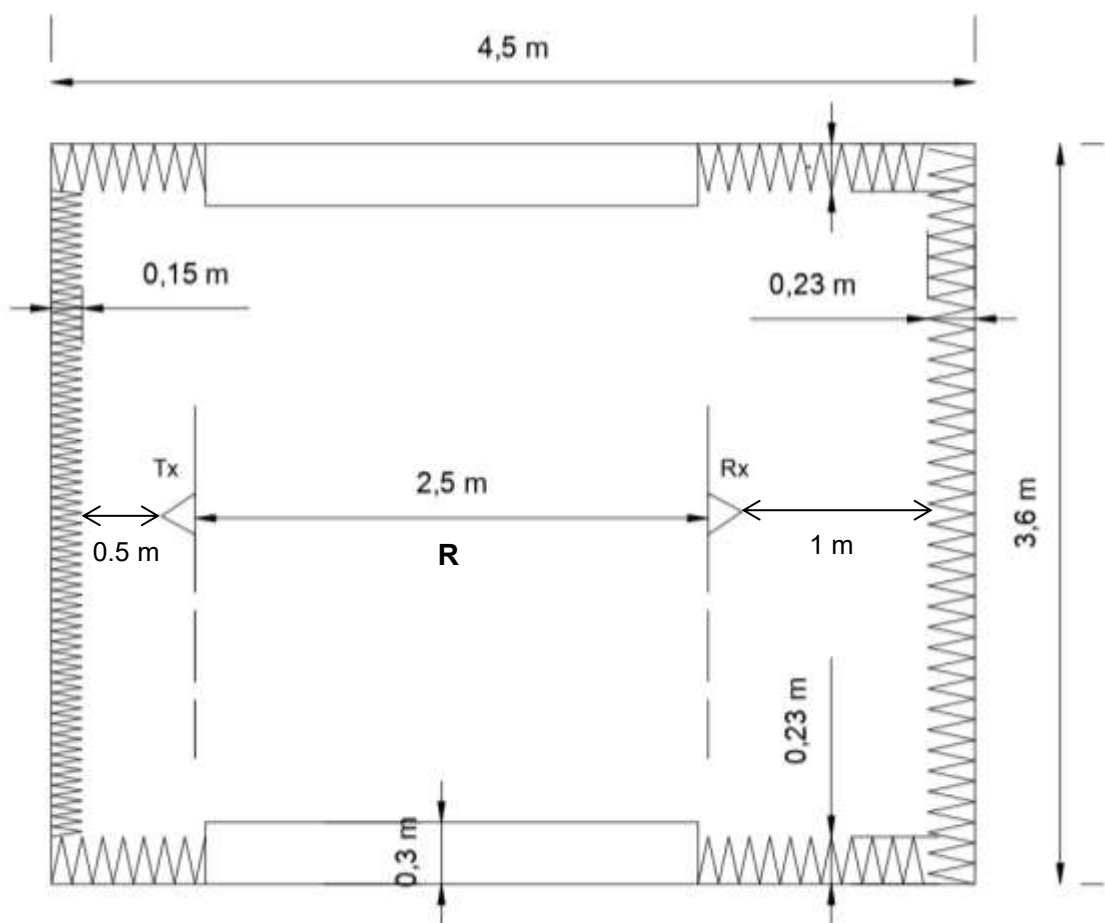
Serie	Longitud (mm)	Peso estándar (kg)	Número de pirámides
IS-015A	150	2.2	15 filas x 15 filas = 225
IS-023	230	3	8 filas x 8 filas = 64

Nota. Esta tabla muestra las características básicas del absorbente piramidal IS-015 y IS-023 de la empresa TDK,(TDK, 2013).

Las dimensiones óptimas de la cámara son 3.6m de ancho, 4.5m de largo y 3m de altura, como muestra en la figura a continuación.

Figura 42

Dimensiones óptimas de la cámara anecoica rectangular banda X



Nota. La figura representa las dimensiones óptimas de la cámara anecoica rectangular, incluyendo las dimensiones de los absorbentes.

Análisis de la Zona de Fresnel

El área que debe ser cubierta con el absorbente de mejor rendimiento, debe ser el área especular, donde existe una mayor cantidad de ondas incidentes, para poder

eliminar el mayor número de reflexiones. Por lo tanto se basara en el análisis de la zona de Fresnel para obtener el área con mayor índice de incidencia.

Las onda electromagnéticas que iluminan las superficies típicas de las cámaras se estudian en términos de “zonas de fase constante”, o zonas de Fresnel.

En consecuencia para realizar un análisis, se debe considerar las alturas de las antenas y la separación que existe entre las mismas para determinar el camino más corto que existe entre las dos antenas (Hemming, 2002).

$$R_{RD} = [R^2 + (h_r + h_t)^2]^{1/2} \quad (43)$$

La separación que existe entre las dos antenas se determinó con la ecuación de campo lejano, asignando el valor de 2.5 m, la distancia de separación entre la antena receptora y transmisora. De la misma manera se determinó las alturas de las antenas respecto al piso, asignándoles un valor de 1.3m. Con los valores antes mencionados procedemos a determinar la distancia más corta entre las dos antenas.

$$R_{RD} = [R^2 + (h_r + h_t)^2]^{1/2} \quad (44)$$

$$R_{RD} = [(2.5)^2 + (1.3 + 1.3)^2]^{1/2} \quad (45)$$

$$R_{RD} = 3.60m \quad (46)$$

Adicionalmente se determinara el ángulo rasante (angle grazing), el cual es el complemento de 90 grados al ángulo de incidencia, para definir el punto de reflexión especular considerado el centro de la región de fase constante.

$$\varphi = \tan^{-1}[(h_r + h_t)/R] \quad (47)$$

$$\varphi = \tan^{-1}[(1.3 + 1.3)/2.5] \quad (48)$$

$$\varphi = 46.12^\circ \quad (49)$$

Para definir la distancia o camino entre las dos antenas considerando un punto dado en el área especular, se establecerá coordenadas de referencia como se muestra en la siguiente figura, definiendo cualquier punto (o, y, z) en la superficie.

$$R_R = [h_t^2 + y^2 + z^2]^{1/2} + [h_r^2 + y^2 + (R - z)^2]^{1/2} \quad (50)$$

Como se conoce la distancia $R_R > R_{RD}$, por lo tanto la fase de un rayo que viaja a lo largo del camino R_R se retrasara con respecto al de rayo que viaje a lo largo de R_{RD} por Δ_ϕ radianes:

$$\Delta_\phi = 2\pi/\lambda(R_R - R_{RD}) \quad (51)$$

Por definición para cualquier punto (o, y_i, z_i) en la superficie el desfase se encuentra dado por la siguiente función:

$$\Delta_{\phi_i} = N\pi, N = 1, 2, 3 \dots \quad (52)$$

O respectivamente se lo puede definir de la siguiente manera, para determinar el limite exterior de la enésima zona de Fresnel.

$$R_{Ri} - R_{RD} = N\lambda/2 \quad (53)$$

El límite interior de la enésima zona de Fresnel se encuentra dado por:

$$R_{Ri} - R_{RD} = (N - 1)\lambda/2 \quad (54)$$

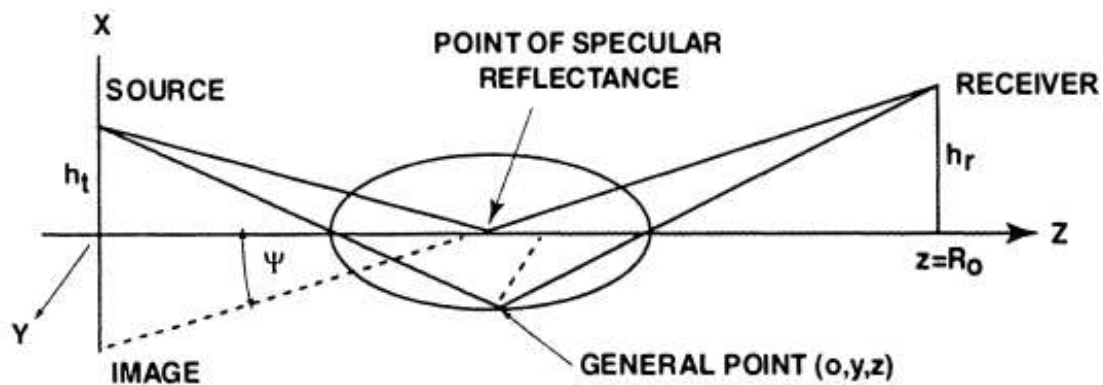
Las definiciones anteriormente planteadas, nos permiten deducir que la energía que llega a los puntos de prueba desde el límite exterior se encuentra retrasada por π radianes respecto a la energía que llega desde el límite interior de la zona de Fresnel (Hemming, 2002).

Para el diseño de una cámara anecoica es necesario definir los bordes exteriores de la zona de Fresnel, tanto el centro, el ancho y la longitud. Estos parámetros se los puede determinar de la siguiente manera, rescribiendo las ecuaciones anteriores para las dimensiones de la cámara anecoica.

$$[h_t^2 + y^2 + z^2]^{1/2} + [h_r^2 + y^2 + (R - z)^2]^{1/2} - [R^2 + (h_r + h_t)^2]^{1/2} = N\lambda/2 \quad (55)$$

Figura 43

Límites de la zona de Fresnel en una superficie plana



Nota. La figura representa los límites de la zona de Fresnel en una superficie plana de la cámara anecoica rectangular, (Hemming, 2002) .

La expresión anteriormente definida muestra que los sucesivos límites exteriores de las zonas de Fresnel que se encuentra sobre una superficie plana de la cámara, representa un conjunto de elipses en expansión cuyo eje principal se encuentra a lo

largo del eje de la cámara longitudinal (Hemming, 2002). Se puede resolver la expresión mediante un análisis algebraico dando como resultado las siguientes funciones:

$$F_1 = (N\lambda/2R + \sec(\varphi)) \quad (56)$$

$$F_2 = (h_r^2 - h_t^2) / [(F_1^2 - 1)R^2] \quad (57)$$

$$F_3 = (h_r^2 + h_t^2) / [(F_1^2 - 1)R^2] \quad (58)$$

Para obtener los resultados de las expresiones detalladas anteriormente, se asignara a N=6 considerando que es el mínimo número de la zona de Fresnel, que puede satisfacer una buena reflectividad en una cámara anecoica. Adicionalmente se debe considerar la longitud de onda de la frecuencia mínima 2 GHz.

$$\lambda_{2GHz} = 0.15m \quad (59)$$

$$F_1 = (N\lambda/2R + \sec(\varphi)) \quad (60)$$

$$F_1 = (6(0.15)/2(2.5) + \sec(46.12)) \quad (61)$$

$$F_1 = 1.62 \quad (62)$$

$$F_2 = (h_r^2 - h_t^2) / [(F_1^2 - 1)R^2] \quad (63)$$

$$F_2 = (1.3^2 - 1.3^2) / [(1.62^2 - 1)2.5^2] \quad (64)$$

$$F_2 = 0 \quad (65)$$

$$F_3 = (h_r^2 + h_t^2) / [(F_1^2 - 1)R^2] \quad (66)$$

$$F_3 = (1.3^2 + 1.3^2) / [1.62^2 - 1)2.5^2] \quad (67)$$

$$F_3 = 0.33 \quad (68)$$

Por lo tanto con los valores obtenidos, los cuales son valores adimensionales, se puede demostrar que las siguientes expresiones, nos dan como resultado el centro, el ancho y el largo de la zona de Fresnel para la n -ésima zona de Fresnel, en este caso $N=6$.

$$\text{Centro: } C_N = R(1 - F_2)/2 \quad (69)$$

$$\text{Largo: } L_N = RF_1(1 + F_2^2 - 2F_3)^{1/2} \quad (70)$$

$$\text{Ancho: } W_N = R[(F_1^2 - 1)(1 + F_2^2 - 2F_3)]^{1/2} \quad (71)$$

Reemplazando los valores obtenidos en las anteriores expresiones obtenemos:

El centro del área especular, el cual se encuentra medido desde la base de la antena de transmisión

$$C_N = R(1 - F_2)/2 \quad (72)$$

$$C_N = 2.5(1 - 0)/2 \quad (73)$$

$$C_N = 1.25m \quad (74)$$

El largo del área especular

$$L_N = RF_1(1 + F_2^2 - 2F_3)^{1/2} \quad (75)$$

$$L_N = 2.5 \times 1.62(1 + 0 - 2 \times 0.33)^{1/2} \quad (76)$$

$$L_N = 2.36m \quad (77)$$

El ancho del área especular

$$W_N = R[(F_1^2 - 1)(1 + F_2^2 - 2F_3)]^{1/2} \quad (78)$$

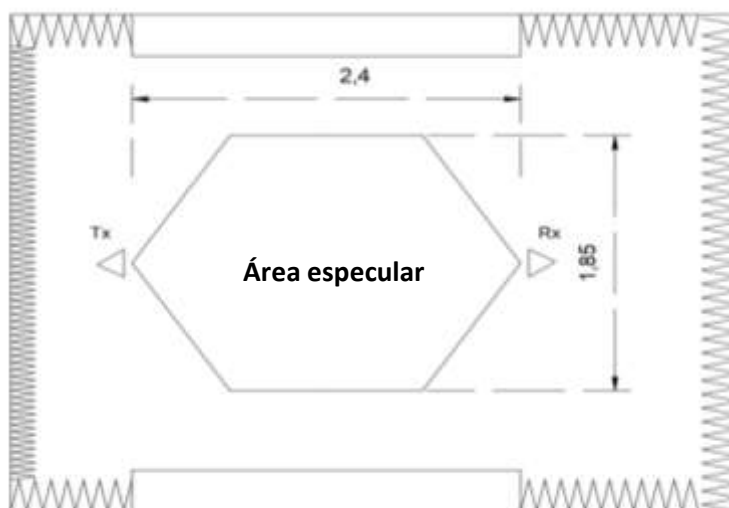
$$W_N = (2.5)[(1.62^2 - 1)(1 + 0 - 2 \times 0.33)]^{1/2} \quad (79)$$

$$W_N = 1.85m \quad (80)$$

Los valores obtenidos nos pueden dar una idea las dimensiones del área especular, pero esto no garantiza una exactitud, debido a que para realizar este análisis se planteó una superficie plana y las longitudes de onda para frecuencias de microonda no satisfacen las condiciones geométricas.

Figura 44

Dimensiones del área especular de la cámara anecoica rectangular



Diseño de los elementos complementarios de la cámara anecoica

Blindaje

El blindaje de la cámara será de tipo prefabricado, debido a que se desea implementar en los laboratorios de Antenas y Electromagnetismo de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", facilitando de esta forma la instalación.

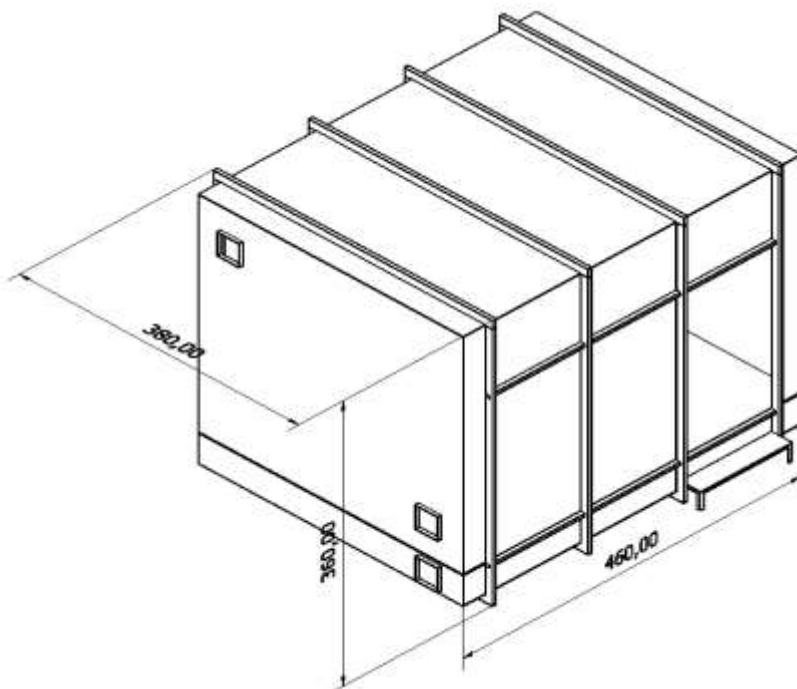
Se utilizará tableros de madera contrachapada de 4mm de espesor y recubierto con planchas de acero galvanizado de 3mm de espesor.

Se encuentra soportado mediante un marco de acero estructural, diseñado por vigas de acero inoxidable son de 100x50x3mm x 6m.

Las dimensiones externas del blindaje incluyendo las vigas de acero son de 4.60m de ancho, 3.80m de largo y 3.60m de alto.

Figura 45

Dimensiones del blindaje de la cámara anecoica rectangular



Nota. La figura representa las dimensiones del blindaje de la cámara anecoica incluido las vigas en su estructura en cm.

Puerta

La puerta se diseñara en base a las especificaciones del fabricante TDK, el cual cuenta con una amplia gama de puertas blindadas RF, eligiendo el modelo RCM-154, el cual cuenta con dimensiones 1.20m x 2.1m, con un rendimiento de 100dB.

La puerta se ubicara en la parte lateral de la cámara como se muestra a continuación.

Figura 46

Área de la puerta blindada en la cámara anecoica



Nota. La figura representa el área donde se colocara la puerta blindada con sus respectivas dimensiones

Piso Flotante

Se utilizara un piso flotante, con una altura de 400mm desde la losa de concreto, el cual consiste en un sistema módulos, con un grosor de 38mm y tamaño de 600mm x 600mm, permitiendo de esta manera una mejor canalización entre el exterior y las antenas de recepción y trasmisión. El piso flotante es capaz de soportar una carga de 500kg/m².

Figura 47

Vista preliminar del piso flotante en la cámara anecoica



Nota. La figura representa una vista preliminar del área del piso flotante con su respectiva altura con respecto al piso de concreto.

Panel de penetración

Se utilizara panel de penetración de 300mm x 300 mm de la empresa Raymond RF, los cuales permiten montar conectores de RF, como cables de alimentación de RF coaxiales, filtros y tuberías de guías de onda sin alterar el blindaje de la cámara anecoica.

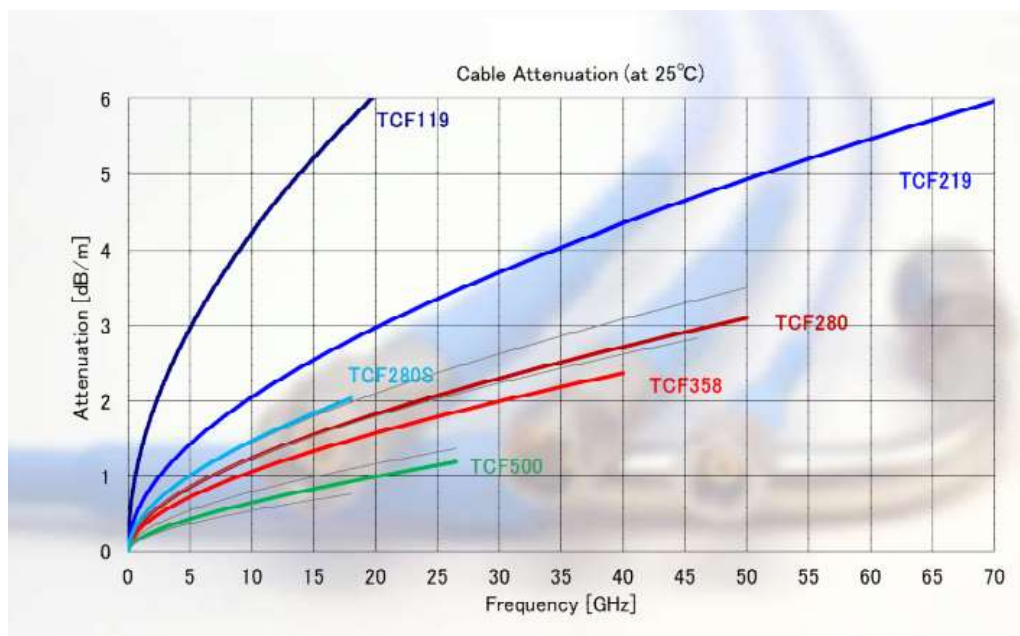
Se ubicaran dos paneles de penetración tanto en la pared frontal y posterior para ingresar cableado de datos y alimentación hacia la antena trasmisora y receptora.

Cables de RF

Para envío de señales de microondas dentro y fuera de la cámara anecoica, se utilizara cable coaxial flexible de la empresa TOTUKU Electronic, serie TCF 500, con atenuaciones máximas de 1dB/m, en el rango de 2GHz a 12GHz.

Figura 48

Atenuación de los cables coaxiales TOTUKU Electronic



Nota. La figura representa las atenuaciones de los cables de la empresa TOTUKU Electronic.

La serie TCF500 de color verde en la Figura 48, se seleccionó para la implementación en la cámara anecoica debido a sus características y su atenuación baja en el rango de frecuencias deseado.

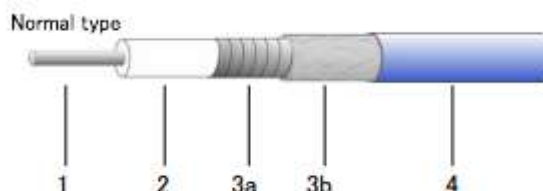
Características:

- Cable coaxial flexible
- Conversión de enchufe a jack o viceversa
- Atenuación bajas
- Estabilidad de la fase sólida sobre la temperatura y la flexión

- Transmisión de señales digitales de alta velocidad

Figura 49

Estructura del cable coaxial TOTUKU Electronic



Nota. La figura representa la estructura del cable coaxial 1: conductor interno, 2: aislamiento, 3: Conductor externo, 4: Jacket (Recubrimiento exterior).

Tabla 14

Características electrónicas del cable coaxial

Serie	Impedancia característica (Ω)	Capacitancia (pF/m)	Tiempo de retardo (ns/m)
TCF500	50	2.2	4.3

Nota. Esta tabla muestra las características electrónicas del cable coaxial de la empresa TOTOKI ELECTRIC serie TCF500.

Tanto para transmisión y recepción de señal se necesitara 8m de cable TCF500, cubriendo la superficie interna y externa de la cámara entre el transmisor y receptor hacia sus respectivas antenas.

Conectores de RF

Los conectores SMA de la empresa Linx Technologies son conectores coaxiales de alto rendimiento con una impedancia característica de 50 ohmios y con pérdidas de inserción tan baja de 0.17dB a 18 GHz. Estructura diseñada de níquel u oro.

Características:

- Acoplamiento tipo rosca (minimiza reflejos y atenuaciones)
- Alta durabilidad
- Bajo VSWR

Tabla 15*Características electrónicas del conector SMA*

Serie	Impedancia característica (Ω)	Rango de frecuencia	Perdidas de inserción
SMA001	50	0 – 18 GHz	$0.04dB \max \times \sqrt{f}GHz$

Nota. Esta tabla muestra las características electrónicas del conector SMA de la empresa Linx Technologies.

Sistema de ventilación

Se implementará 4 paneles de ventilación de la empresa Raymond RF con guía de ondas en forma de panel ubicado diagonalmente en cada esquina de las paredes posterior y frontal de la cámara, La celda en forma de panel tiene un grosor de 1/8 de pulgada, brindado un rendimiento de 100dB a 40GHz.

Figura 50

Vista preliminar de la ventilación y panel de penetración



Nota. La figura representa una vista preliminar del área de la ventilación y el panel de penetración.

Iluminación

Se instalará 2 dispositivos de iluminación LED TDK High Bay (HBLED-54), el cual cuenta con una gran eficiencia luminosa y bajo consumo de energía, adicionalmente cuenta con una baja carga térmica y no emite sustancias tóxicas.

Incluye un vidrio prismático, manteniendo máximos niveles de iluminación a lo largo de tiempo, contando con una larga vida útil.

- **Especificaciones ópticas**

Salida de luz: 18000 lúmenes (nominal)

Temperatura de color: 4000K

- **Especificaciones eléctricas**

Requisitos de energía: 120 -277 VCA

Consumo de energía: 155 W

Adicionalmente se debe incluir en la parte posterior al absorbente, canaletas metálicas para canalizar los cables hacia el piso flotante.

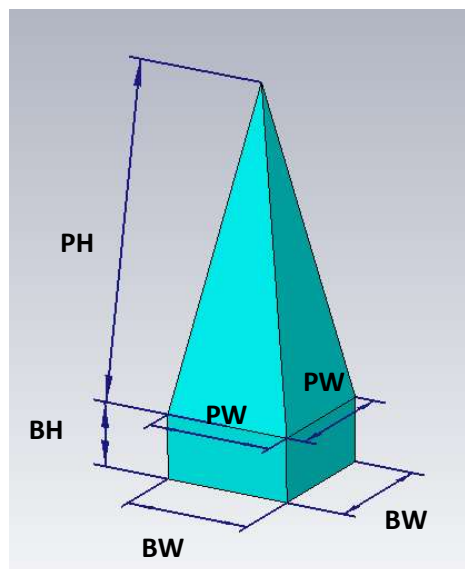
Modelamiento de las estructuras piramidales

Una vez obtenido las dimensiones de la cámara, las dimensiones del material absorbente tanto para la pared y techo, y la región especular.

Se procedió al modelamiento de cada una de las estructuras piramidales indispensables para el desarrollo de la cámara anecoica. Las estructuras piramidales se modelaran en base a los datasheets obtenidos de la empresa TCK Series IS, donde se dispone las tres estructuras piramidales, IS-030A2, IS -023A y IS – 015A, cada una con su altura establecida.

Figura 51

Modelamiento de un absorbente piramidal



Nota. La figura representa el modelamiento de un absorbente piramidal con sus respectivas dimensiones.

Tabla 16

Dimensiones de los absorbentes TDK IS-015A, IS-023A, IS-030A2

Serie	TDK IS – 015A	TDK IS – 023A	TDK IS – 030A2
Altura de la Base <i>BH</i>	2.5 cm	4 cm	5 cm
Altura de la Pirámide <i>PH</i>	12.5 cm	19 cm	25 cm
Ancho de la Base <i>BW</i>	4 cm	7.5 cm	10 cm
Ancho de la Pirámide <i>PW</i>	4 cm	7.5 cm	10 cm

Nota. Esta tabla muestra las dimensiones del absorbente TDK IS-015A , IS-023A e IS-030A2 de la empresa TDK,(TDK, 2013).

A continuación se detallara el proceso para el modelamiento de las pirámides con sus respectivas dimensiones.

1. Posteriormente a la instalación del software CST STUDIO SUITE, se procede a ejecutar el programa.
2. Inicializamos una nueva plantilla, escogemos el área de aplicación, en este caso “MICROWAVES & RF OPTICAL” y asignamos la opción “Antenas”.

Figura 52

Creación nueva plantilla CST STUDIO SUITE

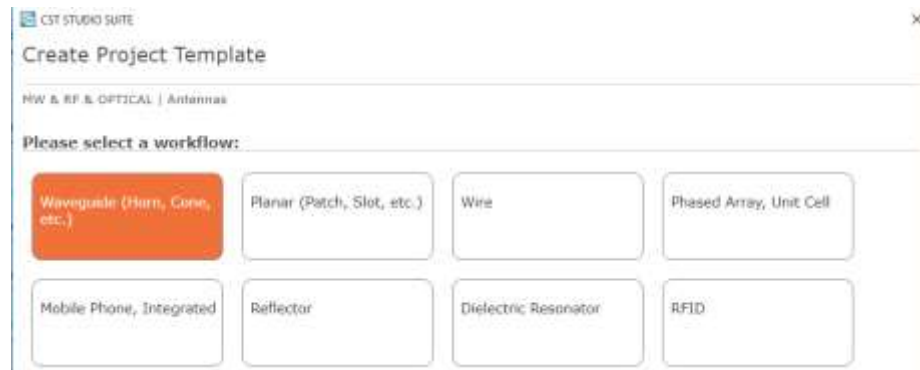


Nota. La figura representa la creación de una nueva plantilla, seleccionando la aplicación para microondas y radiofrecuencia.

3. A continuación se selecciona el flujo de trabajo, brindándonos diferentes opciones para el usuario, en este caso se utilizará “Guía de onda”

Figura 53

Flujo de trabajo de la plantilla CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la selección del flujo de trabajo “Guía de onda”.

4. Se seleccionará un tipo de solucionador o “solver”, en este caso se “dominio del tiempo”.

Figura 54

Solucionador de la plantilla CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la selección del solucionador en este caso se asignó “dominio del tiempo”

5. Posteriormente se especificará las unidades (dimensiones, frecuencia, tiempo, temperatura), mostradas a continuación en la Figura 55.

Figura 55

Unidades de la plantilla CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la selección de unidades del proyecto (Dimensiones, frecuencia, tiempo, etc.)

Seleccionamos las configuraciones del trabajo, en este caso se asignara la frecuencia mínima y máxima; y los monitores de campo.

Figura 56

Configuración de la plantilla CST STUDIO SUITE



Nota. La figura representa la selección del rango de frecuencia de trabajo.

- Finalmente asignamos un nombre al trabajo a diseñar y procedemos a generar la interfaz de diseño.

Figura 57

Detalle de la plantilla creada CST STUDIO SUITE



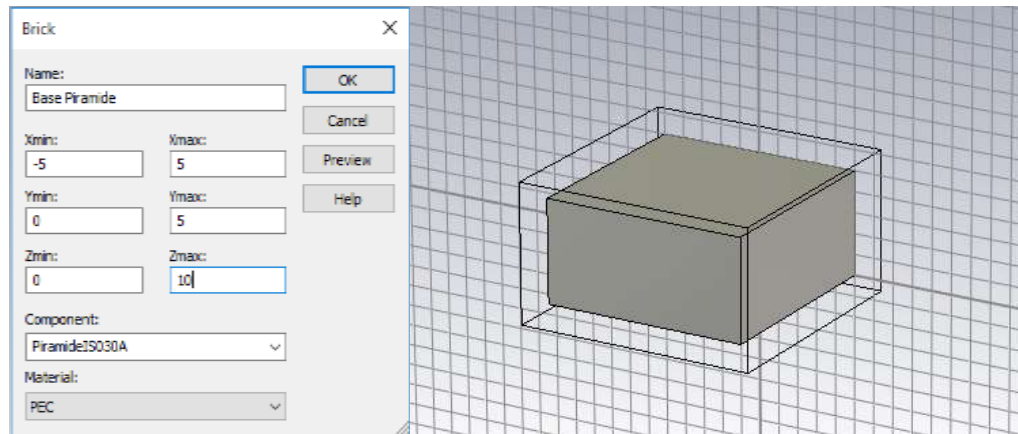
Nota. La figura representa el detalle de la plantilla con las especificaciones de las unidades y las configuraciones.

Modelamiento de la pirámide IS-030A2

- Procedemos a seleccionar la pestaña “Modeling” y seleccionamos la forma “Brick” o bloque, colocamos las dimensiones respectivas para el material absorbente IS-030A2 de la Tabla 16.
- Creamos la base de la pirámide, asignándole el componente PiramideIS030A2, donde se ordenara todas las partes de la estructura para su posterior unión.

Figura 58

Diseño de la base de la pirámide IS-030A2

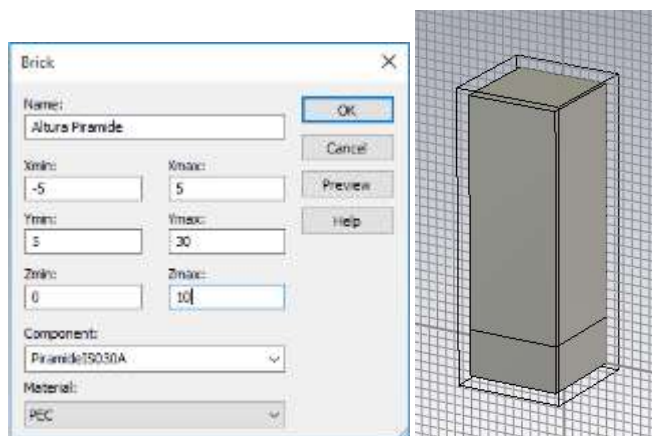


Nota. La figura representa el diseño de la base de la pirámide del material absorbente IS-030A2.

3. A continuación procedemos a crear la altura de la pirámide, de la misma manera creamos un bloque sobre la base antes diseñada, para posteriormente darle la forma piramidal.

Figura 59

Diseño de la altura de la pirámide IS-030A2

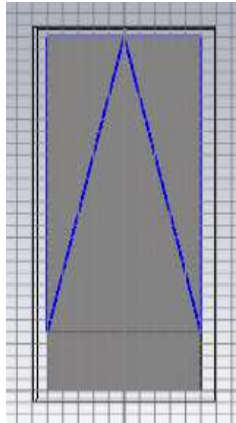


Nota. La figura representa el diseño de la altura de la pirámide del material absorbente IS-030A2.

4. Procedemos a crear un polígono para modelar la forma piramidal

Figura 60

Modelamiento de la forma piramidal

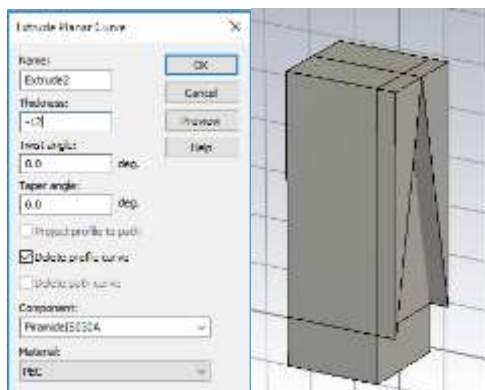


Nota. La figura representa el modelamiento de la forma piramidal mediante el diseño de polígonos.

5. Mediante la herramienta “Extrude Curve”, procedemos a crear estructuras a partir de los polígonos diseñados, en las dos caras del bloque para posteriormente suprimir.

Figura 61

Aplicación de la herramienta “extrude curve” a la estructura lateral

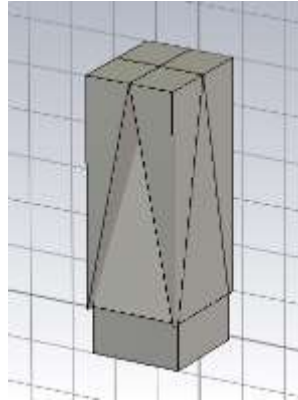


Nota. La figura representa la aplicación de la herramienta extrude curve para crear estructuras en base a los polígonos diseñados.

6. Procedemos a realizar “Extrude Curve” en las dos caras del bloque obteniendo una estructura similar a la mostrada en la Figura 62.

Figura 62

Aplicación de la herramienta “extrude curve” estructura total

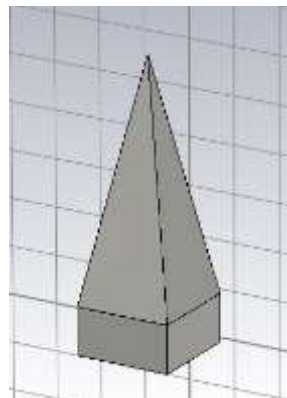


Nota. La figura representa la aplicación de la herramienta extrude curve en la estructura total, para obtener la forma piramidal.

7. Procedemos a utilizar la herramienta “Boolean”, seleccionando todas las estructuras sobrepuestas sobre el bloque diseñado para la altura de la pirámide y sustraemos con “Subtract” las estructuras sobrepuestas.

Figura 63

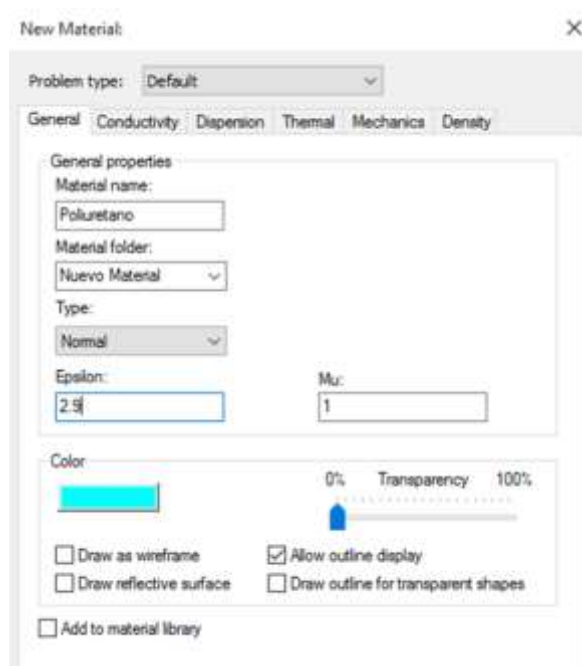
Diseño final de la estructura piramidal IS-030A



- Una vez obtenida la figura procedemos a unir la altura de la pirámide con la base formado una sola figura, utilizando la herramienta “Boolean Add”, y procedemos a seleccionar el material del componente. Para el diseño del material se basara en poliuretano, poliestireno o uretano. La constante dieléctrica promedio para este material es $\epsilon=2.9$. Por lo tanto en la pestaña “Modeling”, en la sección de materiales, creamos un nuevo material, seleccionando la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética y asignamos un color específico.

Figura 64

Creación del material poliuretano

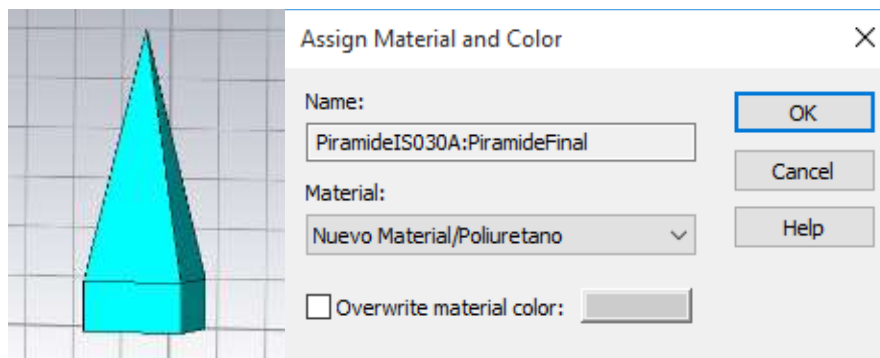


Nota. La figura representa la creación del material poliuretano con permitividad eléctrica $\epsilon = 2.9$ y permeabilidad magnética $\mu = 1$.

9. Procedemos asignar el material a la estructura piramidal

Figura 65

Asignación del material a la estructura piramidal

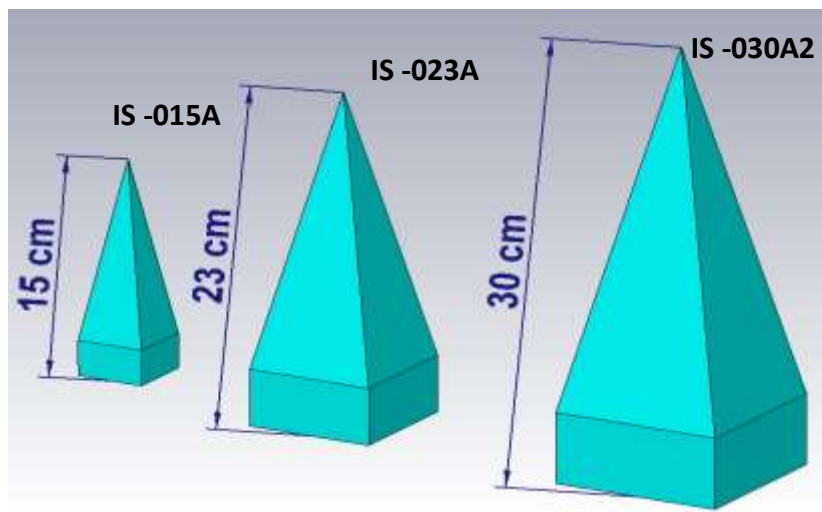


Nota. La figura representa la asignación del material a la estructura antes diseñada.

10. De la misma manera procedemos a realizar las dos pirámides IS-023A y la IS-015A.

Figura 66

Estructura piramidal IS-015A , IS-023A e IS-030A2



Nota. La figura representa las estructuras piramidales IS-015A, IS-023A e IS-030A2 diseñadas en el software CST STUDIO SUITE, con sus respectivas alturas.

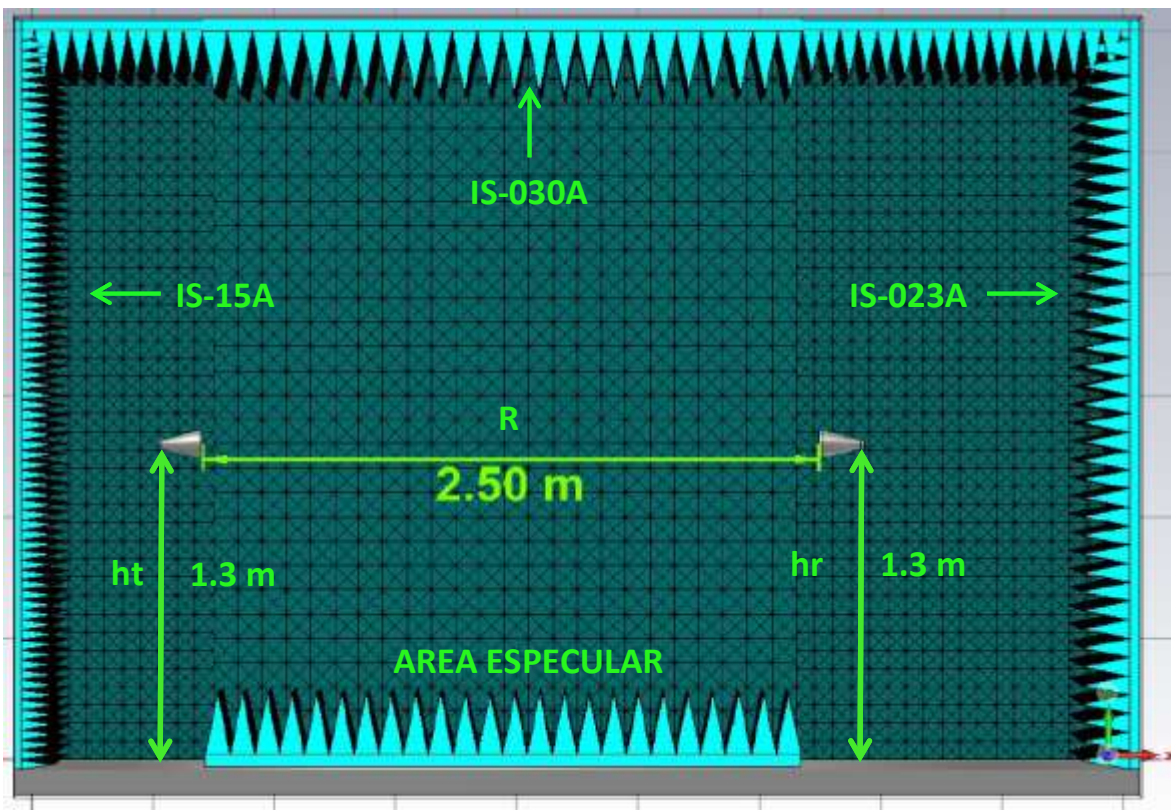
Modelamiento de las estructura de la cámara anecoica rectangular

Una vez obtenido todas las estructuras piramidales se procedió al modelamiento de la cámara anecoica, principalmente su estructura interna con sus respectivos absorbentes piramidales en las paredes laterales, techo y área especular, diseñados en el software CST STUDIO SUITE.

Las simulaciones de la cámara anecoica serán detalladas en el capítulo V con su respectivo análisis.

Figura 67

Estructura interna cámara anecoica



Nota. La figura representa la estructura interna de la cámara anecoica.

Tabla 17*Características de la cámara anecoica rectangular diseñada*

Característica	Detalle
	Configuración : Cámara rectangular
Construcción Cámara	Dimensiones : 4.5m x 3.6m x3 m Uso previsto: Medición de antenas
Blindaje	Madera contrachapada de 4mm de espesor recubierta con planchas de acero galvanizado de 3mm Pared posterior a TX : TDK IS - 015A Pared posterior a RX: TDK IS – 023A
Material Absorbente	Área especular : TDK IS – 030A Paredes laterales y techo : TDK IS- 023A y TDK IS-030A
Área especular	Dimensiones : 2.36 m x 1.85 m
Parámetros anecoicas	Diámetro mínimo de zona de quietud: 1.2 m Longitud de rango entre antena TX y RX : 2.5 m
Ancho de banda	Frecuencias: 2 GHz - 12.4 GHz

Nota. Esta tabla muestra las características de la cámara anecoica diseñada.

CAPITULO IV

DISEÑO DE LA CÁMARA ANECOICA ADAPTATIVA EN EL RANGO DE HF A UHF

Diseño de la cámara anecoica en el rango de HF a UHF.

Para el diseño de la cámara anecoica en el rango de HF a UHF, el cual se encuentra entre el rango de 3MHz a 3000 MHz, considerado frecuencias bajas, se deben considerar varios criterios antes del diseño.

Consideraciones de diseño

Primeramente el rango de frecuencias deseado es muy amplio, por lo tanto el material absorbente debe abarcar todo el rango de frecuencias con un rendimiento adecuado que garantice la absorción, permitiendo de esta manera que la cámara anecoica simule un espacio libre.

Adicionalmente como se consideró en el diseño de la cámara rectangular en el capítulo III, debe cumplir con la ecuación de campo lejano, en este caso el diámetro de las antenas en este rango de frecuencia tienden a ser más grandes, en consecuencia la longitud de rango R para cumplir con el campo lejano tiende a ser de mayor dimensión debido a que la longitud de rango es directamente proporcional al diámetro de la antena, por lo tanto una cámara rectangular para las frecuencias deseadas debe aumentar sus dimensiones significativamente.

Las antenas en este rango de frecuencias no son tan directivas a diferencia de las antenas para microondas, de modo que el material absorbente debe ser más grueso para absorber correctamente las ondas emitidas por la fuente.

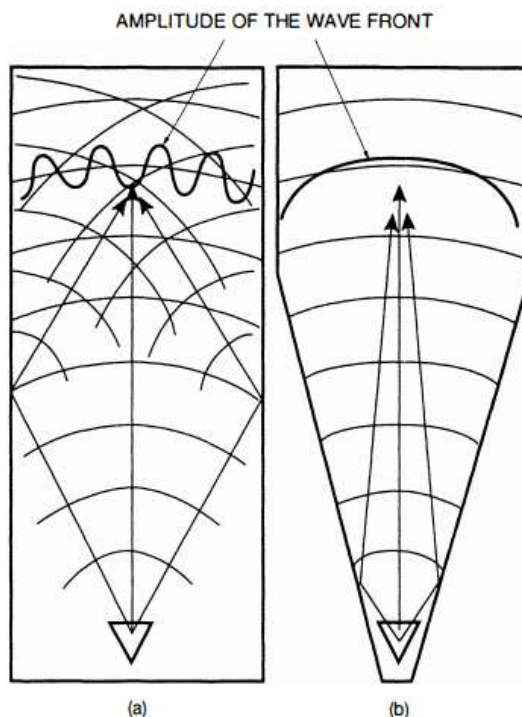
En base a lo antes mencionado, el diseño de una cámara rectangular no es óptimo debido a las dimensiones significativas, absorbentes más gruesos, lo cual abarcaría mayor costo y espacio en el diseño de la cámara.

La industria ha implementado nuevas técnicas de diseño en base a la geometría de la cámara para garantizar el mismo rendimiento, surgiendo el diseño de cámaras anecoicas ahusada o cónicas, mediante los reflejos especulares, los cuales no se eliminan, sino se utilizan para obtener una condición de campo lejano en la zona de quietud (Rodríguez, 2004).

La cámara ahusada permite simular un espacio cuasi libre, donde la geometría cónica coloca la región de prueba cerca de la antena fuente y las ondas electromagnéticas transmitidas en la zona de quietud son cuasi planas como se aprecia en la Figura 68 (b).

Figura 68

Iluminación de la zona de prueba



Nota. La figura representa la iluminación de la zona de prueba en (a) una cámara rectangular y (b) una cámara cónica (Hemming, 2002).

Para el diseño de la cámara ahusada o cónica nos basaremos en el análisis de (Hemming, 2002; Rodriguez, 2004).

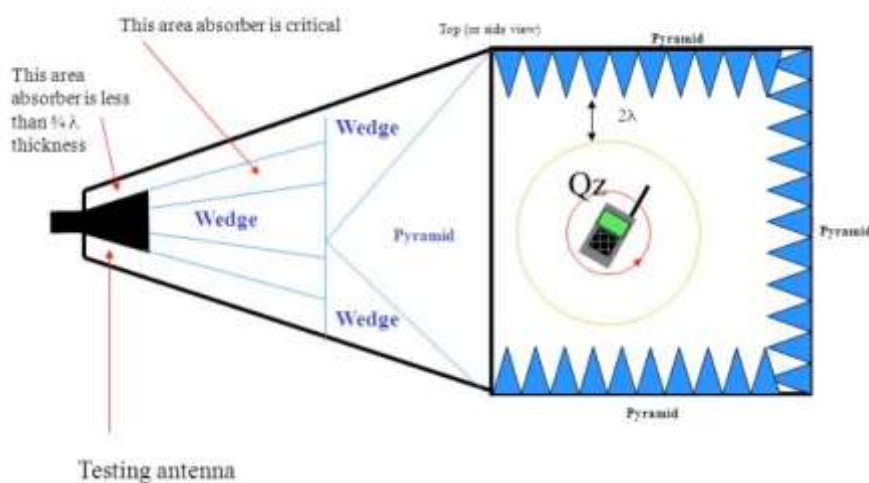
La cámara anecoica cónica se encuentra conformada por un área rectangular, y una sección cónica, con sus respectivos absorbedores, como se puede observar en la Figura 69.

Obtención del área rectangular de la cámara anecoica

Para determinar las dimensiones de la área rectangular se debe considerar la zona de quietud o Quiet Zone (QZ), el cual es el volumen donde cualquier energía reflejada de las paredes es mucho más baja que cualquiera de las características de interés sobre el patrón de radiación en este caso para garantizar que el funcionamiento se encuentre entre el rango de frecuencias de HF a UHF, se considerara una zona de quietud QZ igual o superior a 2m, debido a el diámetro de las antenas en este rango de frecuencias.

Figura 69

Característica de una cámara cónica



Nota. La figura representa las características básicas de una cámara cónica con su respectiva área rectangular y su sección cónica (Rodriguez et al., 2013).

Para obtener el área rectangular se considera que la altura y el ancho de la cámara son tres veces la zona de quietud considerada con mayor presión, por lo tanto el ancho es:

$$W > 3QZ \quad (81)$$

$$W > 3 \times 2 m = 6 m \quad (82)$$

También se puede obtener mediante la siguiente ecuación, la cual se puede apreciar de mejor manera en la Figura 69:

$$W > QZ + 4 \times \lambda_{f_{min}} + 2(\text{profundidad del absorbedor}) \quad (83)$$

En este caso se considerará un ancho, largo y altura de 6m cada uno en el área rectangular.

Obtención de la sección cónica o ahusada

Para el cálculo de la longitud de la sección cónica, nos basaremos en la siguiente ecuación, la cual se encuentra definida mediante un análisis matemático trigonométrico.

$$L = \frac{W/2}{\tan(\alpha/2)} \quad (84)$$

Donde

W = Ancho del área rectangular

α = Angulo de conicidad

Por lo tanto, para un correcto funcionamiento se recomienda usar un ángulo de conicidad menor a 36°, si se desea obtener una cobertura máxima de 6GHz y menos de

30° si se desea aumentar el rango de frecuencias hasta 18GHz, en este caso asumiremos un ángulo de conicidad de 35° cumpliendo con los criterios establecidos.

$$L = \frac{W/2}{\tan(\alpha/2)} \quad (85)$$

$$L = \frac{6/2}{\tan(35/2)} \quad (86)$$

$$L = 9.52 \text{ m} \quad (87)$$

La longitud de la sección cónica será de 9.55m, garantizado un acoplamiento entre la sección rectangular y la sección cónica.

Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para la pared posterior de la zona de quietud QZ.

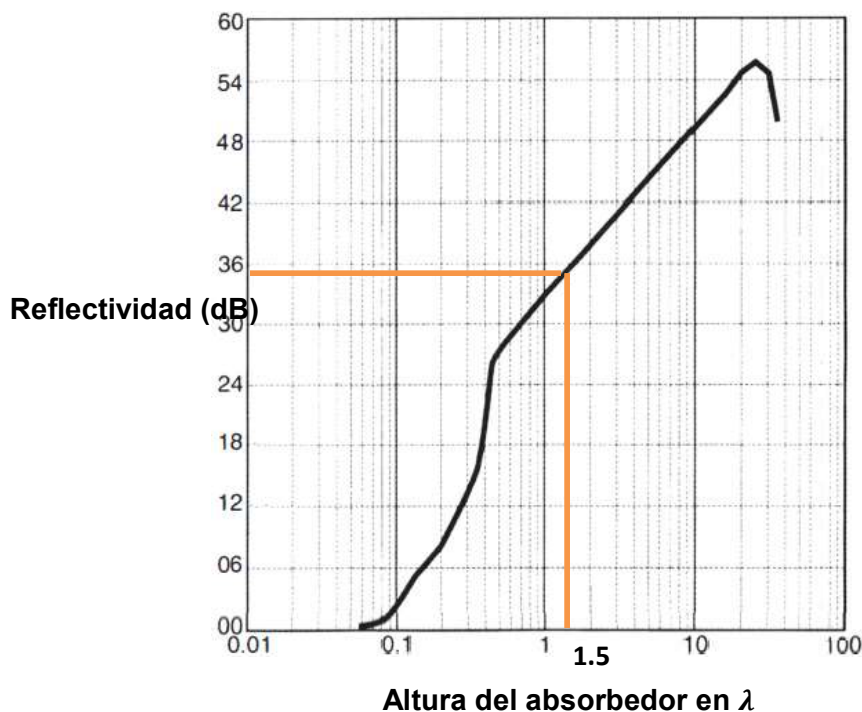
El nivel de QZ será determinado por la pared posterior de la sección rectangular, los materiales absorbentes en la industria, los podemos encontrar desde un rango mínimo de frecuencia de 30MHz, por lo tanto el rango de frecuencias de la cámara anecoica diseñada se encontrará en el rango de los 30MHz a los 3000MHz.

Para la pared posterior la incidencia producida es normal, por lo tanto para obtener un panorama más adecuado de la altura de material dispensable con las condiciones deseadas nos basaremos en la Figura 70.

Para el diseño de la cámara, la reflectividad en las paredes debe estar en el rango de $-30dB$ a $-40dB$, esto permitirá que la incertidumbre de la medida se encuentre en los parámetros correspondientes, y asemejara al espacio libre.

Figura 70

Obtención de la altura del absorbente para incidencia normal



Nota. La figura representa la obtención de la longitud de onda para un rendimiento de absorción de 35dB en incidencia oblicua.

Para un rendimiento de absorción de 35dB, mediante la Figura 70, obtenemos la altura referencial del absorbente con un valor de 1.5λ .

Seleccionaremos la frecuencia de referencia de 300MHz, la cual se encuentra entre la frecuencia máxima y mínima de funcionamiento, permitiendo obtener un material absorbente de acuerdo a las características del diseño.

Frecuencia de referencia

$$f_{min} = 300 \text{ MHz}$$

(88)

Longitud de onda

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{300 \text{ MHz}} = 1 \text{ m} \quad (89)$$

Altura del absorbente para incidencia normal

$$1.5\lambda = 1.5(1) = 1.5 \text{ m} \quad (90)$$

Por lo tanto para garantizar una reflectividad adecuada para el rango de diseño se considerara el material absorbente tipo cuña de la empresa ETS-LINDGREN EHP-72PCL, con una altura piramidal de 1.82 m el cual garantiza los siguientes valores de absorción.

Absorbente piramidal EHP – 72PCL

El absorbente piramidal tipo EHP (rendimiento extra alto) de ETS-Lindgren está diseñado para su uso en un amplio espectro de frecuencias y se ha utilizado como una herramienta eficaz para la reducción de reflejos de 30 MHz a 100 GHz. Se encuentra diseñado con espuma de uretano de la más alta calidad, y se impregna con un carbón conductor, garantizando una eficiencia de 20dB a 30MHz y 50dB a 3000MHz.

Figura 71

Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-72PCL



Nota. La figura representa el absorbente piramidal de la empresa ETS-LINDGREN EHP-72PCL, (ETS Lindgren, s. f.-a) .

Tabla 18*Características del absorbente EHP-72PCL*

Serie	Longitud (mm)	Peso estándar (kg)	Número de Pirámides
EHP-72PCL	1829	15.9	1

Nota. Esta tabla muestra las características básicas del absorbente piramidal de la empresa ETS-LINDGREN EHP-72PCL, (ETS Lindgren, s. f.-a).

Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para las paredes laterales, piso y techo del área rectangular

Para las paredes laterales y el techo se usara el material absorbente piramidal de la Empresa ETS-LINDGREN EHP-48PCL, con las siguientes características.

Absorbente piramidal EHP – 48PCL

El absorbente piramidal EHP-48PCL cumple con las mismas características del absorbente EHP -72PCL, con diferencia en su altura y sus niveles de absorción, en este caso se cuenta con niveles de absorción de 15dB a 30MHz Y 50dB a 3000MHz, como se muestra en la Figura 72.

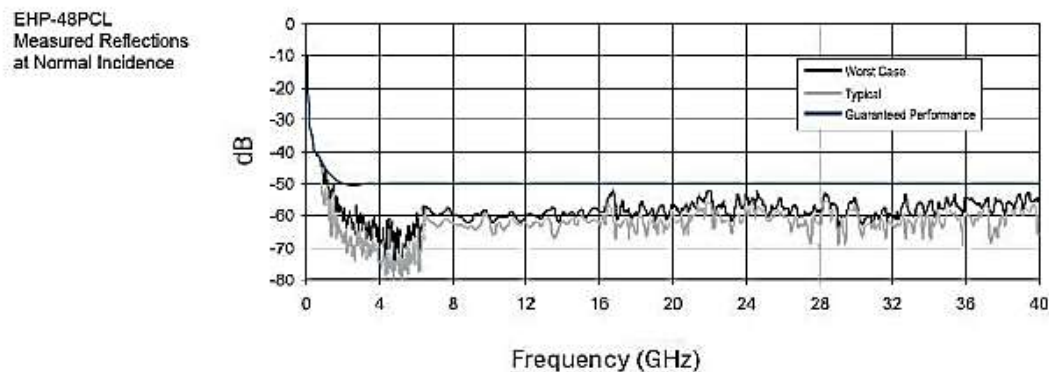
Tabla 19*Características del absorbente EHP-48PCL*

Serie	Longitud (mm)	Peso estándar (kg)	Número de Pirámides
EHP-48PCL	1219	11.3	4

Nota. Esta tabla muestra las características básicas del absorbente piramidal de la empresa ETS-LINDGREN EHP-48PCL, (ETS Lindgren, s. f.-a).

Figura 72

Características típicas de absorción ETS-LINDGREN EHP-48PCL

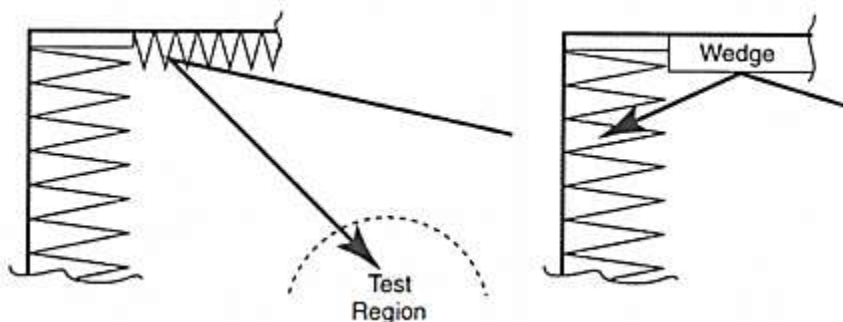


Nota. La figura representa las características típicas de absorción de ETS-LINDGREN EHP-48PCL, (ETS Lindgren, s. f.-a).

Asimismo se recomienda usar absorbente tipo cuña entre la pared trasera de la cámara y las paredes de laterales, debido a que puede existir el fenómeno de retrodispersión en las esquinas de la cámara debido a los reflejos de las pirámides laterales como se muestra en la Figura 73.

Figura 73

Retrodispersión cámara cónica



Nota. La figura representa las reflexiones que pueden ocurrir si se usa material piramidal en el área, (Hemming, 2002).

Por lo tanto en las esquinas entre la pared trasera de la cámara y las paredes laterales se colocara el absorbente tipo cuña IP -150C de la empresa TDK.

Figura 74

Absorbente tipo cuña TDK serie IP



Nota. La figura representa el absorbente tipo cuña de la empresa TDK serie IP (TDK, 2013).

Absorbente tipo cuña TDK IP – 150C

Absorbente electromagnético tipo cuña cuenta con una altura de 150 cm, brindando un excelente rendimiento de absorción electromagnética en una amplia banda entre 30MHz y 40 GHz, consta de combinación de una base de espuma de poliestireno, la cual utiliza la pérdida óhmica de carbono y recubierto de material de ferrita obteniendo un absorbente híbrido con mejor rendimiento.

Es ideal para aplicaciones en el rango de frecuencias bajas, proveyendo un excelente rendimiento de absorción para incidencias normales desde los 30MHz.

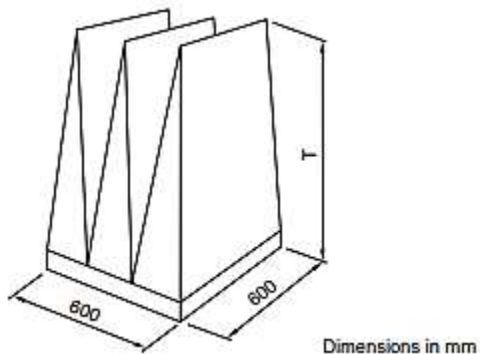
Características:

- Absorbente electromagnético de banda ultra ancha.
- Estable frente a ácidos, bases y vapor de agua, y ofrece una larga vida de servicio.
- Utiliza materiales inofensivos para los humanos al encontrarse inflamados.
- Retardante de fuego (NRL Clases 1, 2 y 3; UL-94HBF).

Forma y Dimensiones

Figura 75

Dimensiones del absorbente tipo cuña TDK serie IP



Nota. La figura representa los absorbentes piramidales de la empresa TDK serie IP (TDK, 2013).

Tabla 20

Características típicas de absorción IP-150C

SERIE	30MHz	50MHz	100MHz	500MHz	1GHz	5GHz	18GHz	40GHz
IP-150C	20	23	30	30	32	40	40	40

Nota. Esta tabla muestra las características típicas de absorción del absorbente tipo cuña de la empresa TDK serie IP-150C,(TDK, 2013).

Tabla 21

Características del absorbente IP-150C

Serie	Longitud (mm)	Peso estándar (kg)	Número de cuñas
IP-150C	150	8.5	3

Nota. Esta tabla muestra las características básicas del absorbente tipo cuña de la empresa TDK serie IP-150C,(TDK, 2013).

Dada las consideraciones expuestas en esta sección, se recomienda utilizar IP-150C, garantizando una eficiencia de 20dB a 30MHz y 40dB a 3000MHz.

Para el piso se colocara el absorbente de pasarela de la Empresa ETS – LINDFREN EHP-26WW para que el personal pueda caminar dentro de la cámara anecoica y colocar adecuadamente las antenas de prueba, el absorbente de pasarela se encuentra diseñado con espuma de poliestireno rígido de baja densidad, para encapsular un absorbente piramidal o de cuña estándar .

Figura 76

Absorbente de pasarela ETS-LINDGREN EHP-26WW



Nota. La figura representa el absorbente de pasarela de la empresa *ETS-LINDGREN EHP-26WW*, (ETS Lindgren, s. f.-a) .

Determinación de las dimensiones de los absorbentes (RAM), para las paredes de la sección cónica.

El material absorbente recomendado en esta sección, son absorbentes tipo cuña especialmente cortados, recubriendo desde la sección de la fuente hasta el zona de quietud QZ. El material absorbente seleccionado para esta sección es ETS-LINDGREN EHP-36WGCL con una altura de 91.4 cm, el cual iniciara desde la zona de quietud y disminuirá su altura en función alcance la sección de la fuente hasta llegar a alcanzar la altura del material absorbente EHP-8WGCL de 21.5 cm.

Absorbente de cuña ETS-LINDGREN EHP - 36WGCL

El absorbente de cuña de ETS-Lindgren posee un alto rendimiento entre 30 MHz y 100 GHz. Los absorbentes de cuña se utilizan en áreas de cámaras donde los

absorbentes piramidales proporcionarían demasiada retrodispersión, el cual es un fenómeno donde las ondas que son reflejadas, se reflejan hacia la fuente en configuraciones específicas.

Especialmente diseñados para cámaras compactas y cónicas, adicionalmente los fabricantes proveen las facilidades para realizar la transición de tamaños en el material absorbente proporcionando una línea continua.

Figura 77

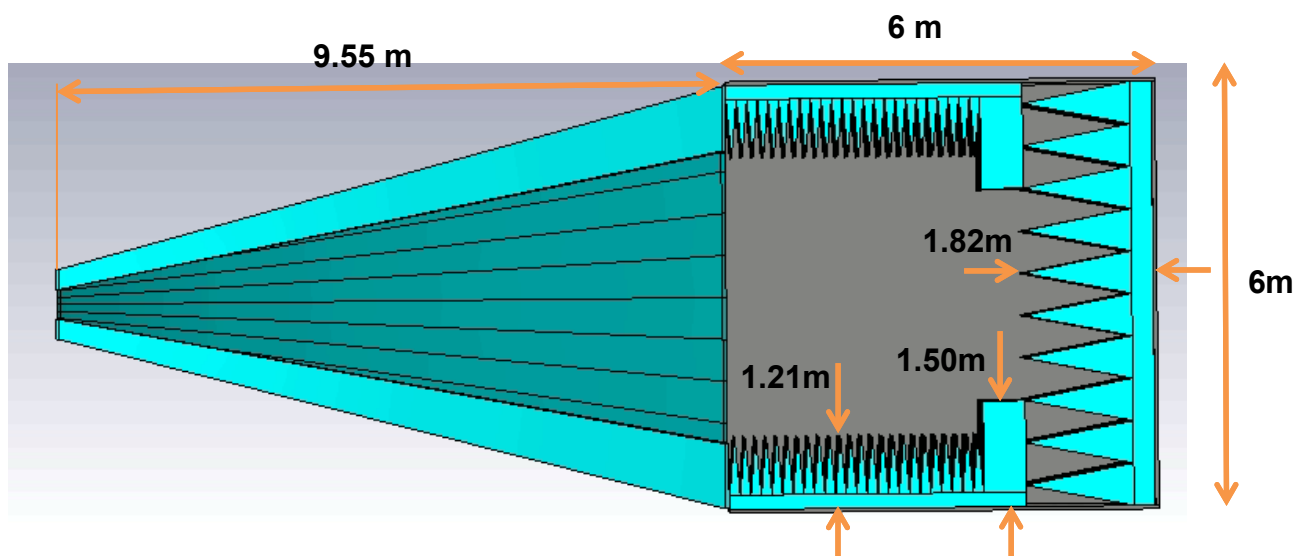
Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-36WGCL



Nota. La figura representa el absorbente tipo cuña de la empresa ETS-LINDGREN EHP-36WGCL, (ETS Lindgren, s. f.-a) .

Figura 78

Dimensiones de la cámara anecoica cónica



Nota. La figura representa las dimensiones de la cámara anecoica cónica con sus respectivas alturas de los absorbentes.

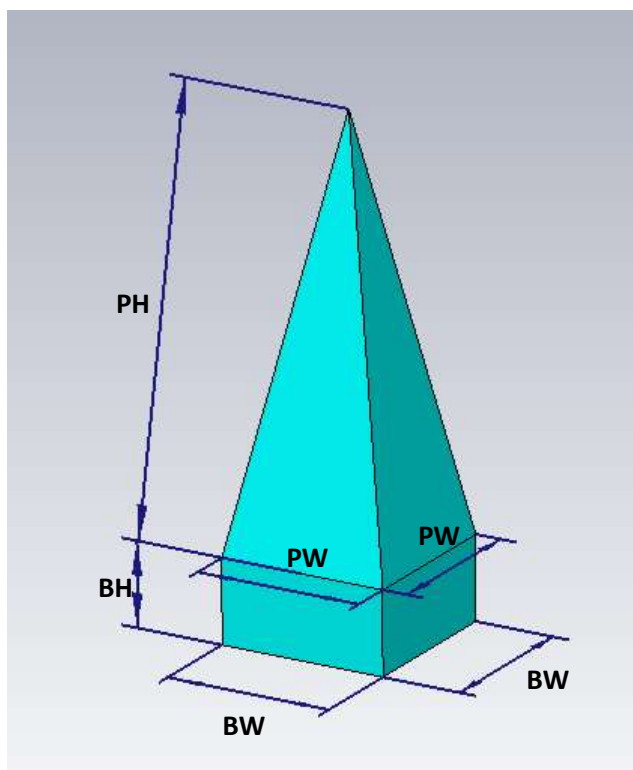
Modelamiento de las estructuras piramidales y tipo cuña

Una vez obtenido las dimensiones de la cámara, las dimensiones del material absorbente tanto para la pared y techo, y la sección cónica.

Se procedió al modelamiento de cada una de las estructuras piramidales indispensables para el desarrollo de la cámara anecoica. Las estructuras piramidales se modelaran en base a los datasheets obtenidos de la empresa TCK y *ETS-LINDGREN*, donde se dispone las dos estructuras piramidales EHP -48PCL y EHP-72PCL, y dos estructuras tipo cuña EHP-36WCL y IP-150C.

Figura 79

Modelamiento de un absorbente piramidal



Nota. La figura representa el modelamiento de un absorbente piramidal con sus respectivas dimensiones.

Tabla 22

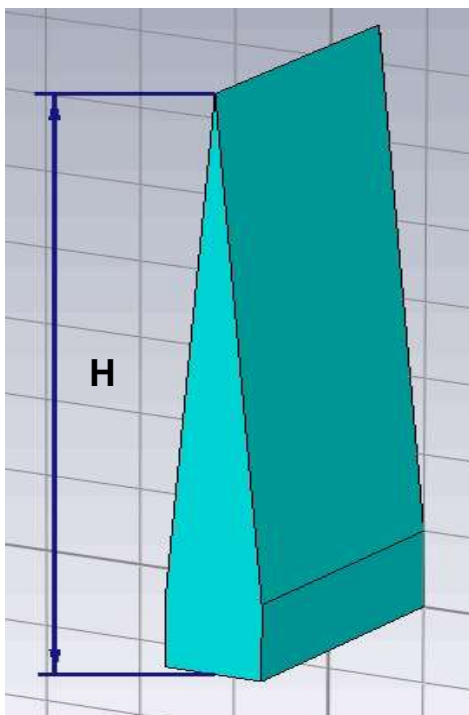
Dimensiones de los absorbente EHP-48PCL, EHP-72PCL

Serie	Pirámide EHP-48PCL	Pirámide EHP-72PCL
Altura de la Base <i>BH</i>	20.3 cm	30.5 cm
Altura de la Pirámide <i>PH</i>	101.9 cm	152.4 cm
Ancho de la Base <i>BW</i>	15 cm	60 cm
Ancho de la Pirámide <i>PW</i>	15 cm	60 cm

Nota. Esta tabla muestra las dimensiones del absorbente EHP-48PCL, EHP-48PCL de la empresa ETS-LINDGREN, (ETS Lindgren, s. f.-b).

Figura 80

Modelamiento de un absorbente tipo cuña



Nota. La figura representa el modelamiento de un absorbente tipo cuña con sus respectivas dimensiones.

Tabla 23

Dimensiones de los absorbentes IP-150C, EHP-48WCL

Serie	Cuña IP-150C	Cuña EHP-36WCL
Altura H	150 cm	91.4 cm

Nota. Esta tabla muestra las dimensiones del absorbente tipo cuña IP-150C, EHP-36WCL de la empresa ETS-LINDGREN, (ETS Lindgren, s. f.-b).

Modelamiento de las estructura de la cámara anecoica cónica

Una vez obtenido todas las estructuras piramidales se procedió al modelamiento de la cámara anecoica, principalmente su estructura interna con sus respectivos absorbentes en las paredes laterales, techo y área especular, diseñados en el software CST STUDIO SUITE.

Las simulaciones de la cámara anecoica serán detalladas en el capítulo V con su respectivo análisis.

Figura 81

Estructura interna cámara anecoica cónica

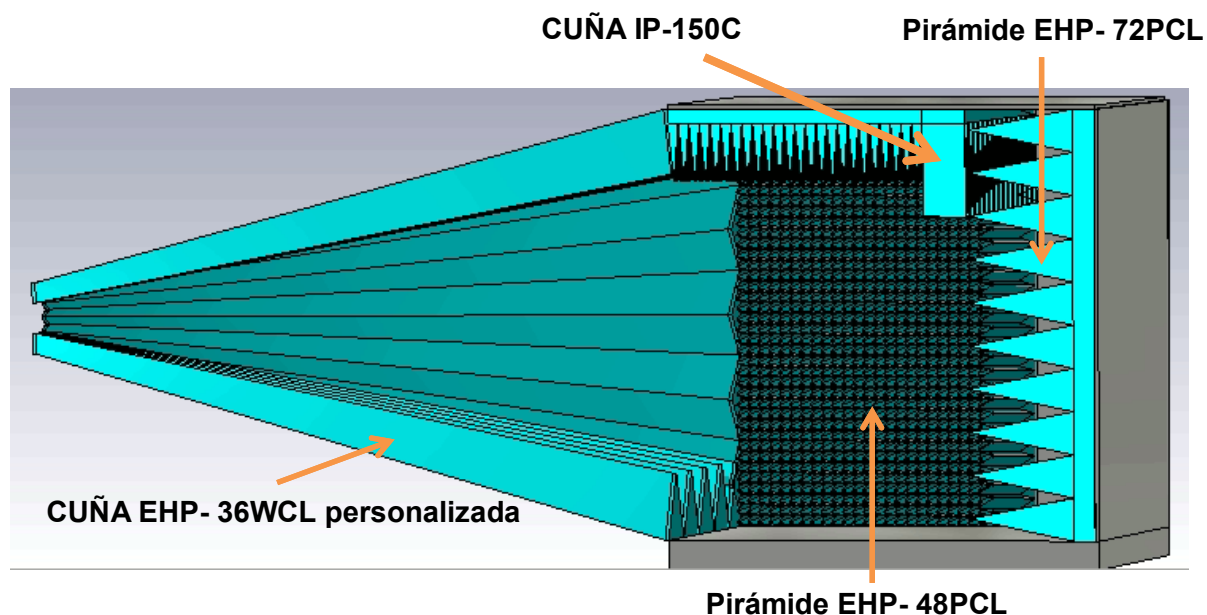


Tabla 24*Características de la cámara anecoica cónica diseñada*

Característica	Detalle
	Configuración : Cámara cónica
Construcción	Dimensiones : 6m x 6m x6 m cubo con cono de 9.55m de
Cámara	largo
	Uso previsto: Medición de antenas
Blindaje	Madera contrachapada de 4mm de espesor recubierta con planchas de acero galvanizado de 3mm
	Pared posterior a TX : EHP-72PCL
	Pared cónica: EHP-36 WCL altura 91.4 cm , reducción a
Material Absorbente	EHP – 8WCL altura 21.5 cm
	Paredes laterales y techo : EHP-48PCL y IP-150C
	Pasarelas: EHP-26WW
Parámetros	Diámetro mínimo de zona de quietud: Hasta 2mm
anecoicas	Longitud de rango entre antena TX y RX : Hasta 9.55m
Ancho de banda	Frecuencias: 30 MHz - 3000 MHz

Nota. Esta tabla muestra las características de la cámara anecoica cónica diseñada

CAPITULO V

SIMULACIÓN Y ANALISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS

Simulación del material absorbente de radiación

Para determinar el rendimiento de las cámaras anecoicas diseñadas, utilizaremos el software CST STUDIO SUITE, nos centraremos en el análisis de los absorbentes tipo piramidal y cuña obtenido en los capítulos anteriores con respecto a la cámara anecoica rectangular y cónica.

CST STUDIO SUITE aplica el método de elementos finitos (FEM), al aplicar este método no es necesario simular un panel grande con muchos absorbentes, se puede aplicar la condición de contorno periódico (PBC) y solo se necesita discretizar y simular una celda unitaria.

La forma geométrica del material absorbente permite la adaptación de impedancia de banda ancha para minimizar los reflejos en el rango de frecuencia requerida.

Asimismo el rendimiento del absorbente depende del material del cual es fabricado y la permitividad eléctrica del material ϵ_r .

Como requisito para que un absorbente tenga un buen rendimiento, los resultados del coeficiente de reflexión deben ser menores a -10dB.

Para analizar el coeficiente de reflexión en CST STUDIO SUITE, se puede utilizar los parámetros S, específicamente el parámetro S11, el cual se lo conoce como el parámetro de coeficiente de reflexión del puerto de entrada.

Materiales absorbentes de radiación cámara anecoica rectangular

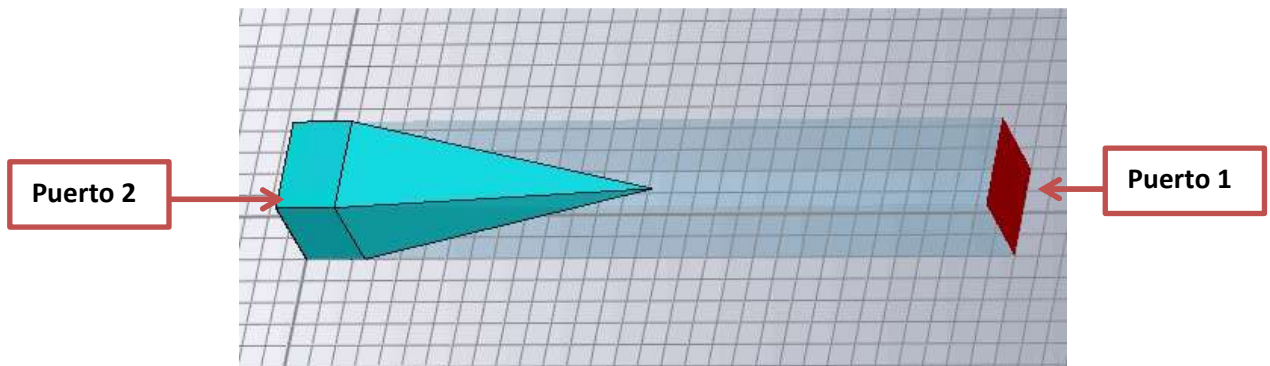
Para realizar la simulaciones se creó una guía de onda rectangular sobre la estructura piramidal, adicionalmente se incluyeron dos puertos a los extremos de la guía de onda para determinar las reflexiones del absorbente colocado a prueba.

Se seleccionó el material del absorbente, en este caso poliuretano con una permitividad eléctrica promedio $\epsilon_r = 2.9$, generalmente este tipo de material no tiene respuesta magnética, por lo cual se asume $\mu_r = 1$.

El objetivo de las simulaciones es determinar el rendimiento de los materiales a utilizar en la cámara anecoica mediante sus características dimensionales y el material colocado en su estructura.

Figura 82

Simulación de un absorbente piramidal



Nota. La figura representa la simulación de un absorbente piramidal,

Las simulaciones se basan en las hojas técnicas de cada estructura, cada estructura fue modelada en el capítulo III para la cámara anecoica rectangular, con sus respectivas dimensiones, a continuación se detalla las alturas totales de los absorbentes piramidales.

Tabla 25

Alturas totales del absorbente IS-015A, IS-023A, IS-030A2

Serie	TDK IS – 015A	TDK IS – 023A	TDK IS – 030A2
Altura Total	15 cm	23 cm	30 cm

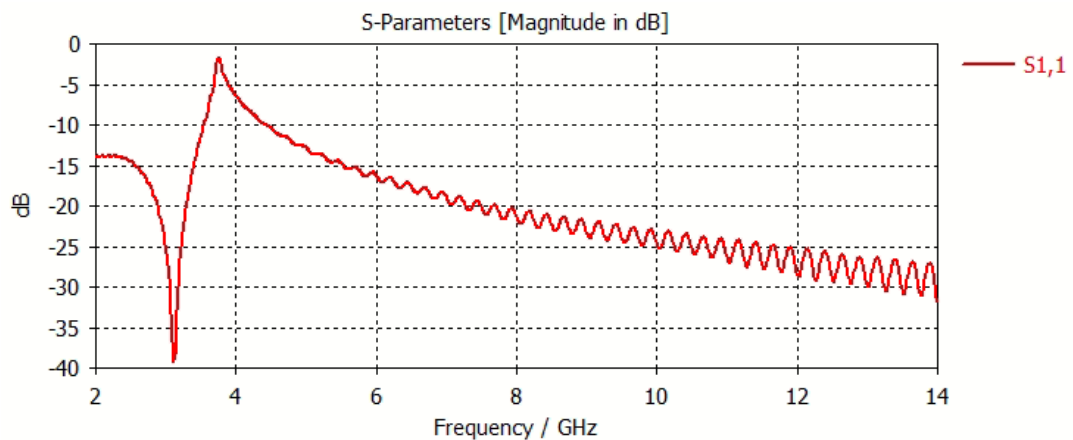
Nota. Esta tabla muestra las alturas del absorbente IS-015A , IS-023A e IS-030A de la empresa TDK,(TDK, 2013).

Absorbente piramidal IS – 015A

Se ha obtenido el coeficiente de reflexión para el rango de frecuencias de 2GHz se ha 12GHz, con una altura total piramidal de 15cm, produciendo el mejor rendimiento aproximadamente 3GHz de -40dB, como se puede apreciar en la Figura 83, existe un cambio súbito entre 2GHz a 4GHz y se estabiliza a 4GHz bajando -5dB, cada 2GHz, llegando alcanzar hasta -30dB a 12 GHz.

Figura 83

Rendimiento del absorbente simulado IS – 015A

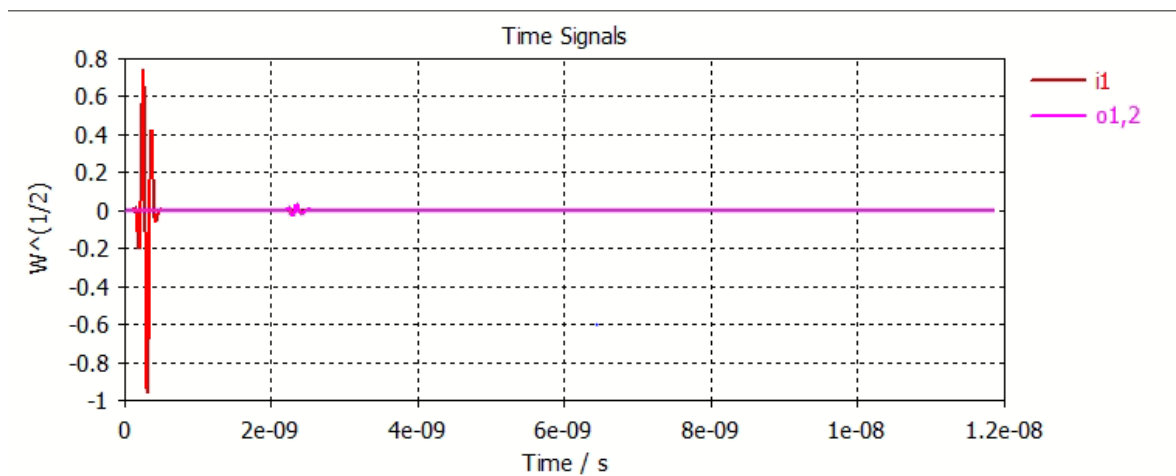


Nota. La figura representa el coeficiente de reflexión del absorbente simulado IS -015A observado en el parámetro S11.

A través de los puertos creados en la guía de onda se envía una señal desde el puerto 1 hacia el puerto 2, con una magnitud de aproximadamente 0.8, la cual se puede apreciar de color rojo en la Figura 84 y una señal de salida de 0.01 de color morado, lo cual indica que la señal en el puerto de salida fue atenuada por el absorbente.

Figura 84

Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente simulado IS – 015A



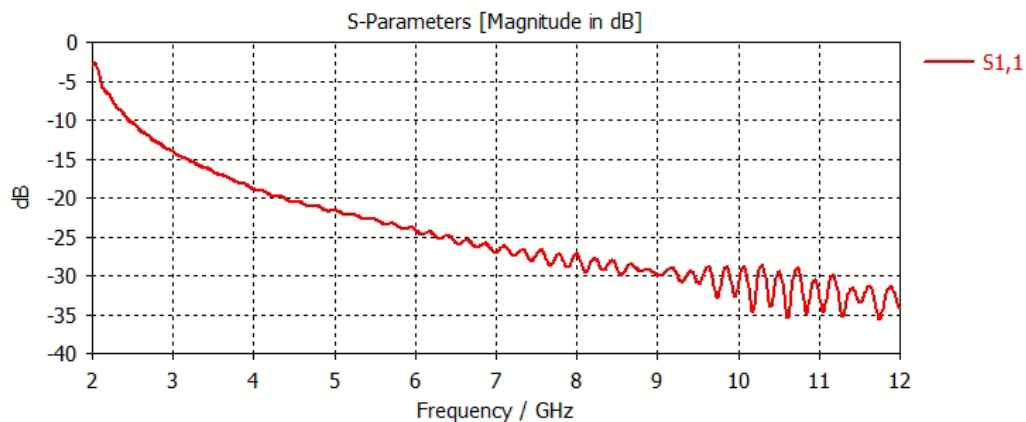
Nota. La figura representa la señal de entrada vs la señal de salida en la guía de onda ubicada sobre el absorbente IS-015A.

Absorbente piramidal IS – 023A

El absorbente piramidal IS -023A cuenta con una altura total de 23cm, se ha simulado en el rango de 2GHz a 12 GHz, aumentando el rendimiento de 5dB cada 2GHz, alcanzado valores de -35dB a 12GHz, brindando una alta eficiencia a frecuencias altas.

Figura 85

Rendimiento del absorbente simulado IS – 023A

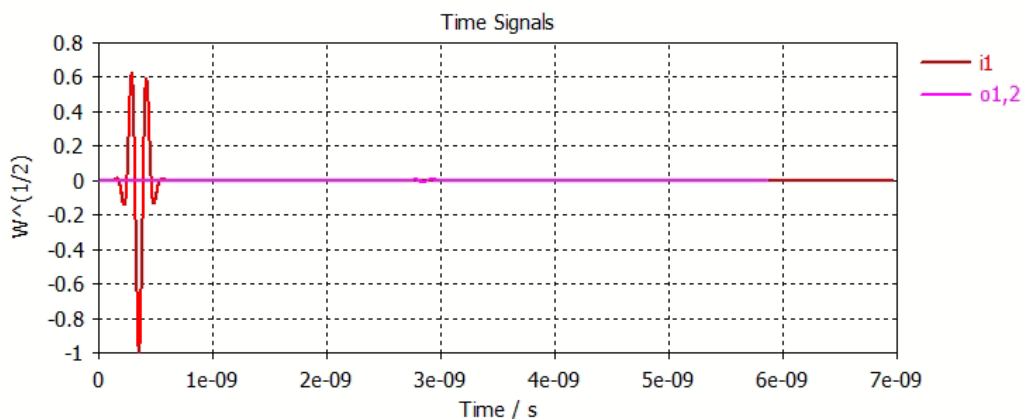


Nota. La figura representa el coeficiente de reflexión del absorbente simulado IS -023A observado en el parámetro S11.

La señal de entrada del puerto 1 tiene una magnitud de 0.6 de color rojo, enviada hacia el puerto 2, se puede apreciar una atenuación casi total de la señal como se puede apreciar en la Figura 86.

Figura 86

Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente simulado IS – 023A



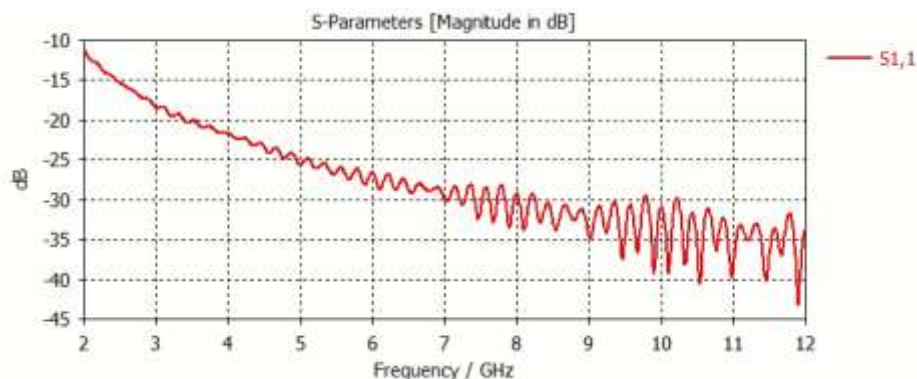
Nota. La figura representa la señal de entrada vs la señal de salida en la guía de onda ubicada sobre el absorbente IS-023A.

Absorbente piramidal IS – 030A2

El absorberdor piramidal IS – 030A2 tiene una altura total 30m, se simulo para un rango de 2GHz a 12 GHz, obteniendo un mejor rendimiento en las frecuencias superiores, obteniendo un rendimiento aproximandamente de -42dB a 12GHz, se puede observar en la Figura 87 que cada 2GHz, el rendimiento mejora 5dB.

Figura 87

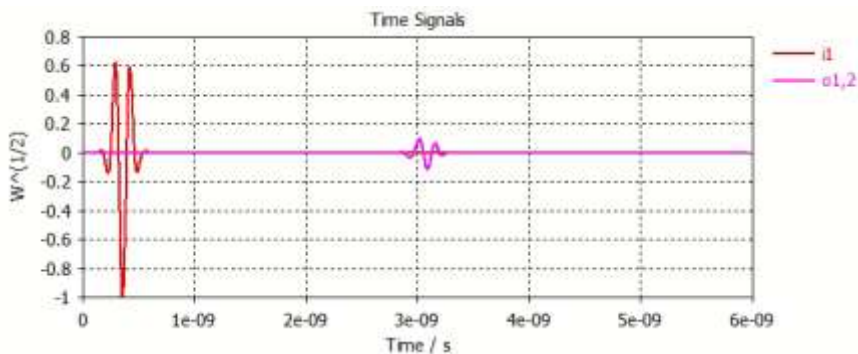
Rendimiento del absorbente simulado IS – 030A



Nota. La figura representa el coeficiente de reflexión del absorbente simulado IS -030A observado en el parámetro S11.

Figura 88

Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente simulado IS – 030A



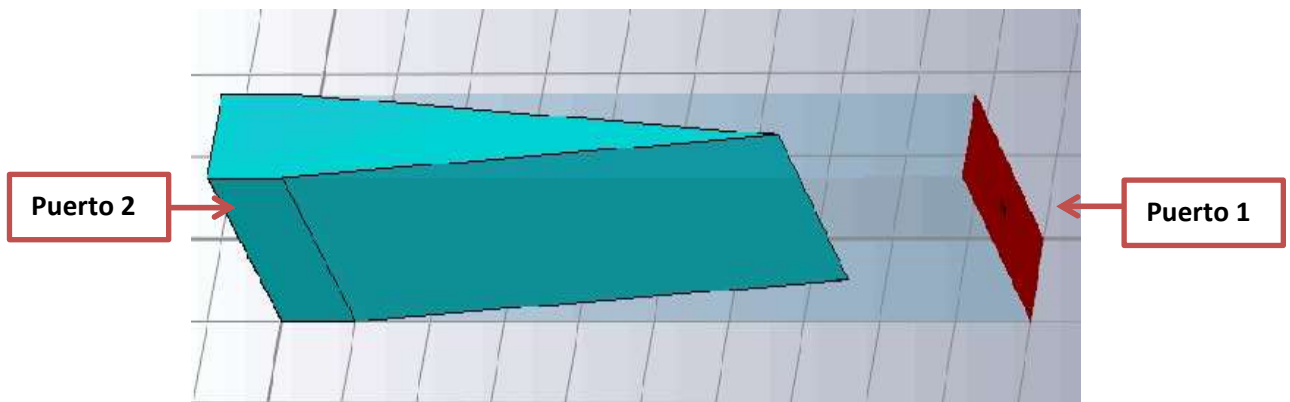
Nota. La figura representa la señal de entrada vs la señal de salida en la guía de onda ubicada sobre el absorbente IS-030A.

Materiales absorbentes de radiación cámara anecoica cónica

En el caso de la cámara anecoica cónica se utilizara dos tipos de estructura como se detalló en el capítulo IV, tanto la estructura piramidal como la cuña. De la misma manera se procedió a crear una guía de onda rectangular sobre la estructura piramidal y tipo cuña, incluyendo dos puertos a los extremos de la guía de onda como se muestra en la Figura 89, el material seleccionado para las simulaciones es poliuretano con permitividad eléctrica promedio $\epsilon_r = 2.9$.

Figura 89

Simulación de un absorbente tipo cuña

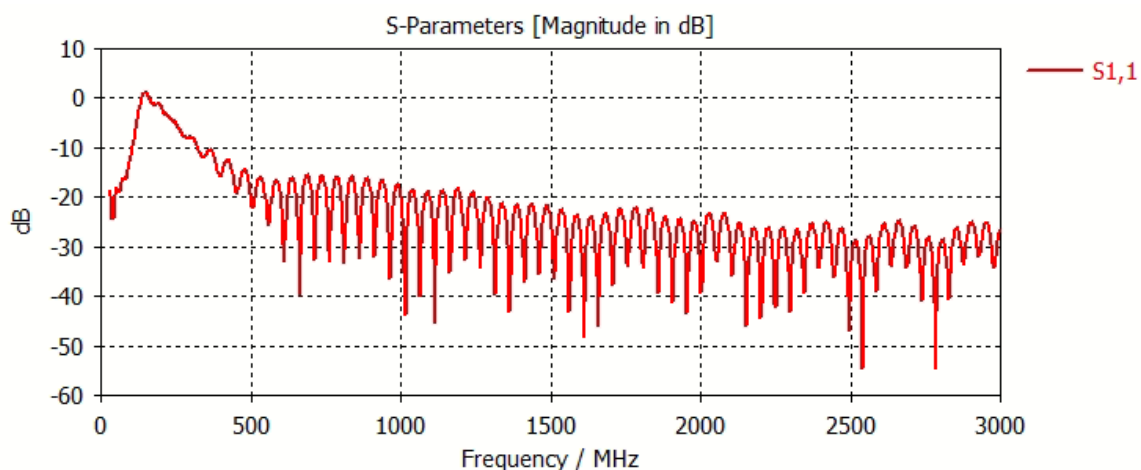


Absorbente tipo cuña TDK IP – 150C

El absorbente tipo cuña TDK IP – 150C con altura de 150cm, se simuló para una rango de frecuencias desde 30MHz a 3000MHz, como se puede observar en la Figura 90, existe una buen rendimiento a lo largo del rango de frecuencias, obteniendo un rendimiento promedio de -30dB, garantizando los criterios de diseño de la cámara.

Figura 90

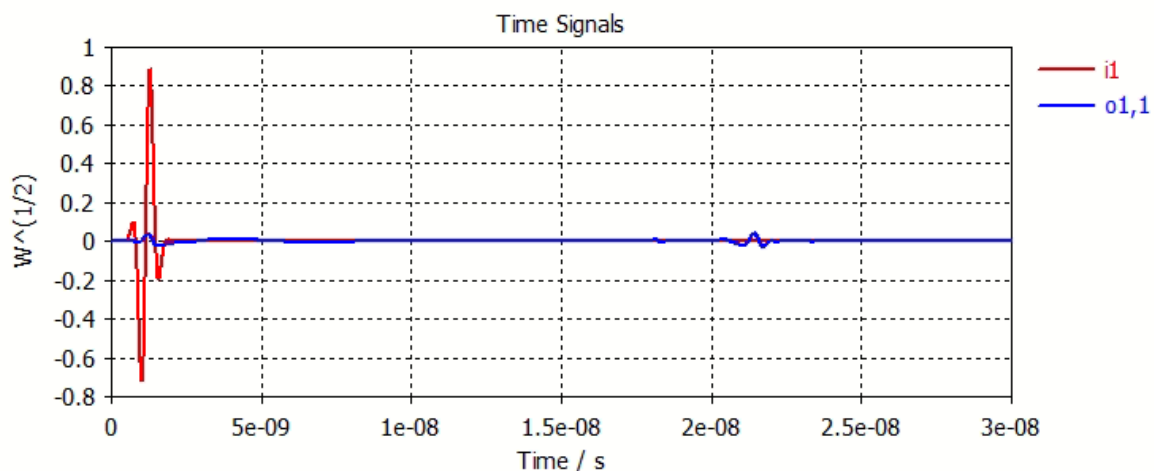
Rendimiento del absorbente simulado TDK IP – 150C



Nota. La figura representa el coeficiente de reflexión del absorbente simulado IP-150C observado en el parámetro S11.

Figura 91

Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente TDK IP – 150C



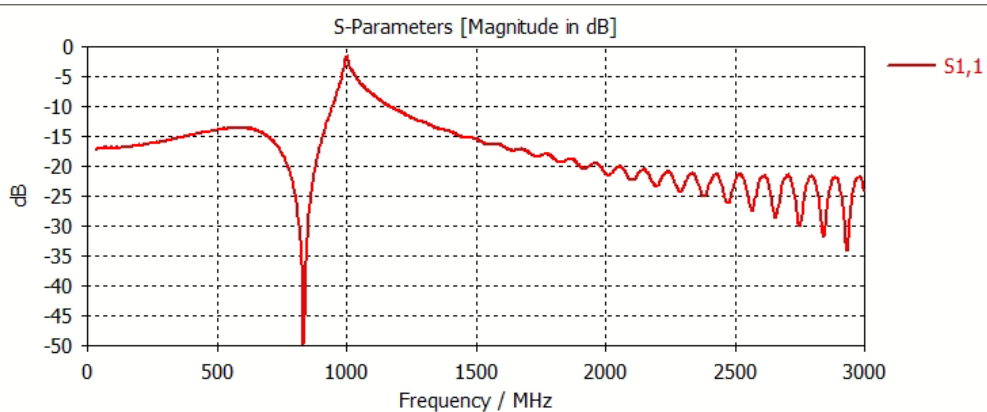
Nota. La figura representa la señal de entrada vs la señal de salida en la guía de onda ubicada sobre el absorbente TDK IP-150C.

Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-48PCL

El absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-48PCL tiene una altura de 1.21m como se puede observar en la Figura 92, el absorbente en frecuencias inferiores a los 500MHz, alcanza un rendimiento de -15dB, mientras aumenta la frecuencia se puede apreciar un rendimiento promedio de -25dB.

Figura 92

Rendimiento del absorbente simulado ETS-LINDGREN EHP-48PCL



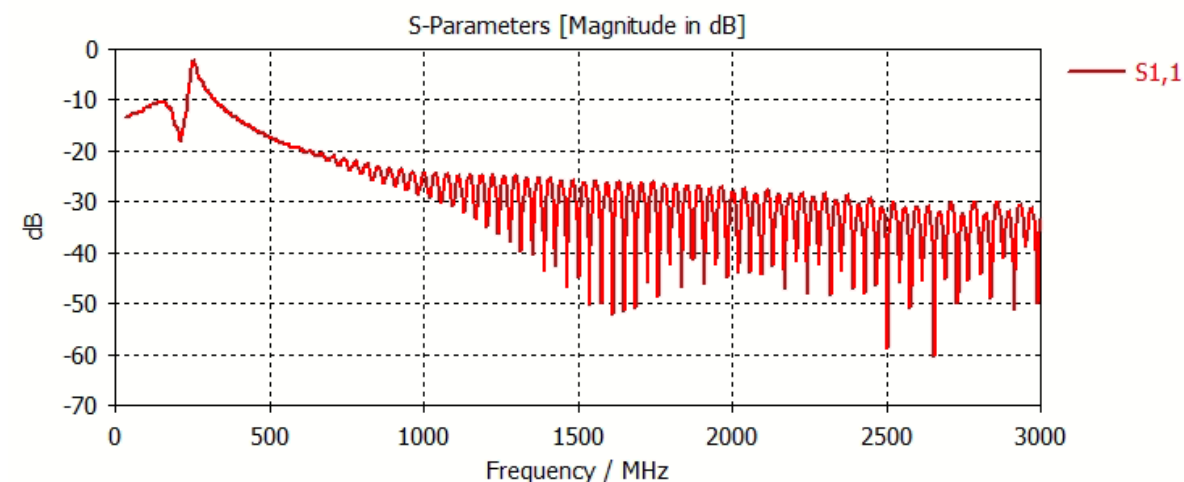
Nota. La figura representa el coeficiente de reflexión del absorbente simulado ETS-LINDGREN EHP-48PCL observado en el parámetro S11.

Absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-72PCL

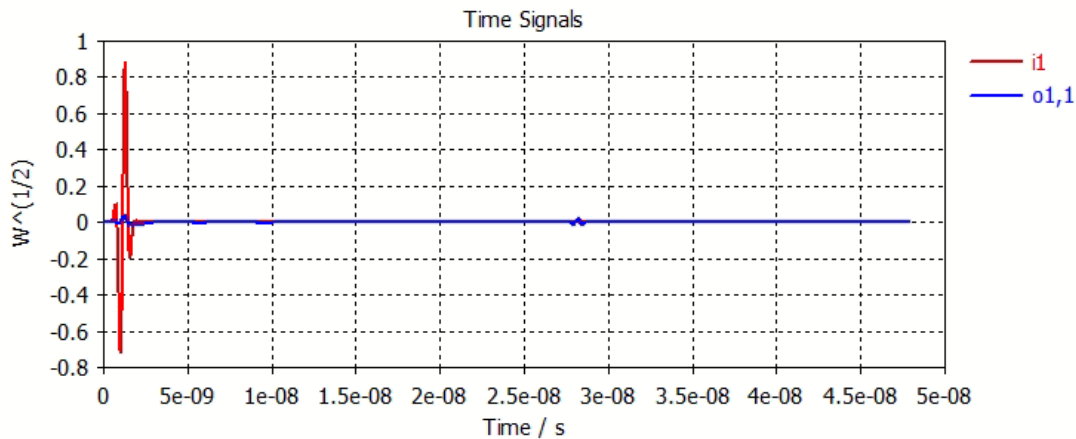
El absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-72PCL, tiene una altura de 1.82m, como se puede apreciar en la Figura 93, en las frecuencias de 30MHz a 500Mhz posee un rendimiento de -15dB, mientras aumenta la frecuencia obtenemos mejor rendimiento alcanzado un promedio de -40dB a lo largo de las frecuencias superiores.

Figura 93

Rendimiento del absorbente simulado ETS-LINDGREN EHP-72PCL

**Figura 94**

Señal de entrada vs Señal de salida del absorbente EHP-72PCL



La estructura piramidal, absorbe de mejor manera en frecuencias de microondas observando que al incrementar la altura piramidal, el rendimiento de absorción mejora, mientras que una estructura tipo cuña es mucho más estable en frecuencias bajas, abarcando un rango extenso de frecuencias con un promedio de rendimiento de absorción adecuado.

CAPITULO VI

Presupuesto

Se estimará un presupuesto para la realización de las cámaras anecoica en base al análisis efectuado tanto en el capítulo III y IV, con los componentes previamente seleccionados, disponibles en el mercado, con el objetivo de establecer una referencia en caso de realizar su implementación.

Presupuesto cámara anecoica rectangular

Material Absorbente de Radiación

Para la cámara rectangular se usarán materiales absorbentes de radiación de la empresa TDK Electronics, garantizando el rendimiento necesario para emular el espacio libre.

TDK IS-015A

El material absorbente TDK IS-015 se utilizará para la pared posterior de la antena de TX, el área recubierta por este material es de $10.8 m^2$.

TDK IS-023A

El material absorbente TDK IS-023A se utilizará para pared posterior de la antena de RX, paredes laterales y techo, el área recubierta por este material es de $29.7 m^2$

TDK IS-030A

El material absorbente TDK IS-030A se utilizará para pared posterior de la antena de RX, paredes laterales, techo y piso (área especular), el área recubierta por este material es de $25.92 m^2$, asignando el material de mejor rendimiento debido al mayor numero de incidencias en estas áreas.

Tabla 26

Estimación del presupuesto material absorbente

Material Absorbente TDK	Área recubierta (m²)	Área por planchas (m²)	Planchas requeridas	Precio por plancha (\$ USD)	Precio Total (\$ USD)
IS-015A	10.8	0.36	30	87	2.610
IS-023A	29.7	0.36	82.5	93	7.672,5
IS-030A	25.92	0.36	72	109	7.848
				Total	18.130,5

Blindaje

El área requerida para el blindaje de la cámara es de 76m², el blindaje prefabricado estará diseñado por planchas de madera contrachapada recubierta de planchas de acero galvanizado.

Se utilizará el doble de área en las planchas de acero, en vista de que se debe recubrir las dos superficies de las planchas de madera.

Tabla 27

Estimación de presupuesto de la estructura del blindaje

Material	Área recubierta (m²)	Área por planchas (m²)	Planchas requeridas	Precio por plancha (\$ USD)	Precio Total (\$ USD)
Madera Contrachapada 4mm	76	2.9768	26	7,93	206,18
Acero Galvanizado 3mm	152	2.9768	52	97,5	5.070
				Total	5.276,18

Adicionalmente se necesitará 12 vigas de perfil rectangular de 100x50x3mm x6m, con un costo de \$14,5 USD, dándonos un total de \$174 USD.

Puerta

Se optará por la puerta blindada RF, de la empresa TDK serie RCM-154, con un costo estimado de \$2.500 USD.

Sistema de iluminación

El sistema de iluminación cuenta con 2 dispositivos de iluminación LED TDK High Bay (HBLED-54), con un costo aproximado de \$102.6 cada uno, con un total de \$205,2 USD.

Sistema de ventilación

El sistema de ventilación cuenta con dos paneles con guía de onda en forma de panel de la empresa Raymond RF, con un costo aproximado de \$500USD por pieza, con un total de \$1.000USD.

Piso flotante

El piso tiene una área de 16.2 m², se colocara 45 planchas de aluminio para el diseño del piso flotante de 0.36m² cada una, de la empresa Tate Access Floors Inc, con un costo por plancha de \$50 y un costo aproximado de instalación de \$1.500, con un monto total de \$3.750.

Cables RF

Se utilizará 8m de cable coaxial flexible de la empresa Totoku Electronic serie TCF500, con una atenuación máxima de 1dB/m a 12GHz, con un costo de \$8,5 USD por metro, con un total de \$68 USD.

La mayoría de equipos del sistema MAT20, poseen conectores SMA H, por lo tanto para el cable es indispensable colocar conectores SMA M, se recomienda de la empresa Linx Technologies, con pérdidas de inserción de $0.04dBma \times \sqrt{f}Ghz$, con un

costo estimado de \$8,79USD por unidad, se recomienda 6 conectores incluidos los de repuesto, con un monto total de \$54,74USD.

Panel de penetración RF

El panel de penetración de RF de la empresa Raymond RF tiene con un costo estimado de \$1.000 USD.

Costos totales de implementación

Tabla 28

Estimación de presupuesto total de la cámara anecoica rectangular

Elemento	Precio (\$ USD)	12% Impuestos (\$ USD)	Total (\$ USD)
Material Absorbente	18.130,5	2.175,66	20.306,16
Blindaje	5.276,18	633,14	5.909,32
Puerta Blindada RF	2.500	300	2.800
Sistema de iluminación	205,2	24,62	229,82
Sistema de ventilación	1000	120	1.120
Piso Flotante	3.750	450	4.200
Cables RF	68	8,16	76,16
Conectores SMA	57,74	6,92	64,66
Panel de penetración	1.000	120	1.120
		Subtotal	35.826,12
		15% Instalación	5.373,92
		Total	41.200,04

Adicionalmente cabe recalcar que la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, cuenta con equipos de medición y antenas por lo tanto no se consideró en el presupuesto estimado, asimismo se consideró un costo de instalación del 15% del valor

total, obteniendo un costo total estimado de la cámara anecoica rectangular de \$41.200,04 USD.

Presupuesto cámara anecoica cónica

Material Absorbente de Radiación

Para la cámara anecoica cónica se usarán materiales absorbentes de radiación de la empresa TDK Electronics y ETS-LINDGREN, garantizando el rendimiento necesario para emular el espacio libre, en el rango de frecuencias de 30MHz a 3000MHz.

ETS-LINDGREN EHP - 72PCL

El material absorbente piramidal EHP -72PCL se utilizará para recubrir la pared posterior de la antena de RX, el área recubierta por este material es de $36 m^2$.

ETS-LINDGREN EHP - 48PCL

El material absorbente piramidal EHP - 48PCL se utilizará para recubrir las paredes laterales, techo y piso, el área recubierta por este material es de $129.6 m^2$

TDK IP - 150C

El material absorbente tipo cuña TDK IP-150C se utilizará para recubrir el área entre la pared posterior de la antena TX y los absorbentes piramidales de las paredes laterales, el área recubierta por este material es de $14.2 m^2$, asignando el material de mejor rendimiento debido al mayor número de incidencias en estas áreas.

ETS-LINDGREN EHP-26WW

El material absorbente de pasarela EHP-26WW se utilizará para recubrir el piso, para que el personal encargado pueda caminar sobre el área, el área recubierta por este material es de $1.8 m^2$.

ETS-LINDGREN EHP-36WGCL

El material absorbente tipo cuña EHP-36WGCL personalizado se utilizará para recubrir la sección cónica recubierta por este material es de $114.6 m^2$.

Tabla 29

Estimación del presupuesto material absorbente

Material Absorbente	Área recubierta (m^2)	Área por planchas (m^2)	Planchas requeridas	Precio por plancha (\$ USD)	Precio Total (\$ USD)
EHP - 72PCL	36	0.36	100	541	54.100
EHP - 48PCL	129.6	0.36	360	309	111.240
IP - 150C	14.2	0.36	40	556	22.240
EHP-26WW	1.8	0.72	3	2.831	8493
EHP-36WGCL	114.6	1.08	106	871	92.326
				Total	288.399

Blindaje

El área requerida para el blindaje de la cámara cónica es de $294.6m^2$, el blindaje prefabricado estará diseñado por planchas de madera contrachapada recubierta de planchas de acero galvanizado.

Se utilizará el doble de área en las planchas de acero, en vista de que se debe recubrir las dos superficies de las planchas de madera.

Tabla 30*Estimación de presupuesto de la estructura del blindaje*

Material	Área recubierta (m²)	Área por planchas (m²)	Planchas requeridas	Precio por plancha (\$ USD)	Precio Total (\$ USD)
Madera Contrachapada 4mm	294.6	2.9768	99	7,93	785.07
Acero Galvanizado 3mm	589.5	2.9768	199	97,5	19.402,50
				Total	20.187,57

Puerta

Se optará por la puerta blindada RF, de la empresa TDK serie RCM-154, con un costo estimado de \$2.500 USD.

Sistema de iluminación

El sistema de iluminación cuenta con 4 dispositivos de iluminación LED TDK High Bay (HBLED-54), con un costo aproximado de \$102.6 cada uno, con un total de \$410,4 USD.

Sistema de ventilación

El sistema de ventilación cuenta con dos paneles con guía de onda en forma de panel de la empresa Raymond RF, con un costo aproximado de \$500USD por pieza, con un total de \$1.000USD.

Piso flotante

El piso tiene un área de 36 m², se colocará 100 planchas de aluminio para el diseño del piso flotante de 0.36m² cada una, de la empresa Tate Access Floors Inc, con un costo por plancha de \$50 y un costo aproximado de instalación de \$3000, con un monto total de \$8000.

Cables RF

Se utilizará 12m de cable coaxial flexible RG58 de la empresa Pasternack serie PE-C195, con una atenuación máxima de 0.62dB/m a 3GHz, con un costo de \$2,5 USD por metro, con un total de \$30 USD.

La mayoría de equipos del sistema MAT20, poseen conectores SMA H, por lo tanto para el cable es indispensable colocar conectores SMA M, se recomienda de la empresa Linx Technologies, con pérdidas de inserción de $0.04dBma \times \sqrt{f}Ghz$, con un costo estimado de \$8,79USD por unidad, se recomienda 6 conectores incluidos los de repuesto, con un monto total de \$54,74USD.

Panel de penetración RF

El panel de penetración de RF de la empresa Raymond RF tiene con un costo estimado de \$1.000 USD.

Costos totales de implementación

Tabla 31

Estimación de presupuesto total de la cámara cónica

Elemento	Precio (\$ USD)	12% Impuestos (\$ USD)	Total (\$ USD)
Material Absorbente	288.399	34.607,88	323.006,88
Blindaje	20.187,57	2.422,50	22.610.07
Puerta Blindada RF	2.500	300	2.800
Sistema de iluminación	410,4	49.24	459,64
Sistema de ventilación	1,000	120	1.120
Piso Flotante	8,000	960	8.960
Cables RF	30	3,60	33,60
Conectores SMA	57,74	6,92	64,66
Panel de penetración	1.000	120	1.120

Subtotal	360.174,85
15% Instalación	54.026,22
Total	414.201,07

Adicionalmente cabe recalcar que la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, cuenta con equipos de medición y antenas por lo tanto no se consideró en el presupuesto estimado, asimismo se consideró un costo de instalación del 15% del valor total, obteniendo un costo total estimado de la cámara anecoica cónica de \$414.201,07 USD.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó dos cámaras anecoicas para cumplir con los objetivos deseados, una cámara anecoica para abarcar los rangos de la banda X, y una cámara para abarcar los rangos de HF a UHF, para el diseño de las mismas se basó en el análisis del campo lejano de la antena transmisora.

La cámara anecoica para el rango de frecuencias de la banda X, se diseñó en base a los condiciones de campo lejano, permitiendo de esta manera obtener la longitud de rango R, las dimensiones de la cámara y su geometría, para la obtención de la longitud de rango entre las dos antenas se consideró la ecuación de campo lejano, definiendo una longitud de 2.5m, la cual se encuentra en función del diámetro máximo de las antenas a prueba o recepción y la frecuencia máxima de trabajo, mediante un análisis previo se pudo determinar que se podía abarcar más frecuencias con las mismas dimensiones de la cámara, por lo tanto se diseñó la cámara para un rango de frecuencias desde los 2GHz a los 12 GHz, en la cual se incluye la banda X, la geometría de la cámara es rectangular permite una mejor absorción de las ondas especulares especialmente en la frecuencias de microondas.

Para calcular el área especular, la cual es el área donde existe mayor número de ondas incidentes oblicuas, se utilizó el análisis en la zona de Fresnel, permitiendo obtener las dimensiones del área especular, un factor importante en el analisis de Fresnel, son las alturas de las antenas, con respecto al piso, al ser considerada el área con mayor reflexión de la cámara se debe garantizar un material absorbente de radiación con un excelente rendimiento, en este caso para recubrir esta área se plantea utilizar un absorbente piramidal TDK IS-030A, con una altura piramidal de 30cm, el cual

garantiza un rendimiento de absorción promedio de 45dB a lo largo de las frecuencias deseadas.

Para las paredes laterales y techo, se recubrió el mismo ancho del área especular con el absorbente piramidal TDK IS-030A, y el área restante se recubrió con absorbente piramidal IS-023, con una altura de 23cm, y con una rendimiento de absorción promedio de 40dB, las paredes posteriores, en las cuales la incidencia es normal, se colocará absorbente piramidal TDK-023, en la pared posterior de antena receptora y absorbente piramidal TDK-015 en la pared posterior de la antena transmisora, con una altura de 15 cm y un rendimiento de absorción de 35dB.

El blindaje de la cámara rectangular es de tipo modular, se pretende diseñar de madera contrachapada de 4mm, recubierta con planchas de acero inoxidable de 3mm, colocadas sobre un marco de vigas de acero, garantizando una reflectividad de -100dB, en frecuencias de los microondas.

Los elementos adicionales como la puerta se consideró una puerta TDK ERCM-154, con dimensiones de 2.1mx1.2m, con un rendimiento de 100dB, el piso flotante con una altura de 40cm para colocar la canalización de los cables de alimentación y dato, con un puerto de panel de 30cmx30cm, para la entrada y salida de cables de RF, dos paneles de ventilación de la empresa Raymond RF ubicados diagonalmente en la pared posterior exterior de la antena de prueba y en la parte de iluminación se colocará dos LED TDK High Bay (HBLED-54), con gran eficiencia luminosa y bajo consumo de energía.

Para garantizar el funcionamiento óptimo de la cámara anecoica rectangular se simuló los absorbentes piramidales utilizados, con su respectivo material y sus dimensiones en el software CST STUDIO SUITE 2020, donde se logró comprobar la efectividad de utilizar absorbentes piramidales en las frecuencias de los microondas, se pudo observar que a mayor altura del absorbente el rendimiento es mejor, las

simulaciones y los datasheets tienen un cierto margen de diferencia de aproximadamente 10 dB, esto se debe a que las empresas utilizan materiales patentados con mayores eficiencia a los simulados.

La cámara anecoica para la frecuencia de HF a UHF, que va del rango de los 3MHz a los 3000MHz, se diseñará a partir de los 30MHz, debido a que los materiales absorbentes de radiación disponibles en el mercado se fabrican a partir de los 30MHz, mediante el criterio de campo lejano, la longitud de rango y las dimensiones de la cámara para una geometría rectangular para este rango de frecuencias tienden aumentar significativamente, por lo tanto, un diseño rectangular incluiría mayor costo y espacio, por lo tanto para el diseño de esta cámara se utilizó una geometría cónica, la cual no elimina las ondas especulares, al contrario las utiliza para aumentar el rango de campo lejano.

Las dimensiones de la cámara se obtuvo mediante análisis trigonométrico, con un ángulo de conicidad de 35° , obteniendo una longitud de cono de 9.52m y un área rectangular de 36m².

El absorbente que garantiza el rendimiento de la cámara anecoica es el que se encuentra en la parte posterior de la zona de quietud, se planea usar el material absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-72PCL, con una altura de 1.82m, y un rendimiento de absorción promedio de 35dB.

Para las paredes laterales y techo se plantea utilizar un absorbente piramidal ETS-LINDGREN EHP-48PCL con una altura de 1.21m y un rendimiento de absorbente promedio de 30dB, en los bordes entre las paredes laterales y la pared se recomienda utilizar un absorbente tipo cuña para evitar el fenómeno de retrodispersión, por lo tanto se utilizará un absorbente TDK IP-150C con una altura de 1.5m, con rendimiento de absorción de 30dB.

Para las paredes de la sección cónica se utilizará un absorbente tipo cuña adaptado con dimensiones de ETS-LINDGREN EHP-36WGCL, con una altura de 91.4cm en la zona de quietud y se reducirá paulatinamente hasta alcanzar una altura de 21.5cm en la zona de alimentación.

De la misma manera para la cámara anecoica cónica se simuló los absorbentes piramidales y tipo cuña, obteniendo comprobando de la misma manera que un absorbente piramidal con una mayor altura posee un mejor rendimiento y un absorbente tipo cuña posee una mayor estabilidad en su rendimiento en frecuencias bajas, garantizando una mejor eficiencia en comparación con un absorbente piramidal, por lo tanto mediante el análisis de los absorbentes se logró observar que los materiales planteados para el diseño permiten un funcionamiento óptimo para las cámaras anecoicas diseñadas.

Recomendaciones

Para las mediciones de antenas en el rango de HF, se recomienda pruebas en campos abiertos, debido a las dimensiones de antenas en este rango de frecuencias y la ineffectividad de los materiales absorbentes de radiación disponibles en la industria para este rango de frecuencias.

Se recomienda utilizar el criterio de campo lejano para el diseño de las cámaras anecoicas para identificar su geometría y sus dimensiones, y optar por las características de mejor rendimiento, espacio y presupuesto para su futura implementación.

Se recomienda simular una celda unitaria del panel de absorbentes en el software CST STUDIO SUITE, obteniendo los mismos resultados de absorción, que al simular el panel completo, adicionalmente se recomienda usar una computadora con los suficientes recursos para las simulaciones.

Trabajo futuros

Mediante el trabajo de investigación realizado se pudo identificar que para frecuencias en el rango de HF, la industria no cuenta con materiales absorbentes de radiación, por lo tanto se propone buscar nuevas técnicas, estructuras o compuestos químicos que permitan absorber las ondas electromagnéticas en este rango de frecuencias.

Se proponen el análisis y diseño de cámaras anecoica en la región de campo cercano, en vista de que se puede reducir las dimensiones de la cámara, adicionalmente el diseño de software que permita análisis de la parte reactiva de la onda electromagnética, debido a que en el industria existe software para este tipo de cámaras pero tienden a ser costosos.

Referencias

- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2017). *Plan Nacional De Frecuencias*. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/01/Resolución-12-09-ARCOTEL-2017_completa_con-firmas-11.pdf
- Aulestia, M., & Omarza, E. (2012). *Desarrollo de guías didácticas y contenido audio visual para modelamiento de líneas de transmisión y parámetros de antenas* [Tesis de pregrado]. Universidad de las Fuerzas Armadas «ESPE».
- Balanis, C. (2005). *Antenna theory* (Wiley-Interscience (ed.); 3.^a ed.).
- Buitrón, J., & Pérez, S. (2018). *Diseño de una cámara anecoica para el laboratorio de antenas y propagación de la Udl* [Tesis de pregrado, Universidad de las Américas]. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9371>
- Cardama, Á., Roca, L., Ruis, J., Romeu, J., Blanch, S., & Bataller, M. (2002). *Antenas* (U. P. de Catalunya (ed.); 2.^a ed.).
- Castillo, P. (2016). Sistema de medición para antenas en cámara anecoica para radiofrecuencia y microondas. *Revista de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones*. https://issuu.com/ucsp/docs/boletin_marzo_iet-2016
- Cheng, D. (1997). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Addison-Wesley.
- CST STUDIO SUITE. (2010). *CST STUDIO SUITE Getting started*.
- CST STUDIO SUITE. (2020). *High Frequency Simulation*.
- Cuming Lehman Chambers. (s. f.). *Anechoic Chamber Lighting Options*. Recuperado 8 de agosto de 2021, de <https://cuminglehman.com/uncategorized/anechoic-chamber-lighting-options/>
- De La Vega, M. (1995). *Problemas de ingeniería de puesta a tierra* (Limusa (ed.); 2.^a ed.).
- Espinosa, A. (2017). *Caracterización de un sistema de microonda en la banda «X», mediante software de simulación y un radioenlace punto-punto en ambiente de laboratorio* [Tesis de pregrado]. Universidad de las Fuerzas Armadas «ESPE».
- ETS Lindgren. (s. f.-a). *Absorbedor piramidal de microondas de alto rendimiento EHP*. Recuperado 11 de agosto de 2021, de <http://www.ets-lindgren.com/products/absorber/rf-microwave-absorbers/rf-absorbers/1006/100601>
- ETS Lindgren. (s. f.-b). *ANECHOIC CHAMBER LIGHTING - ETS Lindgren*. Recuperado 8 de agosto de 2021, de <https://pdf.directindustry.com/pdf/ets-lindgren/anechoic-chamber-lighting/35072-716482.html>
- ETS Lindgren. (2011). *Multi-Purpose Tapered Chamber at the National University of*

Singapore Enables Far-Field and Spherical Near-Field Test Measurements Over an Extended Frequency Range. <https://manualzz.com/download/8933854>

FRANKONIA GROUP. (s. f.). *Anechoic Chambers / RF-Shielded Rooms*. www.frankonia-emc.com

FRANKONIA GROUP. (2020). *ANECHOIC CHAMBERS*. <https://frankonia-solutions.com/wp-content/uploads/2019/05/Frankonia-Anechoic-Chambers-2020.pdf>

Gallardo, S. (2019). *Elementos de sistemas de telecomunicaciones* (Paraninfo (ed.); 2.^a ed.).

Hemming, L. (2002). *Electromagnetic Anechoic Chamber* (Wiley-Interscience (ed.)).

Hindle, P., Rodriguez, V., & Rodriguez, V. (2017). *Precision antenna measurement guide*. September.

López, M., & Brito, F. (2006). *Diseño Y Construcción De Una Cámara Anecoica Para La Facultad De Ingeniería Electrónica* [Tesis de Pregrado]. Universidad De Las Fuerzas Armadas «ESPE».

Micromag. (s. f.). *Materiales Absorbentes Radar*. Recuperado 7 de agosto de 2021, de <https://www.micromag.es/es/radar-absorbing-materials-es/>

Microwave Vision Group. (s. f.). *Hyperloss absorbers*.

Miranda, M., Sebastián, J., & Margineda, J. (2002). *Ingeniería de Microondas*. Prentice Hall.

Moreno, G., Valencia, J., Cárdenas, C., & Villa, W. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra* (U. de Antioquia (ed.); 1.^a ed.).

Muñoz, Ó. (s. f.). *Jaula de Faraday*. Recuperado 7 de agosto de 2021, de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n10/r3.html>

Pinto, Y. (2004). *Diseño y especificación de una cámara anecoica* [Tesis de Pregrado]. Universidad de los Andes.

RA Mayes. (s. f.-a). *Aluminum Foil Radio Frequency (RF) Shielding*. Recuperado 7 de agosto de 2021, de https://www.ramayas.com/Aluminum_Foil_EMI_RFI_Shielding.htm

RA Mayes. (s. f.-b). *RF Shielded Room and Solid Wall Rooms*. Recuperado 7 de agosto de 2021, de https://www.ramayas.com/RF_Shielded_Room.htm

Raymond RF. (s. f.). *Honeycomb Waveguide Vents | Bulkhead Connector Panels*. Recuperado 7 de agosto de 2021, de <https://www.raymondrf.ca/products>

Rodriguez, V. (2004). Using tapered chambers to test antennas. *EE: Evaluation Engineering*, 43(5), 62-68.

Rodríguez, V. (2004). INTRODUCCIÓN A LAS CÁMARAS ANECOICAS PARA MEDICIONES DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO. *Simposio de metrología*, 5.

<https://frankonia-solutions.com/wp-content/uploads/2019/05/Frankonia-Anechoic-Chambers-2020.pdf>

Rodriguez, V., Matitsine, S., Chia, T., Lagoiski, P., Matytsine, L., Matytsine, M., & Tan, P. (2013). A Cone Shaped Tapered Chamber for Antenna Measurements Both in Near Field and Far Field in the 200 MHz to 18 GHz Frequency Range and Extension of the Quiet Zone using an RF Lens. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 28(12), 1162-1170.

Stallings, W. (2014). *Data and computer communications* (Pearson (ed.); 10.^a ed.).

TDK. (s. f.-a). *High Bay LED Light Fixture for EMC Chambers (HBLED-540)*. Recuperado 8 de agosto de 2021, de <https://www.tdkrfsolutions.tdk.com/products/test-accessories/high-bay-led-light-fixture-for-emc-chambers-hbled-540>

TDK. (s. f.-b). *IS- Absorber- Series. 1, 4*.

TDK. (2013). Radio Wave Absorbers For anechoic chambers. *Tdk, September*, 19.

Ulaby, F. (2007). *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo* (5.^a ed.). Prentice Hall.

Xu, Q., & Huang, Y. (2018). Anechoic and Reverberation Chambers. En *Anechoic and Reverberation Chambers*. <https://doi.org/10.1002/9781119362050>