

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UNA CAMARA ANECOICA

D'Angelo, Javier Gastón – LU95448

Ingeniería en Telecomunicaciones

Gabri, Carlos Julián – LU95560

Ingeniería en Telecomunicaciones

Tutor:

Tropeano, Francisco, UADE

JULIO 11, 2016



UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS

1. Agradecimientos:

Al Ingeniero Norberto Dalmas Di Giovanni (CITEDEF) por su colaboración, por compartir sus conocimientos y experiencia, y por las recomendaciones e información que nos brindó para realizar este proyecto.

Al Ingeniero Leandro Blas (INTI) por su buena predisposición y generosidad.

A Hernan Urdiales, Regional Sales Director - Latin America de ETS - Lindgren, Inc. Por compartir información comercial y recomendaciones ganadas por su experiencia.

Al Ing. Roberto Alvarez de AQTK S.A., representante de ETS - Lindgren en Argentina.

Al Arquitecto Hernán Bocco por sus aportes en lo referente a la obra civil.

Al Ingeniero Francisco Tropeano, director de la carrera y tutor del proyecto, por proponernos sumarnos en este proyecto y su guía durante el desarrollo del mismo.

A nuestras familias.

2. Resumen

El presente trabajo trata sobre el diseño, cálculo y recomendaciones para la construcción de una cámara anecoica, que pueda operar optimamente en el rango de las frecuencias que van de los 800 MHz a 5,8 GHz con fines de investigaciones académicas y/o comerciales.

La finalidad de esta cámara es la de simular el espacio libre para poder efectuar mediciones y patrones de radiación de antenas.

A continuación se describirán las características que definen a este dispositivo, las normativas y regulaciones que aplican a las prácticas que pueden llevarse a cabo con esta cámara, los elementos físicos y los conceptos teóricos vinculados con su diseño y uso.

Con esta base se presentará el cálculo de dimensiones, materiales y características de comportamiento de la cámara, de acuerdo a las limitaciones del posible recinto disponible destinado por la UADE y del actual equipamiento con que cuenta la Universidad.

En este trabajo se encuentra además un resumen de costos de materiales y mano de obra necesarios para la construcción de la cámara como también la valoración académica que tendría ejecutar la construcción de la misma.

3. Abstract

This paper talk about design, calculation and recommendations for the construction of an anechoic chamber, which can operate optimally in the range of frequencies ranging from 800 MHz to 5.8 GHz, for purposes of academic research and / or commercial .

The purpose of this camera is to simulate free space to make measurements and radiation patterns of antennas.

The characteristics that define this device, the norms and regulations that apply to the practices that can be done with this camera, the physical elements and the theoretical concepts related to their design and use are described.

On this basis the calculation of dimensions, materials and performance characteristics of the camera, according to the limitations of the available possible enclosure designed by UADE and current equipment available to the University will be presented.

This paper also finds a summary of costs of materials and labor required for the construction of the camera as well as academic assessment that would execute the construction of it.

4. Contenidos

| | |
|--|----|
| 1. Agradecimientos: | 2 |
| 2. Resumen | 3 |
| 3. Abstract | 4 |
| 4. Contenidos | 5 |
| 5. Diseño de una cámara anecoica | 7 |
| 5.1 Introducción | 7 |
| 5.1.1 Objetivo | 7 |
| 5.1.2 Restricciones | 8 |
| 5.2 Normativa y marco regulatorio | 8 |
| 5.2.1 ¿Qué es la Compatibilidad Electromagnética? | 9 |
| 5.2.2 Regulación local | 10 |
| 5.2.3 Componentes del sistema emisor-receptor, mediciones y homologación | 14 |
| 5.3 Marco teórico | 17 |
| 5.3.1 Definiciones | 17 |
| 5.3.2 Mediciones: Unidades y características | 21 |
| 5.4 Antenas | 23 |
| 5.4.1 Clasificación: | 23 |
| 5.4.2 Tipos | 23 |
| 5.4.3 Diagramas de radiación | 25 |
| 5.4.4 Características | 27 |

| | |
|---|----|
| 5.5 Materiales: | 32 |
| 5.5.1 Tipos de materiales - Aislantes y absorbentes | 32 |
| 5.5.2 Materiales Aislantes - Exterior - Jaula de Faraday | 32 |
| 5.5.3 Materiales absorbentes (de radiofrecuencia) - Interior | 34 |
| 5.6. Teoría del diseño | 43 |
| 5.6.1 Método de trazado de Rayos | 43 |
| 5.6.2 Técnica de las Imágenes | 45 |
| 5.6.2.1 Ventajas de la Técnica de Imágenes | 45 |
| 5.6.3 Cálculo y diseño | 47 |
| 5.6.3.1 Determinación del campo lejano R | 48 |
| 5.6.3.2 Dimensiones de la Cámara | 49 |
| 5.6.3.3 Determinación de la región de prueba | 52 |
| 5.6.3.4 Cálculo de las dimensiones y determinación del absorbente | 53 |
| 5.7 Construcción del recinto de la cámara Anecoica | 57 |
| 5.7.1 Estructura – Exterior | 57 |
| 5.7.2 Interior de la cámara- Recubrimiento | 60 |
| 5.7.3 Interior de la cámara- Iluminación y accesorios | 65 |
| 5.7.4 Mano de obra civil | 66 |
| 6. Resumen de Costos. | 67 |
| 7. Conclusiones | 69 |
| 8. Bibliografía | 71 |
| 9. Glosario | 72 |
| 10. Anexos | 74 |

Diseño de una cámara anecoica

5.1 Introducción

Una cámara Anecoica, como su nombre lo indica es un recinto en el cual no se produce eco. Esta definición está asociada a la onda producto del sonido, cuyo rebote es conocido como “eco”.

Desarrollando el concepto y generalizándolo, lo que se pretende con este tipo de dispositivos es lograr anular el rebote de una determinada longitud de onda, con el objeto de que toda la onda emitida por el emisor, sea captada por el receptor, evitando que dentro de la misma se capten ondas fuera de la longitud de interés como también los rebotes propios de la emitida.

La zona óptima para este tipo de mediciones sería el vacío absoluto que se encuentra en el espacio exterior.

Como esto no puede ser reproducido en la tierra lo que se busca es construir algo capaz de por un lado aislar las ondas externas al recinto y por otro impedir que se propaguen los rebotes en el interior. Esto se consigue utilizando métodos de construcción y aislación particulares para cada tipo de onda a medir los cuales se describirán más adelante a medida que este concepto se oriente a las necesidades del trabajo.

5.1.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo será analizar las características y realizar los cálculos para la eventual construcción de una cámara de estas cualidades. Contar con ello en nuestra Universidad redundaría en beneficios palpables para el alumnado, ya que podrían aplicarse aquí los conceptos obtenidos en marcos teóricos y de laboratorio, como así también como fuente de nuevos ingresos para la institución logrados a través del alquiler a las empresas del sector. Varias materias específicas de la carrera de Telecomunicaciones se verían beneficiadas

con esta facilidad, entre ellas podemos citar a Campos y Ondas Electromagnéticas, Antenas y Propagación, Telecomunicaciones, Medios de Comunicación, Sistemas de Comunicación, Comunicación Satelital, Microondas, Etc.

Llevar adelante un proyecto de estas características, aumentará el prestigio de nuestra Universidad, colocándola como pionera en este tipo de innovaciones tecnológicas.

5.1.2 Restricciones

Los elementos principales para comenzar con el diseño de esta estructura son:

- Conocer el rango de frecuencias que se pretende medir.
- Conocer las dimensiones máximas con las que se cuenta para la construcción del recinto de la cámara.
- Definir el alcance que se le quiere brindar (Académico, industrial, certificación)
- Evaluar técnicas y materiales disponibles para la eventual construcción.
- Evaluar los elementos de medición disponibles y los de certificación necesarios.

5.2 Normativa y marco regulatorio

En este apartado, trataremos lo referente a los conceptos de compatibilidad electromagnética, las interacciones en el ámbito cotidiano y profesional y las limitaciones impuestas que se resumen en los siguientes puntos:

- Regulaciones nacionales e internacionales (límites de tolerancia de potencia, CE)
- Requisitos para certificar
- Organismos que avalan, autorizan y/o certifican

5.2.1 ¿Qué es la Compatibilidad Electromagnética y como se relaciona con nuestro día a día?

En la actualidad nosotros como seres humanos y los elementos que utilizamos de manera cotidiana estamos expuestos a campos electromagnéticos, producto tanto de fuentes naturales (el sol) como de fuentes artificiales (emisores de radiofrecuencia). Dichas fuentes artificiales son las que han sido creadas por el hombre para satisfacer necesidades tales como comunicarse (radio enlaces de microondas terrestres, satelitales), hasta cocinar (horno de microondas). Eso deriva en que sea necesario conocer de cada elemento que se fabrica, tanto sea emisor como aquel que vaya a ser expuesto a las ondas, cuál va a ser el vínculo con el espectro electromagnético y su influencia. Allí aparecen una serie de normativas que determinan el grado de influencia en el medio. Los pilares de dichas normativas están fundados en lo dispuesto por la **Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o IEC según sus siglas en inglés de International Electrotechnical Commission)** la cual determina los estándares referidos a los campos eléctricos, electrónicos y tecnologías relacionadas. Basados en dichas normas, se confeccionan los informes técnicos que regulan el concepto de Compatibilidad Electromagnética, siendo el que actualmente rige el estándar internacional, el informe de la CEI 61000-1-1 el cual se define como *“la capacidad de los sistemas electrónicos y eléctricos o sus componentes para trabajar correctamente cuando están cerca unos con otros. En la práctica, esto significa que las interferencias electromagnéticas producto de un elemento o equipo debe estar limitado y a su vez dicho elemento deberá contar con un adecuado nivel de inmunidad a las interferencias del entorno.”* . Una emisión fuera de norma o una alta vulnerabilidad a las interferencias, generaran consecuencias diferentes dependiendo la sensibilidad del objeto de estudio. En otras palabras, que un teléfono celular sea vulnerable a las interferencias del espectro y tenga un mal funcionamiento debido a ello, reviste una gravedad mucho menor a un marcapaso que sea vulnerable a la interferencia y genere por ello un pulso errado. Para poder determinar justamente cuales son los límites de dicha vulnerabilidad así como cuanto influye en el espectro un dispositivo emisor, es que se determinan estándares según los productos. Para abordar el tema de la

interferencia con el espectro, la **CEI** determinó seis categorías las cuales cuentan con comités dedicados al permanente análisis de productos y sistemas. Dichas categorías se distribuyen dos referidas a la conductividad, dos referidas a la radiación, una a la descarga electrostática y una a las emisiones de alta potencia, incluida la referida a los pulsos electromagnéticos de gran altitud (*HEMP* según su sigla en inglés). La que nos compete a nosotros y desarrollaremos en breve, es la referida a la radiación, puntualmente la que se encarga de los campos electromagnéticos, específicamente en ondas electromagnéticas continuas, moduladas y transitorios. La manera en la que se aplican los estándares de la **CEI** tienen diferentes alcances, desde determinar zonas en las que no se permiten radiaciones de determinados equipos (por ejemplo la prohibición de utilizar un teléfono celular dentro de un avión durante el despegue o aterrizaje), como también la de motivar la generación de filtros o escudos que permitan mitigar la interferencia del medio ambiente y de los demás equipos y sistemas. En definitiva, lo que se busca con ello es que los equipos y sistemas logren funcionar de manera segura con el objeto que fueron diseñados.

5.2.2 Regulación local

En Argentina, la administración y regulación del espectro radioeléctrico está en manos del ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones, antes AFTIC, antes CNC), siendo la encargada de determinar la atribución de bandas y la asignación de frecuencias. La atribución de bandas refiere a las porciones del espectro de radiofrecuencias destinadas para cada uso y servicio. Eso queda descrito en el CABFRA (Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias de la República Argentina) y se basa en la RR UIT-R2 (EDICIÓN 2012) (Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, Región 2). Este cuadro se mantiene actualizado según las bandas vigentes y contiene el detalle de la discriminación del espectro. La asignación de frecuencias se determina mediante el dictado de una resolución o disposición otorgado a un determinado usuario o grupo de usuarios, permitiéndoles de este modo instalar y operar estaciones radioeléctricas en los domicilios en los cuales hayan pedido autorización. Luego, el espectro radioeléctrico es monitoreado por un departamento dentro del ENACOM que es el SNCTE (Sistema Nacional

de Comprobación Técnica de Emisiones), el cual como su nombre lo indica, se encarga de comprobar que solo los entes autorizados sean los que emitan señales al espectro y que las mismas se encuentren dentro de los parámetros normalizados.

En la actualidad, ese control se realiza a través de 20 estaciones fijas y 24 móviles, con las cuales se recorre todo el territorio del país realizando las mediciones, habilitaciones e inspecciones necesarias (fuente: http://www.enacom.gob.ar/control-del-espectro_p328)

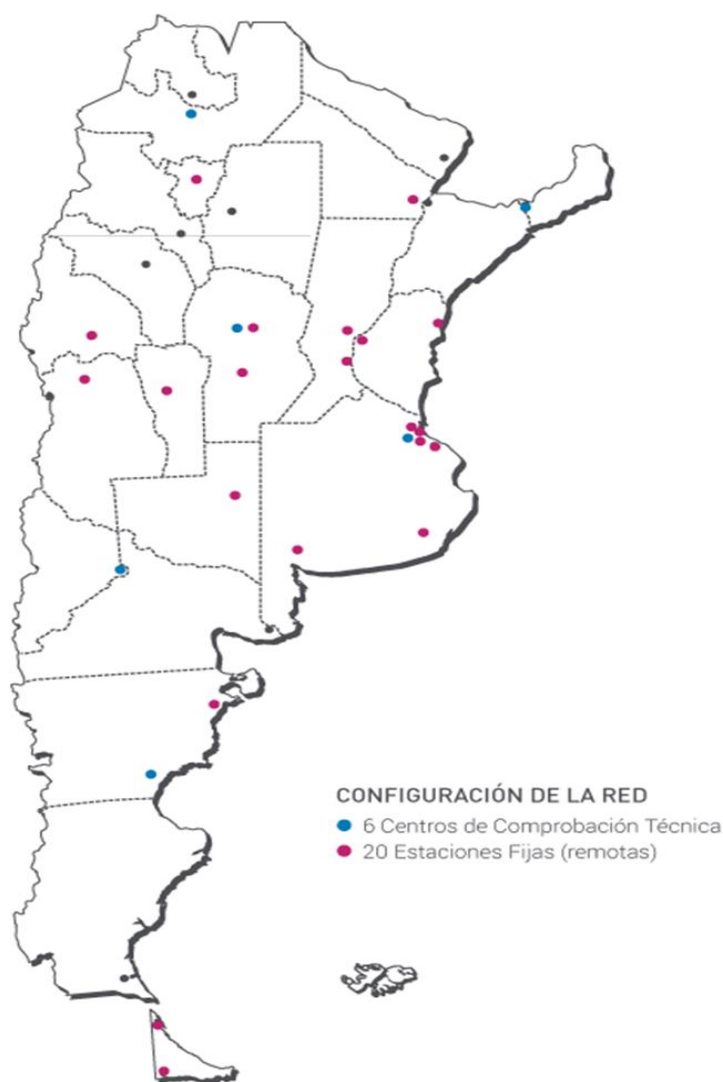


Figura 1: control del espectro

El ENACOM fundamenta sus acciones en cuatro normas principales que rigen la regulación del espectro: Resolución del Ministerio de Salud N°202/1995 (Límites de exposición poblacional para las Radiaciones No Ionizantes); el Decreto PEN N° 2426/2012 (modificatorio y ampliatorio del decreto N°764/2000, Gestión y Control del Espectro); Resolución de la Secretaría de Comunicaciones N° 530/2000 (Adopción de los límites de radiación definidos por el Ministerio de Salud) y la Resolución N°3690/2004 (Protocolo de medición de Radiaciones No Ionizantes)(fuente:http://www.enacom.gob.ar/radiaciones-no-ionizantes_p119/normativas)

Es importante a esta altura, hacer una breve descripción de los dos géneros de radiaciones en las que se divide la administración del espectro ya que de allí parten las normativas mencionadas y las mediciones consecuentes, según lo informado por el ENACOM. Estos dos grupos son el de las Radiaciones Ionizantes y el de las No Ionizantes.

Las Radiaciones Ionizantes (RI) son aquellas ondas de frecuencia extremadamente elevada las cuales contienen una energía fotónica suficiente como para producir la ionización de los átomos y afectar de este modo a los tejidos vivos. Dentro de este rango se encuentran los rayos de tipo X y Gamma).

Las Radiaciones No Ionizantes (RNI) son las que en oposición a las RI, no tienen suficiente energía fotónica como para ionizar la materia y por tanto afectar al estado natural de los tejidos vivos. Dentro de esta categoría se encuentran entre otras la luz ultravioleta, la luz visible y los campos de radiofrecuencia y microondas. Estas RNI se pueden manifestar de manera natural (como por ejemplo, la energía irradiada por el sol) como también de manera artificial como las señales de radio y televisión o los enlaces de microondas satelitales y terrestres. Se destaca como algo importante que las ondas radioeléctricas contempladas dentro de las RNI, aun cuando sean de alta intensidad de potencia no pueden causar ionización en un sistema biológico, es decir, que no pueden alterar la estructura molecular ni celular de un tejido vivo y cuyos límites y consideraciones de exposición están definidos en las diferentes normas fijadas por el ENACOM, principalmente la resolución 202/95 y 530/2000 (fuente http://www.enacom.gob.ar/radiaciones-no-ionizantes_p119)

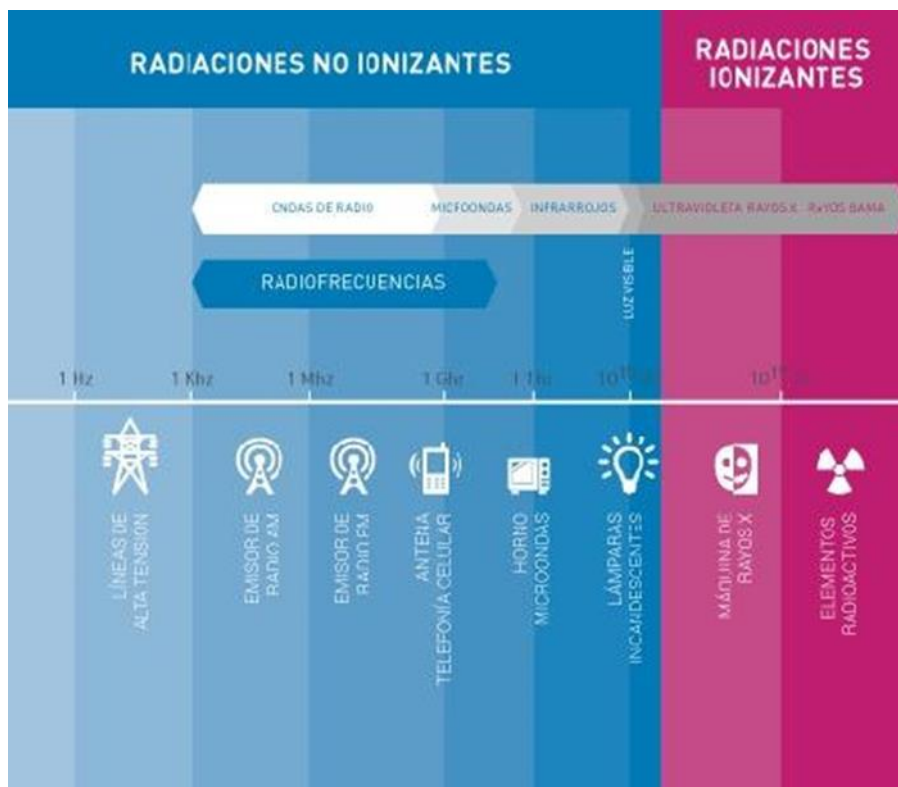


Figura 2: distribución del espectro

TABLA I: distribución del espectro

| SERVICIO | FRECUENCIAS DE OPERACIÓN | POTENCIA IRRADIADA |
|----------------------------|---|---|
| Radiodifusión de AM | 535 - 1705 kHz | Mín 100 W Máx 100 kW |
| Radiodifusión de FM | 88 - 108 MHz | Mín 30 W Max 100 kW |
| Radiodifusión de TV | TV abierta VHF bajo : 54 - 72 MHz (canales 2-4) 76 - 88 MHz (c. 5-6) VHF alto : 174 - 216 MHz (c. 7-13) UHF (en gral. TV codificada, o | VHF : Mín 5 kw en estación autónoma, 50 W en repetidora. Máx 30 kW en transmisor irradiado |

| | | |
|--------------------------|--|---|
| | sea no abierta)512 - 806 MHz (21-69) | hasta 150 kW UHF (codificado, área reducida):aprox. 25 W |
| Telefonía celular | SRMC/STM: 869 - 894 MHz (base) 824 - 849 MHz (móvil) PCS: 1850 - 1910 MHz (móvil)1930 - 1990 MHz (base) | Celdas en zona muy urbanizada: Aprox. 20 WZona rural: máx. 100 W |
| HF | Servicio fijo y móvil (en gral uso comercial): 2 - 30 MHzRadioaficionados:bandas en los rangos de 1,8 - 3,6 - 3,8 - 7 -10 - 14 - 18 - 21 - 25 y 29 MHz | Se especifica potencia pico de envolvente (la potencia media está unos 10 dB por debajo) Uso comercial: máx 160 W Radioafición: máximo 1,5 kW |
| VHF y UHF | [MHz]30 - 50138 - 174242 - 280340 - 399421 - 426443 - 490 | Handies 6 W Móvil 40 WBase 60 WEstos son valores típicos |
| Móvil Marítimo | Rangos HF: 4, 6, 8, 12, 16, 18, 22, 25 MHz Rangos VHF: 156, 0 - 157,5 /160,5 - 162 MHz | HF: aprox. 150 W pico de envolvente VHF: 25 W |
| Móvil Aeronáutico | HF (AM): entre 2 y 30 MHz VHF: 108 - 118 MHz radionavegación (ILS, VOR)118 - 136 MHz comunicaciones móvil - tierra | HF: hasta 400 W PEP (media 100 W) VHF: 20 W |

(Fuente http://www.enacom.gob.ar/atribucion-del-espectro_p409)

5.2.3 Componentes del sistema emisor-receptor, mediciones y homologación

Ya descripto lo relativo a la definición del espectro y su administración, podemos pasar a los componentes que en conjunto con el medio, interactúan de manera activa con el mismo, que son el emisor el receptor de la señal. Para lograr que se conjugue este hecho, el elemento fundamental es la **antena**, que es quien permite la radiación y propagación de la señal electromagnética. Hay una variedad de antenas que dependen tanto de su construcción

como de los elementos que la componen, destacándose entre los modelos más usuales las de tipo parabólica, yagui, direccional, omnidireccional, etc. Esos elementos, las antenas, son los que son principalmente expuestos a las mediciones del objeto de este estudio, las mediciones que pueden tomarse por medio de una **cámara anecoica** o **semi-anecoica**, como en definitiva, será la desarrollada por este trabajo.

En la actualidad, tenemos conocimiento de la existencia en nuestro país de una cámara anecoica perteneciente a la Comisión de Investigaciones Científicas, órgano dependiente del Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, la cual está orientada al estudio de señales sonoras, una cámara anecoica en las dependencias del **CITEDEF** (Instituto de Investigaciones Científicas para la Defensa), orientado a pruebas de laboratorio para entes del estado y particulares, y una cámara semi-anecoica ubicada en las dependencias del **INTI** (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) la cual está destinada al estudio de la compatibilidad electromagnética, siendo según informa el mismo INTI, la única en Sudamérica en su estilo. (fuente: <http://www.inti.gob.ar/noticiero/noticiero98.htm> y http://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/emc/camara_semianecoica.htm).

Los equipos de telecomunicaciones que se utilizan en nuestro país, deben obtener una homologación la que se tramita a través del **ENACOM**. Para obtener dicha certificación, se necesita cumplir con una serie de requisitos entre los que se encuentra la presentación de una carpeta técnica en la que deben incluirse además de los datos de importación y descriptivos del equipo en cuestión, el folleto técnico, el diagrama en bloques del sistema, y los ensayos técnicos realizados. Esto último, en conjunto con la presentación del formulario F5 que detalla qué tipo de norma se ensayó, en qué laboratorio y con qué resultados. Asimismo se solicita en el mismo documento registrar tanto las frecuencias de operación como la potencia de trabajo. Cada una de las normas y resoluciones del **ENACOM** que se pretenden cumplimentar, constan de un protocolo de medición que determina los parámetros de seteo del equipo a ser medido (encontrándose entre los destacados frecuencia de trabajo, modulación y potencia) y la forma e instrumental necesario para obtener los resultados. Si bien no se exigen resultados obtenidos en cámaras de tipo anecoicas o semi anecoicas, sin duda sería un aval de

importancia si se contara con dichas pruebas, las cuales podrían adjuntarse a la carpeta de evaluación técnica. A continuación, se muestra un ejemplo del formulario a llenar y en los anexos se podrán encontrar más ejemplos.

Figura 3: formulario de Homologación

Figura 4: formulario de Homologación

5.3 Marco teórico

5.3.1 Definiciones

Como se dijo anteriormente, el objetivo final de una cámara anecoica es la de lograr un recinto en el cual no se produzca rebote de ondas electromagnéticas y se encuentre aislado de interferencias externas.

Se define como *interferencia* a toda emisión de radiofrecuencia no deseada que interrumpe el libre estudio de una determinada señal. En la vida cotidiana las interferencias se presentan cuando una señal impide que se desarrolle de manera normal una llamada telefónica, o impide ver una transmisión de televisión o la conexión a una red wifi por citar algunos ejemplos.

Por su parte, el *rebote* se presenta en todo tipo de señales (así como la luz de una linterna se refleja en un espejo) pero mientras que en señales de baja frecuencia, su incidencia es insignificante, en la gama de la alta frecuencia para arriba, que serán las del objeto de estudio, ese efecto tiene un fuerte peso en la consideración y afecta a las mediciones por lo que debe al menos atenuarse hasta un valor despreciable. La manera de lograrlo es por medio de la absorción.

El ejemplo más a mano de un recinto como el que se quiere estudiar es el de un estudio de grabación de audio. Allí las paredes están revestidas en su exterior de un material aislante del sonido (cartón corrugado, poliuretano expandido) y en su interior, el revestimiento posee cualidades y geometrías particulares que anulan los rebotes.

Comúnmente se visualizan conos construidos en poliuretano expandido u otros materiales que, según el tipo de onda a anular, tienen diferentes medidas y características geométricas.



Figura 5: paneles absorbentes de radiofrecuencia (fuente: ETS-Lindgren)

La cámara anecoica ideal es aquella que anula el rebote y la interferencia del espectro completo, pero eso es materialmente imposible de realizar, por lo que las cámaras deben sintonizarse a la frecuencia o rango de frecuencias que serán su principal fuente de estudio. Eso se logra eligiendo correctamente los materiales y su geometría.

Las cámaras pueden clasificarse en Anecoicas y Semi-anecoicas.

Las primeras, como principal característica están totalmente recubiertas en su interior por material absorbente, y son comúnmente utilizadas para la medición de patrones de radiación de antenas, ganancia, etc.

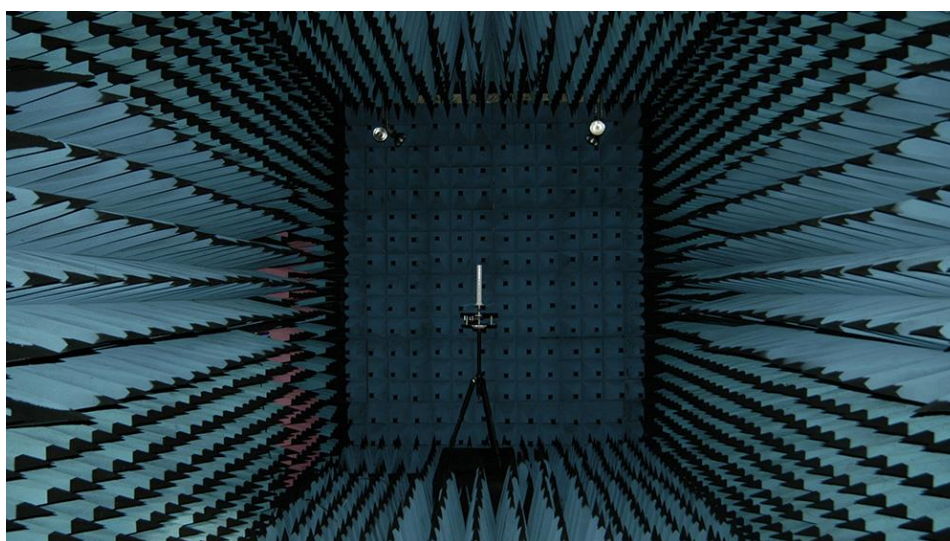


Figura 6: cámara anecoica (fuente ETS-Lindgren)

En cuanto a las semi-anecoicas, éstas están diseñadas y son utilizadas para la medición y certificación de compatibilidad electromagnética.



Figura 7: cámara semi anecoica Fact-3 (fuente ETS-Lindgren)

En el caso objeto de análisis, lo que se pretenderá es evaluar la confección de una cámara anecoica orientada a la medición de microondas, las cuales a diferencia del sonido que se define en el rango de frecuencias de los 20Hz a los 20KHz, estas van de los 0,2 GHz a los 170GHz

Estas ondas de tipo microondas, son capaces de atravesar las paredes de construcción convencional, es por ello que la manera de anular las ondas exteriores, será por medio de la confección de una **Jaula de Faraday**. El interior deberá ser absorbente de las ondas que allí se generan, para lo cual deberá contar con una geometría determinada y un material específico.

La jaula (o cámara) de Faraday, refiere a un recinto cerrado de construcción metálica el cual impide la propagación de ondas electromagnéticas, generando una aislación entre exterior e interior dentro del marco sintonizado



Figura 8: Ejemplo de aislamiento - Jaula de Faraday (fuente: ETS-Lindgren)

Dentro de dicha cámara, se ubicaran los elementos a mensurar (antenas, equipos, etc.), así como instrumental, soportes, posicionadores y demás elementos accesorios, de acuerdo a la siguiente figura:

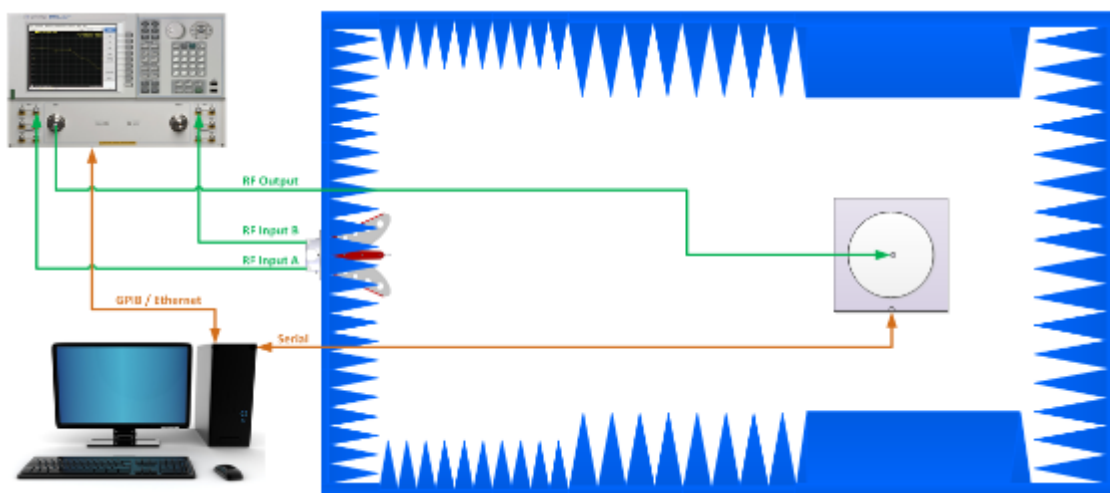


Figura 9: ejemplo de equipos de medición y disposición dentro de la cámara (Fuente: ETS-Lindgren)

5.3.2 Mediciones: Unidades y características

Dentro de las Telecomunicaciones, es muy común hablar de dos magnitudes básicas: Potencia y Atenuación. La primera se refiere a la intensidad con la que una señal es transmitida o recibida, mientras que la segunda refiere al debilitamiento de una señal a lo largo de un enlace.

La unidad más genéricamente utilizada es el **watt (W)** y sus respectivos submúltiplos: miliWatt (**mW; $1 \times 10^{-3} \text{W}$**), microWatt (**$\mu\text{W}$; $1 \times 10^{-6} \text{W}$**), y sucesivos. Debido a que muchos de los rangos dinámicos que se manejan en Telecomunicaciones hacen que o bien se deba cambiar de unidades (ya que un mismo equipo en unas condiciones trabaja en el orden de lo mW y en otra en el orden de los pW) o bien se utilice una sola, por poner el W, pero de una manera incómoda ya que por la misma causa se debe colocar para un mismo estudio en un momento 0,001W y en otro momento 0,00000001W y esto resulta engorroso. Para evitar esta situación, se recurre a una escala logarítmica y allí surge el **decibel (dB)** que se define como **10 veces el logaritmo en base 10 de una determinada magnitud:**

$$10 \times \log(x) \text{ [decibel] [dB]} \tag{1}$$

Luego de allí surgen las siguientes unidades:

$$[\text{dBW}] = 10 \times \log\left(\frac{x}{1 \text{ Watt}}\right) \tag{2}$$

$$[\text{dBm}] = 10 \times \log\left(\frac{x}{1 \text{ miliWatt}}\right) \tag{3}$$

Se desprenden de aquí algunas importantes y usuales apreciaciones.

- Una señal que posee una potencia de 1W es equivalente a decir 0dBW
- Análogamente, una señal de 0dBm, equivale a 1mW
- También se puede ver que 1000 mW equivalen a 1W y también a 30dBm
- En contraposición, 0,001W, equivalentes a 1mW, los son también a -30dBW

Por lo que se ve, esta escala logarítmica permite que las magnitudes queden dentro de un entorno más acotado. Entonces si, por ejemplo, contamos con un sistema que trabaja con

potencias de entre 1mW y 1pW, podemos decir que trabaja entre 0 dBm y -90 dBm (ó -30 dBW y -120dBW) en lugar de tener que escribir 0,001W y 0,000000000001W.

Arribando al tema de la atenuación, en telecomunicaciones es muy importante conocer cuánto se debilita una señal a través de un medio, y esto se escribe de manera genérica como:

$$\text{Atenuación} = \frac{\text{Potencia de entrada}}{\text{Potencia de salida}} \quad (4)$$

$$\text{Atenuación [dB]} = 10 \times \log\left(\frac{\text{Potencia de entrada}}{\text{Potencia de salida}}\right) \quad (5)$$

Por propiedades de los logaritmos:

$$\text{Atenuación [dB]} = 10 \times \log(\text{Potencia de entrada}) - 10 \times \log(\text{Potencia de salida}) \quad (6)$$

Lo que es lo mismo que decir:

$$\text{Atenuación [dB]} = \text{Potencia de entrada [dBW]} - \text{Potencia de salida [dBW]} \quad (7)$$

ó

$$\text{Atenuación [dB]} = \text{Potencia de entrada [dBm]} - \text{Potencia de salida [dBm]} \quad (8)$$

Es decir que **la atenuación expresada en decibeles (dBm ó dBW) se calcula como la resta entre la potencia de entrada y l apotencia de salida.**

Se debe notar que las unidades **dBm** y **dBW** representan valores absolutos de potencia en un determinado punto de un sistema, mientras que la unidad **dB** representa un valor relativo de potencia. Por ejemplo, al decir que un determinado vínculo tiene una atenuación de 3dB, sólo dice que la potencia a la salida del vínculo se encuentra 3dB por debajo de la potencia en la entrada, independientemente de la potencia absoluta que se le inyecte.

Existen valores típicos que siempre es conveniente tener en cuenta. Están entre ellos que:

- Una **atenuación de 2 veces expresada en decibeles:**
 - $At [dB] = 10 \times \log(2) = 10 \times 0,301 = \mathbf{3dB}$
- Análogamente, **una ganancia de 2 veces** (el doble) equivale a **3dB**
- Una **ganancia de 10 veces, equivale a 10dB**

(Fuente: Unidades de Medida en Telecomunicaciones – Teoría de las Telecomunicaciones – Departamento de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Quilmes)

5.4 Antenas

Definición: Una antena se define como un dispositivo al cual se utiliza tanto para emitir como para recibir una señal electromagnética dentro del espacio libre. Se compone básicamente de un elemento conductor al cual se le aplica una determinada señal, como así también es capaz de captar una señal emitida por un dispositivo de similares características.

5.4.1 Clasificación:

La clasificación de las antenas se basa por lo general en una combinación entre el material utilizado para su construcción, la forma, la ganancia y el rango de frecuencia mínima y máxima que garantiza su funcionamiento (**Ancho de banda**).

La característica de la antena está dada principalmente por la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de radiofrecuencia que domina, tanto en emisión como en recepción.

5.4.2 Tipos

La clasificación más básica habla de tres tipos de antenas:

- De cable (o hilo, según la traducción)
- Apertura
- Planas

En alguna bibliografía, se toma la agrupación de antenas (también llamado arrays) como otro tipo.

A continuación, se describirán dentro de cada uno de los tipos, los modelos más usuales.

- Cable: Estas antenas tienen como su nombre lo indica un cable como elemento conductor, en donde su sección es despreciable en referencia al largo utilizado. Dicho largo está dado por la longitud de onda de trabajo, medido en fracciones, siendo el máximo más usual el de una longitud de onda. Se utilizan por lo general en las bandas de MF, HF, VHF y UHF. Entre las más comunes se encuentran:
 - Dipolo
 - Monopolo
 - Antena Espiral
 - Yagui
- Apertura: La característica principal de estas antenas es que permiten direccionar la emisión y la recepción concentrando para ello el haz electromagnético valiéndose de una superficie (o apertura) y contando siempre con un elemento radiante (*feed* o *iluminador*). Dentro de este tipo de antena, se encuentran diferentes diseños, siendo los más usuales los conocidos como Bocina, Parabólica, Radar Doppler. Una de las más usuales son las antenas parabólicas, las cuales poseen una ganancia que está directamente ligada a su tamaño
- Planas:
 - Loop (o Bucle magnético) cerrado: Este tipo de antenas consiste en un cable conductor al cual se le hace un bucle cerrado en sí mismo, como su nombre lo indica. Debido a que por su construcción estas antenas poseen una baja resistencia y una alta reactancia, su impedancia es complicada de asociar con un transmisor y es por ello que normalmente este tipo de antenas es utilizado en equipos receptores (radares).

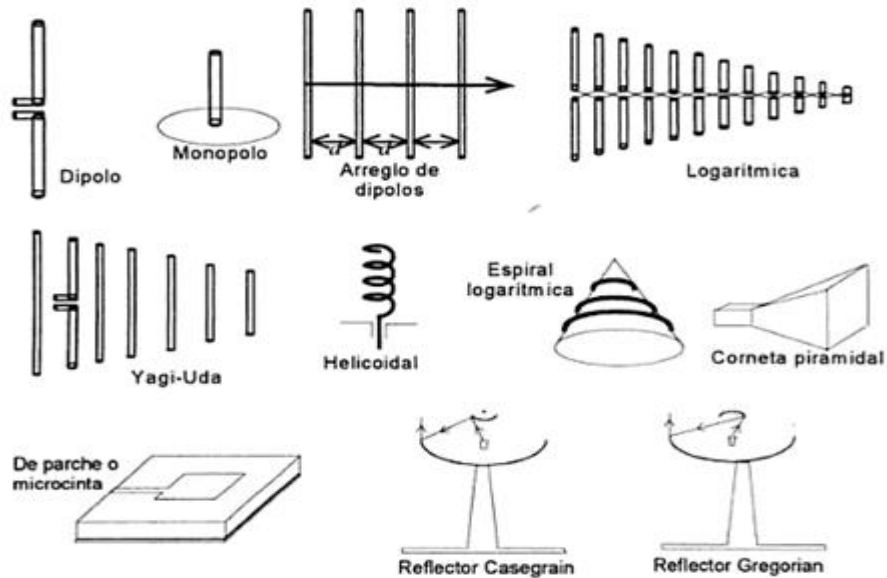


Figura 10: tipos de antenas (Fuente: *The Telecommunications Handbook – Jyrkit Penttinen*)

5.4.3 Diagramas de radiación

Cuando se habla de radiación en una antena, se habla de la capacidad de emitir (irradiar) un determinado campo electromagnético variable, o lo que es lo mismo, una combinación entre un campo eléctrico y uno magnético, los que se propagan a través del espacio transportando energía. Dicho campo está conformado por ondas electromagnéticas.

Para el caso del estudio del comportamiento de las antenas en particular, lo que se desarrolla son los llamados Patrones o Diagramas de radiación. Esta es una representación gráfica que determinan es el comportamiento del campo radiado por la antena y su distribución en el espectro de frecuencias y en el espacio. Por lo general se toman en cuenta lo referido a la densidad de la potencia radiada pero también se pueden hacer estudios específicos que tengan en cuenta otras características como la fase o la polarización. Dichos gráficos pueden realizarse tanto en tres dimensiones como haciendo un corte longitudinal, representarlo en dos dimensiones.

Esta distribución del campo que puede observarse a través de los diagramas, permiten realizar otra clasificación de las antenas ahora por las características de emisión del campo. Eso conlleva a encontrarnos con antenas isotrópicas, directivas, bidireccionales, omnidireccionales, etc.

Los diagramas de radiación tienen como parámetros más importantes:

- Dirección de apuntamiento que es aquella con máxima radiación, directividad y ganancia.
- Lóbulos, son aquellas porciones del diagrama en donde se observan máximos de potencia y están delimitados por regiones de radiación más débiles.
- Lóbulo principal, es aquel que se encuentra en la dirección de máxima radiación
- Lóbulos secundarios, son aquellos otros máximos relativos que no son el principal
- Lóbulos laterales, son los máximos relativos que se encuentran adyacentes al lóbulo principal
- Lóbulo posterior, se encuentra en la dirección opuesta al lóbulo principal
- Ancho del haz principal, se determina en el lóbulo principal a -3dB de la potencia radiada.

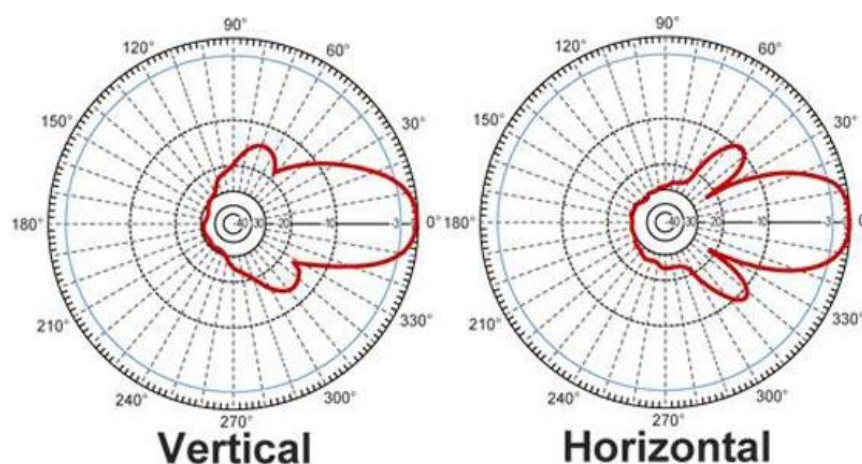


Figura 11: ejemplo de diagrama de radiación de Antenas

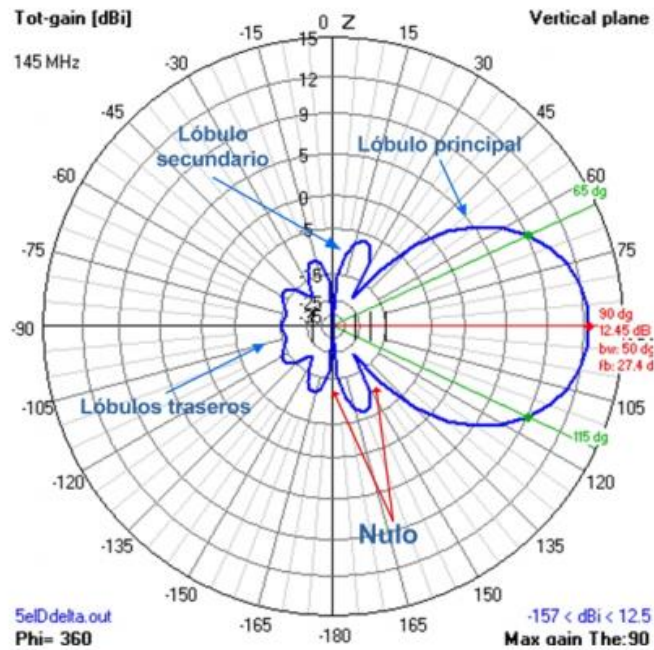


Figura 12: ejemplo de diagrama de radiación polar

5.4.4 Características

Se describen a continuación aquellos aspectos que definen a una antena de otra:

- **Ancho de Banda:** se llama así al rango de frecuencias dentro del cual ciertos parámetros de la antena cumplen con una determinada característica. Este ancho de banda por cada parámetro de la antena, existiendo por tanto un ancho de banda de impedancia, de ganancia, de polarización y del parámetro que se desee valorar
- **Directividad:** En las antenas este parámetro se refiere a la relación entre la intensidad de radiación de la antena en estudio en la dirección del máximo respecto de la intensidad de radiación de una antena isotrópica. Se recuerda que una antena isotrópica no existe en la realidad, sino que es un concepto teórico que define a una antena ideal, puntual, que irradia energía en todas las direcciones de manera uniforme. La directividad entonces, es un parámetro que

no posee unidades (ya que relaciona dos valores de la misma unidad: Potencia) y suele expresarse en unidades logarítmicas $D [dB]=10*\log(U(max)/U(iso))dB$

- **Ganancia:** Este término refiere a cuanta potencia es transmitida en la dirección de máxima radiación en relación a una fuente isotrópica. El valor real de la ganancia de una antena se encuentra dentro de las especificaciones propias de cada fabricante y se obtiene mediante ensayos de laboratorio. El valor de la ganancia por lo general se encuentra expresado en dB, dBm o veces. La forma de interpretarlo es la siguiente, si la característica de una antena dice que posee una **ganancia** de 3dB, lo que significa es que la potencia recibida lejos de la antena será 3dB superior de lo que sería recibida por parte de una antena isotrópica con la misma potencia de entrada. La ganancia real de una antena puede estar en el orden de los 40 a 50 dB en el caso de parabólicas de gran diámetro, como en escasos 1,5 dB en antenas de dipolo corto. En teoría, la ganancia de una antena nunca debería estar por debajo de 0 dB.
- **Eficiencia:** Se define de este modo a la relación entre la potencia entregada y la potencia disipada por la antena. Se encuentra una alta eficiencia en una antena cuando es irradiada la mayor parte de su potencia de entrada. Por el contrario, se habla de baja o pobre eficiencia cuando la mayoría de la potencia es absorbida como pérdida o reflejada debido a una incorrecta adaptación de impedancias. Las pérdidas generalmente se deben a fallas en los conectores o los dieléctricos.

El cálculo de la eficiencia se escribe como $\epsilon_r = \frac{P_{irradiada}}{P_{entrada}}$ (9)

Dicha relación solo puede proveer un número entre 0 y 1, siendo presentada generalmente en forma de porcentajes (0,5 = 50%) o en decibeles (0,1=10%= -10dB ó 0,5=50%=-3dB). Este es un valor muy importante a la hora de definir una antena. Puede ser de una eficiencia muy cercana a 100% (0dB) en antenas parabólicas o dipolos de media longitud de onda construidos con materiales de baja pérdida. Las antenas caseras de wifi o de telefonía móvil, poseen una eficiencia que va del 20% al 70% (-7 a -1,5 dB). Entre las de menor eficiencia se

encuentran las antenas de AM de los autos, las cuales poseen una eficiencia de 1% (-20dB) y esto es debido a que las dimensiones de las antenas son muy inferiores a la mitad de la onda de frecuencia. Esto es compensado utilizando transmisores de mucha potencia.

- Impedancia de Entrada: Este es un concepto que se encarga de relacionar la tensión y la corriente a la entrada de la antena tal como lo explicita la ley de ohm a través de la forma y materiales utilizados en su construcción. El valor de impedancia obtenido contendrá una parte real y una imaginaria. La parte real representará la porción de potencia que logrará ser irradiada, mientras que la imaginaria mostrará la potencia absorbida o no irradiada, la pérdida. Si la antena posee una impedancia solo compuesta de parte real (lo que significará que tanto la tensión como la corriente se encuentran en fase) no tendrá pérdida y se identificará como “resonante”. La realidad es que la impedancia de entrada de una antena será diferente según la frecuencia de la señal de entrada, por lo que nos interesará lograr la mejor relación dentro del rango de frecuencia a utilizar.
- Apertura de haz: Este concepto está ligado al diagrama de radiación y se puede definir como el ancho del haz a la -3dB, lo que es lo mismo que decir a un valor de potencia igual a la mitad de la potencia máxima en la dirección de radiación principal.
- Polarización: Siendo que las antenas crean campos eléctricos radiados lo que define este concepto es la figura geométrica que traza el extremo del vector *campo eléctrico* en una cierta dirección y a una cierta distancia, al variar el tiempo. La polarización puede ser lineal, circular o elíptica. La circular o elíptica puede ser a derecha o a izquierda. La lineal puede ser vertical, horizontal, +45°, -45°. Luego de este concepto, se desprende el coeficiente de desacoplo por polarización, el cual refiere a la cantidad de potencia que es capaz de recibir una antena polarizada de una forma proveniente de una polarización distinta o directamente opuesta.

- Relación delante/atrás: Este concepto define a la relación que existe entre la potencia máxima radiada en una determinada dirección geométrica y la radiada en el sentido opuesto. Este parámetro es de suma utilidad cuando resulta crítica la interferencia hacia atrás en la elección de una antena. Este parámetro además muestra de forma indirecta cuán eficiente es la antena en rechazar las señales provenientes de su parte trasera, entendiéndose éstas como interferencias.
- Resistencia de radiación: Al aplicársele una determinada potencia a una antena, parte de ella es irradiada y parte se disipa transformada en calor. La resistencia de radiación refiere a la representación de una resistencia capaz de disipar el mismo calor que el que disipa la antena. La manera de obtener este valor es dividiendo la potencia radiada por la antena por el cuadrado de la corriente en su punto de alimentación $R_r = \frac{P}{i^2}$. (10)

Con este concepto también se puede obtener la eficiencia de la antena siendo que es la relación entre la potencia radiada y la disipada.

- Campo lejano: Como ya se ha abordado, el campo magnético radiado por una antena está conformado por diferentes componentes de campo eléctrico y magnético las cuales sufren una atenuación a partir del incremento de la distancia r entre la fuente y el receptor. Las principales componentes son la del campo cercano radiante (o de Fresnel) la del campo cercano reactivo (o de Rayleigh) y las del **campo lejano (también llamado de Fraunhofer)**. Nos detendremos en este último ya que de allí partirán ciertos cálculos necesarios para nuestro análisis. Este llamado Campo lejano disminuye según el factor $1/r$ y se considera que en dicho punto, el EM posee los campos eléctricos y magnéticos en fase, formando un ángulo recto entre sí en un mismo plano perpendicular a la dirección de propagación, y sus amplitudes variando en una proporción constante. Por lo general, se considera que estas condiciones se encuentran a una distancia mínima $R = \frac{2D^2}{\lambda}$ (11)

tomando a D como la máxima dimensión lineal de la antena en cuestión. Ahora bien, en el caso de las antenas de radiodifusión se debe considerar que:

- Esta ecuación se obtuvo a partir de antenas planas
- Se supone que D es un valor elevado respecto de λ
- Si no se satisfacen las condiciones anteriores, deberá considerarse como condición de campo lejano a una distancia superior a 10λ

(fuente: Recomendación UIT-R BS.1698)

5.5 Materiales:

En este punto abordaremos los diferentes tipos de materiales, que por su concepción, resultarán, conductores, aislantes o absorbentes de la Radio Frecuencia

Como se dijo anteriormente, el medio ideal para la propagación y la medición de ondas electromagnéticas es el vacío; siendo el aire el siguiente medio con una propagación casi ideal

Pero las ondas electromagnéticas, por sus características, son capaces de atravesar cuerpos, medios y materiales

5.5.1 Tipos de materiales - Aislantes y absorbentes

Como una cámara anecoica tiene como objetivo, reproducir o recrear (dentro de un recinto determinado y accesible) un medio ideal para realizar mediciones (**OATS** Open-Area Test Sites), se deberán determinar los materiales para la construcción de la cámara, distinguiéndose los materiales AISLANTES para el **recubrimiento exterior** que conformarán la Jaula de Faraday (o blindaje electromagnético) y los materiales ABSORBENTES del **recubrimiento interior** de la cámara (paneles absorbentes)

5.5.2 Materiales Aislantes - Exterior - Jaula de Faraday

Una Jaula de Faraday es una superficie conductora (malla) que rodea un medio (hueco) a aislar, y que impide que campos electromagnéticos del exterior, perturben el interior de la misma.

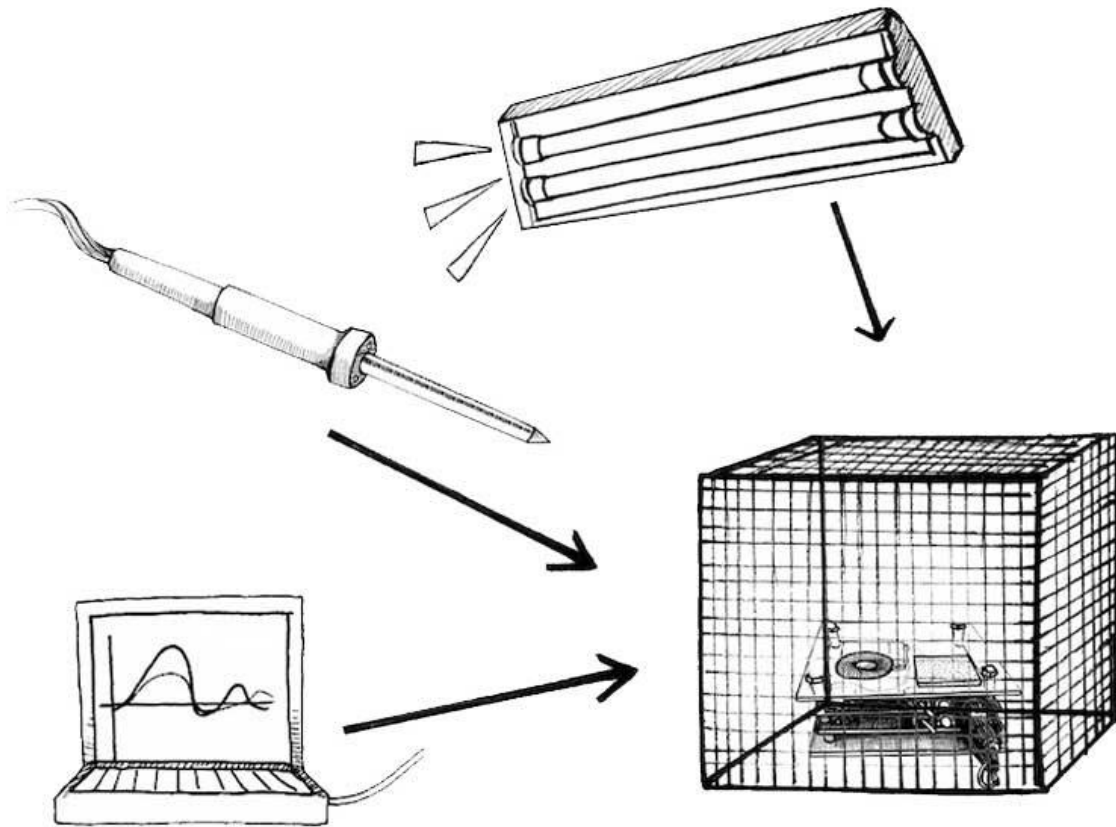


Figura 13: Jaula de Faraday

Por esto, es importante la selección de los materiales del exterior de la cámara, para que se consiga una atenuación de los campos incidentes, obteniendo dentro de la cámara un espacio libre de cualquier interferencia electromagnética.

Los materiales paramagnéticos son los ideales para el diseño de una Jaula de Faraday. Recordemos que los llamados paramagnéticos son aquellos materiales o medios cuya permeabilidad magnética es similar a la del vacío, ya que por sus características, mientras que no estén sometidos a un campo, los momentos dipolares no tienen interacción, pero apenas son sometidos a un campo electromagnético, los dipolos se orientan hacia el mismo sentido del campo.

Entre los materiales a seleccionar para la construcción de la cubierta de la cámara, podremos optar entre:

- Aluminio
- Cobre
- Hierro Galvanizado o zincado

Siendo éste último la opción más viable, no solo por su bajo costo, sino también por su maleabilidad, bajo peso y durabilidad.

5.5.3 Materiales absorbentes (de radiofrecuencia) - Interior

El correcto funcionamiento de la cámara anecoica dependerá en gran medida de los materiales absorbentes del interior, puesto que este material será el que tendrá como finalidad reducir o minimizar las reflexiones internas y poder así simular un espacio libre.

Electromagnéticamente los conductores se clasifican como Materiales Conductores, Semiconductores y Dieléctricos (no conductores). Como los dos primeros listados son materiales que producen reflexión de ondas, se optará por los materiales DIELECTRICOS

Los materiales DIELECTRICOS no tienen conductividad debido a su alta *resistividad*; por consiguiente, impiden que los protones y electrones (portadores de energía) se muevan libremente.

A su vez, los materiales DIELECTRICOS poseen una característica que es la capacidad de almacenar cargas entre capas. Esta característica es la denominada *constante dieléctrica*, que es la relación de la permitividad del material y la del vacío

Para que un material ABSORBENTE cumpla correctamente su función, deberá tener:

- Alta resistividad Eléctrica
- Alta resistividad Dieléctrica
- Bajo factor de pérdida
- Baja Constante dieléctrica

TABLA II: constantes dieléctricas de materiales dieléctricos

| Materiales | Constante dieléctrica | Factor de Pérdida |
|-------------------|------------------------------|--------------------------|
| Polipropileno | 2.20 - 2.28 | 0.0002 - 0.002 |
| Siliconas | 3.4 - 4.3 | 0.001 - 0.004 |
| Mica | 5.4 - 8.7 | 0.0001 - 0.0004 |
| Nylon | 3.5 - 3.6 | 0.04 |
| Poliestireno | 1.02 - 1.12 | 0.0001 - 0.002 |
| Poliuretano | 8.0 - 10.0 | 0.002 - 0.0009 |
| Alúmina | 8.0 - 10.0 | 0.0001 - 0.0009 |
| Goma Dura | 2.95 - 4.0 | 0.007 - 0.028 |

TABLA III: resistividad de materiales dieléctricos

| Materiales | Resistividad ($\omega \cdot m$) |
|-------------------|---|
| Polipropileno | 10^{14} |
| Siliconas | 10^9 |
| Mica | 10^{11} |
| Nylon | 10^{13} |
| Poliestireno | 10^{13} |
| Poliuretano | 10^{14} |
| Alúmina | 10^9 |
| Goma Dura | 10^{11} |

Revisando las tablas, y viendo los materiales utilizados por los fabricantes de paneles aislantes, llegamos a la conclusión que uno de los materiales recomendados es el Poliuretano (poliuretano expandido en forma de placas o paneles)

Absorbentes Piramidales y de Cuña: Estas placas de Poliuretano, generalmente están embebidas con materiales de carbono, lo cual incrementa su capacidad de absorción de

microondas. Inicialmente se les hace un tratamiento para que sean ignífugas y no las afecte la humedad, y luego se las impregna de una solución de carbono.

Estas placas se encuentran en diversas medidas y formas, siendo las más comunes las del tipo Piramidal (Figura 14) y de cuña (Figura 15).

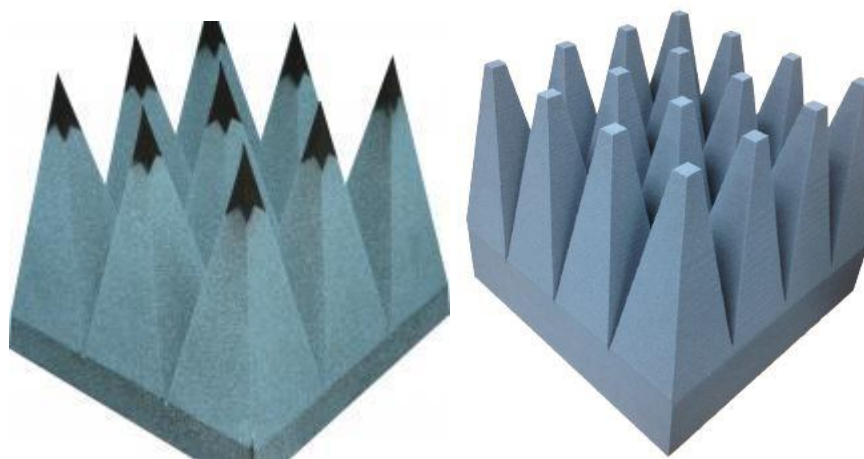


Figura 14: paneles absorbentes del tipo piramidal

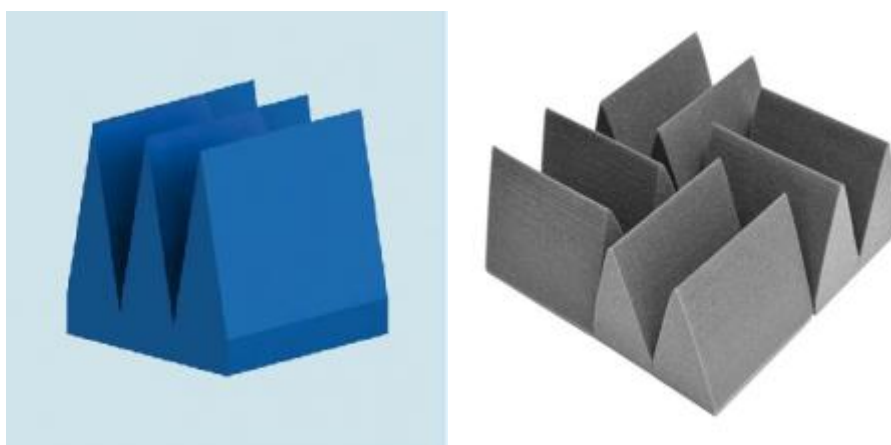


Figura 15: panel absorbente de tipo cuña

Existen en el mercado varios proveedores de paneles y elementos de construcción de cámaras anecoicas. Podemos citar a MGV, Frankonia y ETS-Lindgren, entre otros. Los

valores típicos y especificaciones de un modelo de panel piramidal puede observarse en la TABLA IV:

TABLA IV: valores típicos de paneles piramidales (ETS-Lindgren)

| MODEL NUMBER | 80 MHz | 120 MHz | 200 MHz | 300 MHz | 500 MHz | L-BAND 1-2 GHz | S-BAND 2- 8GHz | C-BAND 8-12 GHz | X-BAND 8-12 GHz | KU-BAND 12-18 GHz | K-BAND 18- 0 GHz |
|--------------|--------|---------|---------|---------|---------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| EHP-3PCL | | | | | | | | -30dB | -40dB | -45dB | -45dB |
| EHP-5PCL | | | | | | | -30dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB |
| EHP-8PCL | | | | | | -30dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EHP-12PCL | | | | | | -35dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EHP-18PCL | | | | | -30dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EHP-24PCL | | | -20dB | -30dB | -35dB | -40dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EHP-36PCL | -11dB | -13dB | -25dB | -30dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EHP-48PCL | -15dB | -20dB | -30dB | -35dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EHP-72PCL | -20dB | -30dB | -40dB | -40dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB |
| EMC-24PCL | -6dB | -6dB | -7dB | -30dB | -35dB | -45dB | -50dB | -50dB | -50dB | -50dB | -45dB |

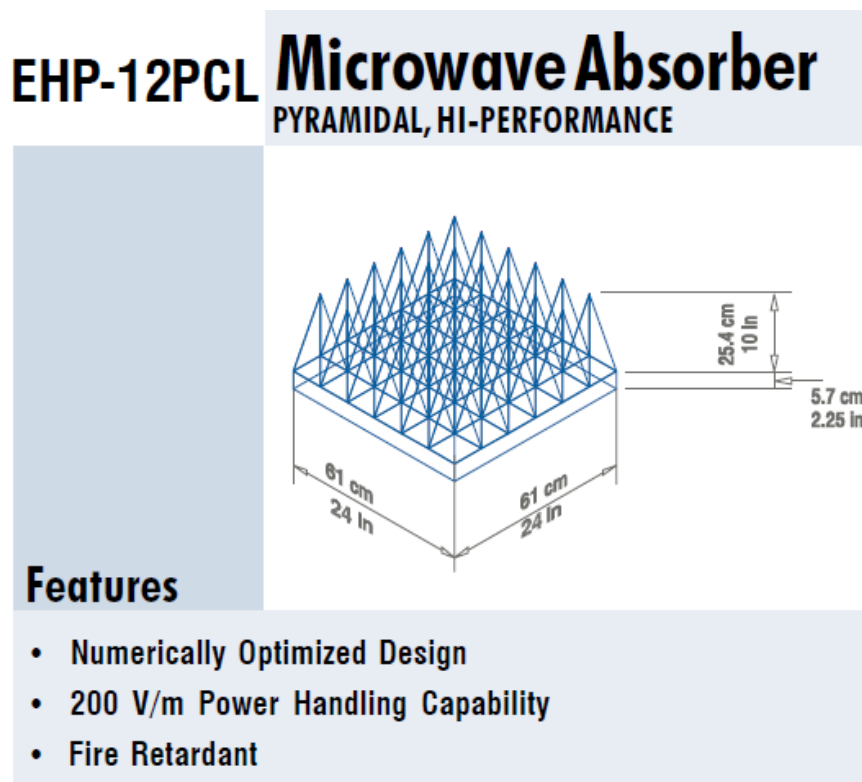


Figura 16: panel absorbente EHP-12-PCL (ETS-Lindgren)

| MODEL | | EHP-12 PCL |
|------------------------|---------|--|
| Absorber Footprint | | 61 cm x 61 cm (24 in x 24 in) |
| Absorber Height | Overall | 31.1 cm (12.25 in) |
| | Base | 5.7 cm (2.25 in) |
| | Pyramid | 25.4 cm (10 in) |
| Pyramid Base Dimension | | 10.2 cm x 10.2 cm (4 in x 4 in) |
| Pyramids per Absorber | | 36 |
| Weight (1 piece) | | 3.8 kg (8.4 lb) |
| Absorbers per Carton | | 6 |
| Carton Dim. L x W x H | | 63.5 cm x 63.5 cm x 132 cm (25 in x 25 in x 52 in) |

Measured Reflections at Normal Incidence

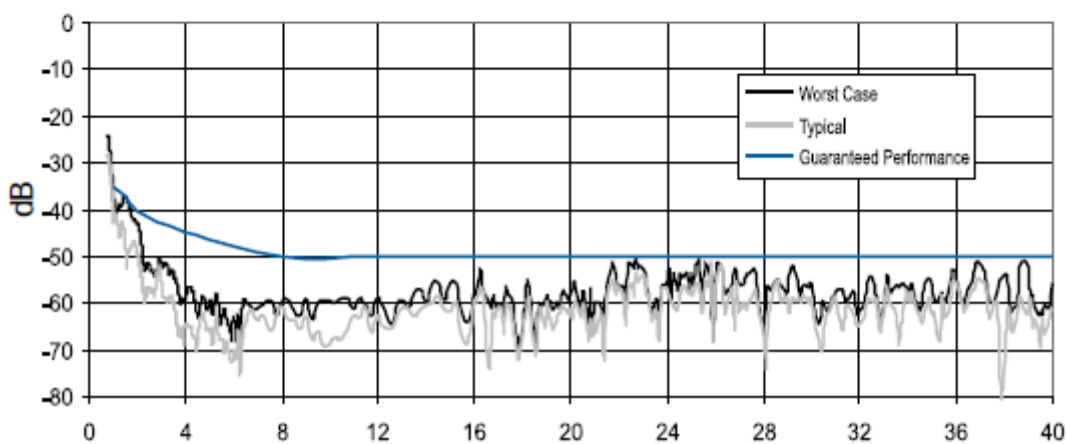


Figura 17: especificaciones y reflectividad de panel absorbente EHP-12-PCL (fuente: ETS-Lindgren)

Placas de Ferrite: En cuanto a las baja frecuencia (30 a 1.000-MHz), se han desarrollado una serie de materiales optimizados para este tipo de aplicación, siendo el ferrite el material más común y su uso, en forma de placas o tejuelas (Figura 18) se ha popularizado en el diseño y armado de cámaras anecoicas. Estas placas (o tejuelas) típicamente vienen en espesores que van desde los 6 mm hasta los 100 mm. Las placas de ferrite generalmente vienen tratadas para ser inmunes al fuego y a la humedad.

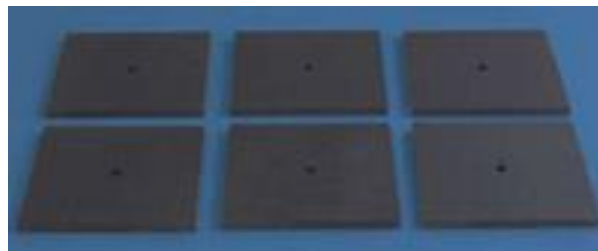


Figura 18: aislante de ferrite (placas)

Este tipo de aislante también se los puede conseguir en forma de grilla o cerámicas grilladas, desde una pulgada de espesor, como se observa en la figura 19

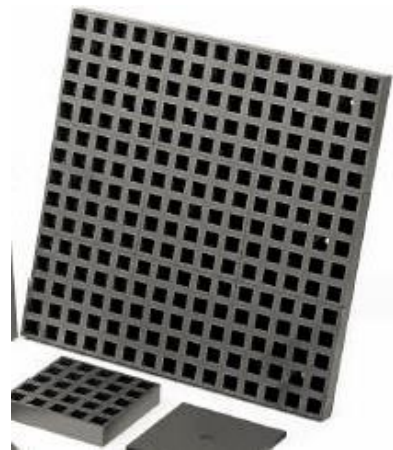


Figura 19: aislante de ferrite (Cerámica grillada)

Estos materiales son de un peso considerable, por lo cual, debe tenerse en cuenta el peso del total de las placas en el momento del diseño de la estructura de la cámara.

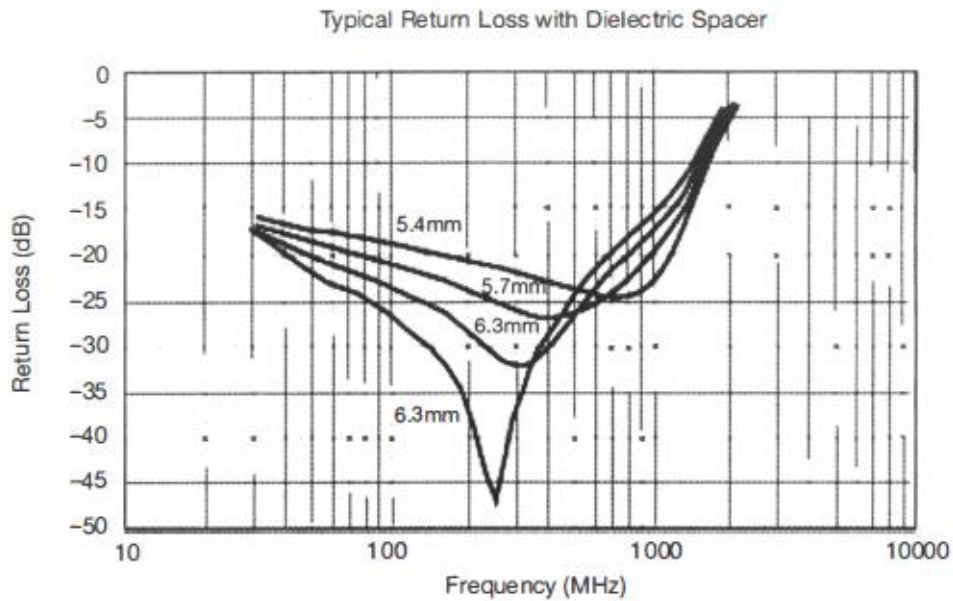


Figura 20: respuesta (en dB) de las Placas de ferrite

Paneles absorbentes de piso: Para el recubrimiento de piso de la cámara (zona de tránsito y de trabajo) se han desarrollado una serie de paneles absorbentes de espuma de baja densidad que tiene encapsulado en su interior absorbentes piramidales (o de cuña, según el diseño) el cual proporciona en su parte superior una de paso resistente al peso, a la suciedad y a la humedad, lo cual facilita su uso y su mantenimiento. Este tipo de absorbente puede observarse en la figura 21:

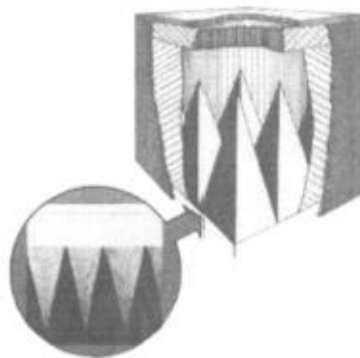


Figura 21: panel de piso (Walkway Absorber)

Los valores típicos y especificaciones de este tipo de paneles se pueden observar en la tabla V:

TABLA V: valores típicos de paneles de piso

| Type | Thickness, cm (in.) | Load Rating, kg/m ² (lb/ft ²) | Reflectivity Performance at Normal Incidence, GHz | | | | | | | |
|-------|---------------------|--|---|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| | | | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 3.0 | 6.0 | 10.0 | 15.0 | 30.0 |
| WW-4 | 14.0(5.5) | 61.5 (300) | | | | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| WW-8 | 23.3(9.5) | 61.5 (300) | | | 20 | 27 | 35 | 40 | 40 | 40 |
| WW-12 | 36.8(14.5) | 61.5 (300) | | | 20 | 30 | 35 | 40 | 40 | 40 |
| WW-18 | 54.6(21.5) | 82.0 (400) | | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 40 | 40 |
| WW-24 | 61.0(29.5) | 82.0 (400) | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 40 | 40 | 40 |

Note: Power rating is 0.08 watts/cm²(0.5 watts/in.²). Base dimensions are 0.61 m² (2 ft²).

Absorbentes Híbridos: dado que las placas de ferrite tiene un muy buen comportamiento a bajas frecuencias y los absorbentes o paneles piramidales lo son en altas frecuencias, se desarrolló un absorbente que combina las placas de ferrite y el absorbente piramidal (figura 22). Este tipo de propiedades del absorbente es ideal y utilizado para mediciones de CE (Compatibilidad Electromagnética), ya que tiene una muy buena absorción en el rango de frecuencias de 30 MHz hasta 1 GHz. De esta manera, se obtiene una buena reflectividad a bajas frecuencias y excelentes valores (superiores a los -40 dB) en altas frecuencias.

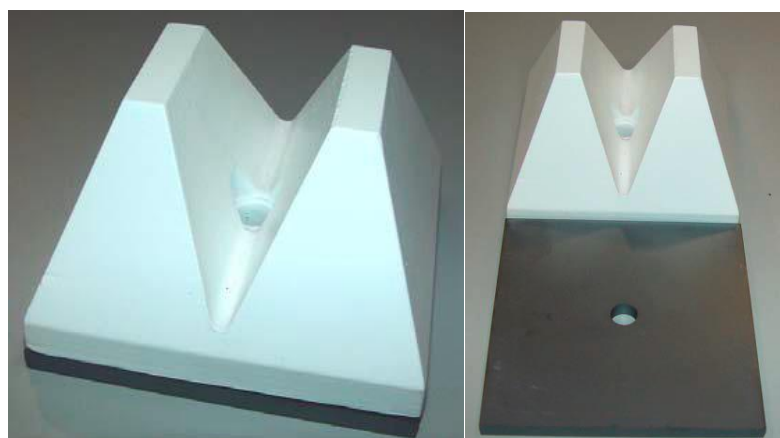


Figura 22: panel absorbente híbrido

TABLA VI: valores típicos de Absorbentes Híbridos

| Type | Height, m (in.) | Typical Absorber Performance at Normal Incidence, MHz | | | | | |
|--------|--------------------|---|----|-----|-----|-----|------|
| | | 25 | 50 | 100 | 250 | 500 | 1000 |
| P-12EM | 0.3(12) | 2 | 4 | 9 | 19 | 26 | 32 |
| P-18EM | 0.46(18) | 3 | 6 | 11 | 21 | 29 | 35 |
| P-24EM | 0.61(24) | 4 | 8 | 14 | 26 | 32 | 38 |
| P-36EM | 0.92(36) | 6 | 12 | 21 | 30 | 36 | 41 |
| P-48EM | 1.22(48) | 9 | 16 | 27 | 34 | 39 | 44 |

Note: Above 1000 MHz the performance of the EM series is essentially the same as the standard pyramidal material. The base dimensions are 0.61 m² (24 in.²).

5.6. Teoría del diseño

Basado en las limitaciones de espacio, banda de frecuencia de trabajo y, eventualmente, presupuesto, se elegirá un método de cálculo de los descriptos en el marco teórico y se desarrollarán los mismos.

En sus inicios, el diseño de cámaras anecoicas se basaba en métodos empíricos basados en prueba y error de distintas superficies y materiales absorbentes. A medida que se avanzó con el diseño de materiales absorbentes, surgieron diferentes métodos de cálculo de cámaras

Entre otros, podemos mencionar métodos de análisis, cálculo y diseño como el Método de trazado de Rayos y la Técnicas de las imágenes

Cualquiera sea el método a utilizar, siempre de deberá tener en cuenta los siguientes puntos:

- Tipo de medición a realizarse
- Frecuencia de operación
- Espacio disponible
- Altura de la cámara
- Tipo y geometría de la cámara

5.6.1 Método de trazado de Rayos

Dentro de este método podemos describir dos tipos de técnicas:

- Técnicas de las imágenes
- Técnica de la trazado de rayos

El procedimiento de **trazado de rayos** tiene, entre otras, la ventaja de que puede ser usado para estimar la señal reflejada y así determinar el peor caso de nivel de señal

Esto permite medir y determinar el ángulo de incidencia para contrastar con el coeficiente de reflexión del absorbente (dato proporcionado por el fabricante).

El análisis parte de situar la antena patrón y la antena bajo prueba sobre un eje longitudinal. La energía que se propaga desde la antena patrón hacia la zona de prueba puede descomponerse en varios trayectos, tal como se puede observar en la Fig. n1

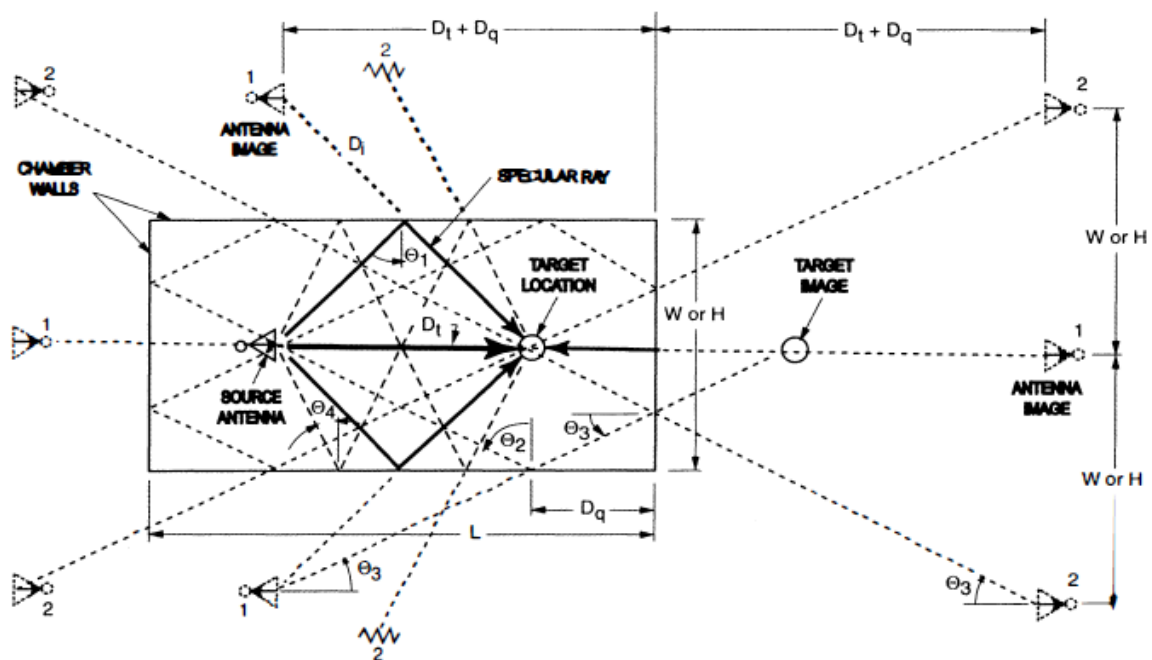


Figura 23: múltiples trayectorias dentro una Cámara Anecoica

Los rayos más importantes son los que están en línea continua y que alcanzan a la región de prueba. El primero en importancia es el de trayectoria directa, que va desde la antena patrón hasta la región de prueba. Luego, le siguen en importancia los *rayos especulares* con reflexión simple desde las paredes laterales, el techo y el piso

Suponemos nulo cualquier cambio de fase en los rayos causados por la velocidad de propagación del absorbente, el cual, es más lento que el del espacio libre. Y que el rayo especular de la pared de fondo, iluminado por el lóbulo principal de la antena patrón es de una reflexión simple o mejor dicho, con un solo rebote. Y en cuanto a los rayos de dos saltos, los que se reflejan en las paredes laterales y al de fondo, son descompuestos en factores.

5.6.2 Técnica de las Imágenes

Se parte desde la pauta de que todos los rayos reflejados pueden ser analizados como si estos hubieran venido de una imagen de la antena patrón. A estas imágenes se las identifica, como podemos ver en la Figura n1, con líneas de puntos. Cada una de las imágenes *especulares* o imágenes de las antenas, son identificados por un número.

En cuanto a las imágenes de un solo salto, o reflexión simple, se tratan solamente de la imagen del reflejo de la antena patrón en la pared donde el rayo se proyecta, es decir, como si se viera su reflejo en un espejo.

Las Imágenes con doble salto, son las que están asociadas a una doble reflexión, y están formadas por la imagen de la antena patrón reflejada en una de las paredes laterales y luego en la pared de fondo.

Siguiendo con este análisis de esta forma, este proceso puede ser replicado hasta el infinito explicando múltiples rebotes. Estas imágenes reflejadas serán cada vez menores a medida que haya más rebotes pues el rayo se atenúa en cada punto de reflexión.

5.6.2.1 Ventajas de la Técnica de Imágenes

Una de las ventajas de esta técnica es la facilidad con la cual los rayos pueden ser dibujados y a posterior analizados. La línea que se genera uniendo la cada imagen de primer orden (un solo salto) con la antena real, es perpendicular a la pared lateral. Y la antena real y

su imagen, son equidistantes de la pared. Del mismo modo, las imágenes de primero orden son representadas en otras paredes para formar las imágenes de segundo orden (dos saltos).

Si volvemos a observar la imagen n1, podemos observar que la línea dibujada desde cada imagen a la antena bajo prueba (blanco), define la dirección de incidencia sobre el blanco y define también el punto de inflexión especular en la pared. Mediante cálculos geométricos simples se puede obtener el alguno de incidencia sobre el absorbente. Por ejemplo, sobra la imagen de doble salto que se observa en la parte baja de la FIGURA n1, podemos calcular:

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{W}{D_t + 2D_q}\right) \tag{12}$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{3\text{ m}}{2\text{ m} + 2(1\text{ m})}\right)$$

$$\theta_3 = 36,8 \text{ grados}$$

Donde:

W Es el ancho de la cámara, suponemos para el este cálculo, una cámara de 3 mts de ancho

D_t Es la longitud entre las dos antenas (R). De la ecuación de campo lejano (11) obtenemos que la distancia mínima será de 2 mts

D_q Es la distancia desde la antena de prueba hasta la pared posterior, suponemos 1 metro

Por tanto, el ángulo de incidencia θ_2 es el complemento de θ_3 , es decir:

$$\theta_2 = 53,2 \text{ grados}$$

Es necesario considerar el efecto de la antena patrón y su directividad. La antena patrón debe estar alineada de modo tal que su módulo principal esté dirigido hacia el eje de la región de prueba. De este modo, la radiación de la antena “ilumina” las paredes con amplitudes débiles. Entonces, las Atenas Imagen tendrán un patrón similar al de la antena

patrón e igual ángulo. Por tanto, la ganancia de la antena, medida en decibeles, es sumada algebraicamente a la reflectividad de la pared.

Como habrá una diferencia de longitud de trayectorias, entre los rayos directos y los reflejados, se deberá tener en cuenta el factor de propagación P , que de cada rayo reflejado es:

$$P = 20 \log \left(\frac{Dt}{Di} \right) \text{ (dB)} \quad (13)$$

Donde:

Dt = distancia desde la antena patrón a la ubicación del blanco

Di = distancia de la imagen, desde ella a la ubicación del Blanco

el factor de propagación P es sumado a la Ganancia de la Antena (G), y al coeficiente R de reflexión de la pared, y así se obtiene la amplitud de cada rayo reflejado. Este Factor es expresado en decibeles y está dado por:

$$T = R + G + P \text{ (dB)} \quad (14)$$

Donde:

T = potencia de cada rayo de las diferentes trayectorias respecto del rayo directo, medido el decibeles

R = coeficiente de reflexión del rayo sobre el absorbente

G = Ganancia de la antena patrón

P = propagación (en decibeles) respecto del rayo directo

5.6.3 Cálculo y diseño

Para el diseño y cálculo de una cámara anecoica, es fundamental definir, por un lado el tipo de medición y rango de frecuencias a medir, y fundamentalmente tamaño de antenas a

medir. Estos valores estarán limitados en cierta forma por el ámbito o recinto (medidas) disponibles y el diseño de la cámara.

Para este proyecto, se nos definió un ámbito de trabajo o sala de las siguientes dimensiones:

- Ancho de la cámara: 3 metros
- Alto de la cámara: 3 metros
- Largo de la cámara: 5 metros.

En cuanto al rango de frecuencias, se determinó (por el tipo de instrumental de medición disponible) a valores comprendido entre los 800 Mhz a 5,8 Ghz

El primer punto que debemos ver que se cumpla, es la ecuación de campo lejano, la cual nos ayudará a establecer la distancia mínima entre antenas (patrón y bajo pruebas) y la distancia de ellas con las paredes de la cámara anecoica

5.6.3.1 Determinación del campo lejano R

Utilizando la ecuación de campo lejano, y haciendo un cálculo rápido podemos determinar, el diámetro máximo y admisible de antenas a medir y que las medidas de la cámara sean aptos para tal medición

Recordando que la Ecuación de Campo lejano es:

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

Donde:

R Es la distancia o separación (mts)

D Es el diámetro de la antena utilizada (mts)

λ Es la longitud de onda (mts) = 300 / Frecuencia de trabajo (MHz)

Por tanto, para una frecuencia de 0,8 GHz y de 5,8 GHz, y antenas de 0,3 y 0,15 metros de diámetro respectivamente, resultará:

| Antena | Frecuencia de Trabajo (MHz) | Diámetro (m) | R (m) |
|--------|-----------------------------|--------------|-------|
| 1 | 800 | 0,3 | 0,12 |
| 2 | 5800 | 0,15 | 0,87 |

Esto indica, por ejemplo, que para la antena N° 2, es necesario una distancia de 0,87 m en todo su diámetro.

Para simplificar los cálculos, y asegurarnos que se cumpla la ecuación fijaremos la distancia mínima R en 1 m

5.6.3.2 Dimensiones de la Cámara

Como hemos visto en la teoría de cámaras anecoicas, las paredes de la misma deben estar revestidas en su interior de un material NO reflectivo y en lo posible absorbente.

Este material, generalmente en forma de paneles y de características definidas por el fabricante según la necesidad, tiene un espesor, el cual denominaremos E .

Analizando entonces el cálculo del Largo L de la cámara, y suponiendo un panel de espesor E_1 en la pared detrás de la antena Patrón y un panel de espesor E_2 en la pared detrás de la antena de Prueba, nos queda:

$$L = E_1 + R_{min} + 2R_{min} + E_2 \tag{16}$$

Teniendo en cuenta que los paneles aislantes del mercado oscilan en sus espesores entre 0,2 y 0,3 m, tomamos un E max de 0,3 m

Por tanto, L resultará:

$$L = 0,3 m + 1 m + 2 m + 0,3 m$$

$$L = 4,6 m$$

Cumpliendo de esta manera con el objetivo de una cámara o recinto de 5 mts de largo

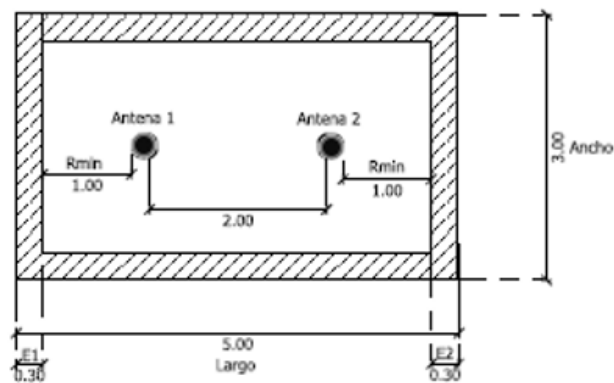


Figura 24: vista superior

En cuanto al Alto (H) y ancho (A) de la cámara, tomando los valores E , resultará:

$$H = E_1 + Rmin + E_2 \tag{17}$$

$$H = 0,3 m + 1 m + 0,3 m$$

$$H = 1,6 m$$

Cumpliendo de esta manera con el objetivo de una cámara o recinto de 3 de alto

De mismo modo, se determina el Ancho A ,

$$A = 1,6 m$$

Cumpliendo de esta manera con el objetivo de una cámara o recinto de 3 de ancho

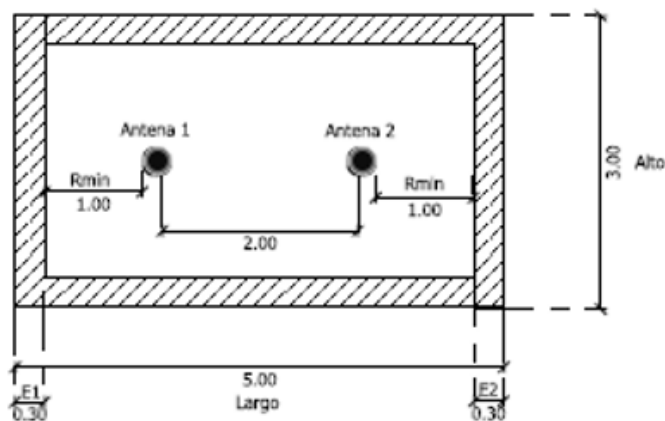


Figura 25: vista lateral

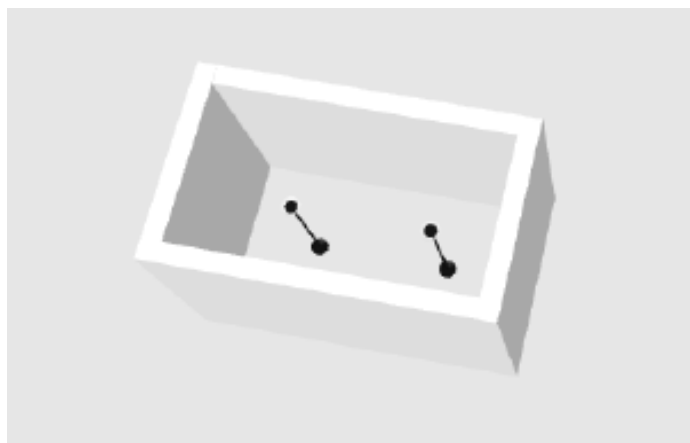


Figura 26: vista 3D

5.6.3.3 Determinación de la región de prueba

Esta región o zona, es la distancia o espacio libre necesario para poder hacer una buena medición, y deberá ser ésta como mínimo, mayor al diámetro de la antena a medir

Para nuestro caso, este deberá ser mayor a 0,3 mts, con lo que se cumple sobradamente

Altura de las antenas dentro del recinto:

Para asegurar una correcta medición, se debe cumplir que

$$Ha \geq 4D$$

Donde D es el diámetro de la antena bajo prueba, y tomamos el mayor valor posible)

$$Ha \geq 4 \times 0,3 \text{ m}$$

$$Ha \geq 1,2 \text{ m}$$

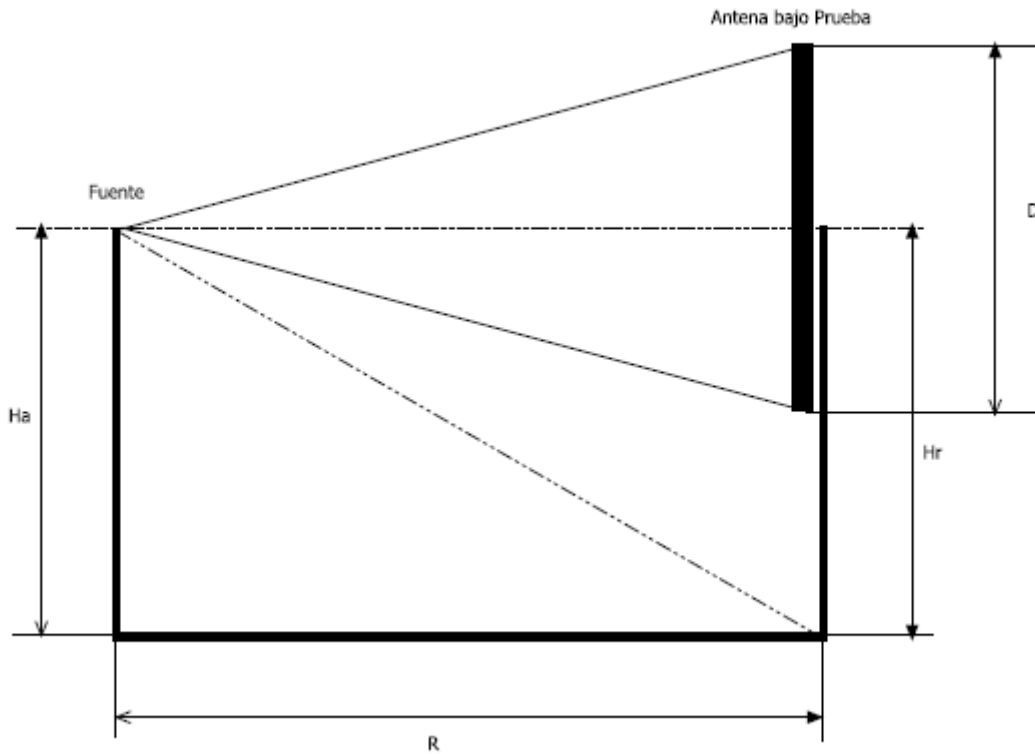


Figura 27: determinación de la región de prueba

Con lo cual no solo se cumple la ecuación, sino también que sigue validando las dimensiones de la cámara tanto en altura como en ancho

5.6.3.4 Cálculo de las dimensiones y determinación del absorbente

Habiendo ya determinado las dimensiones de la cámara, el próximo y necesario paso será determinar el tipo de material absorbente a colocar dentro del recinto para obtener un valor de reflectividad dentro de los valores deseados.

Un valor típico par mediciones de microondas dentro de cámaras anecoicas es que la reflectividad máxima sea -40 dB en la frecuencia de operación más baja. En nuestro caso de análisis, supondremos un valor de -30 dB (a 800 MHz)

De acuerdo al cálculo realizado pro la técnica de imágenes, se obtuvo que:

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{3 m}{2 m + 2(1 m)}\right)$$

$$\theta_3 = 36,8 \text{ grados}$$

Por tanto, el ángulo de incidencia θ_2 es el complemento de θ_3 , es decir:

$$\theta_2 = 53,2 \text{ grados}$$

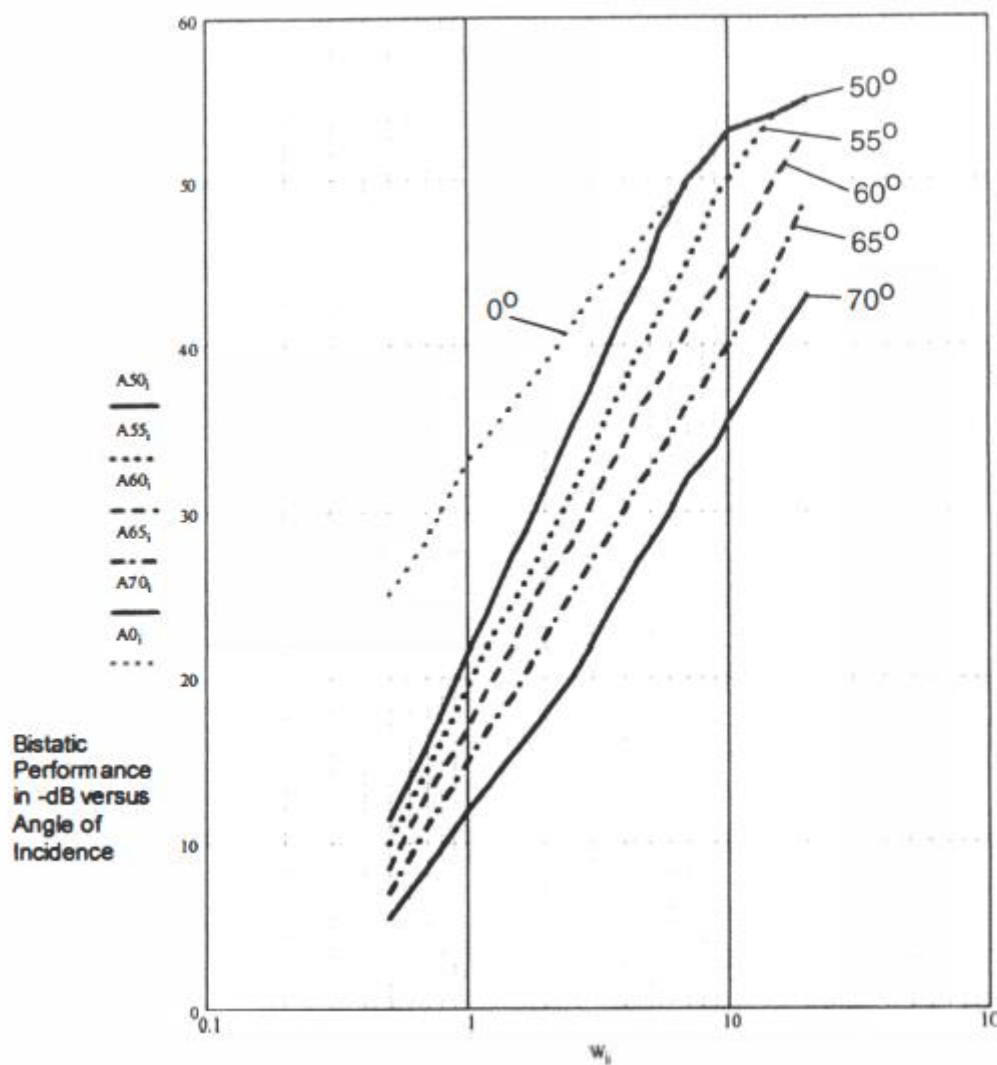


Figura 28: espesor del absorbente piramidal en función de la longitud de onda

Por tanto, y de acuerdo a los valores obtenidos de la tabla, concluimos que:

El factor es aproximadamente de 2 longitudes de onda

Frecuencia de operación ALTA $f = 5,8 \text{ GHz}$, $\rightarrow \lambda_1 = 5,17 \text{ cm}$.

Espesor 1 = 10,34 cm

Frecuencia de operación BAJA $f = 0,8 \text{ GHz}$, $\rightarrow \lambda_2 = 30,75 \text{ cm}$.

Espesor 2 = 61,5 cm

Esto significa, que, para bajas frecuencias, se debería colocar paneles de un espesor superior al que se calculó con la ecuación de campo lejano, lo cual supone recalculer las dimensiones de la cámara, restringir las dimensiones de las antenas a medir o utilizar paneles híbridos (ETS- Lindgren) que se adapten a las necesidades y cumplan con los requisitos y dimensiones de la cámara propuesta.

Analizando las hojas de datos de este proveedor, determinamos que las opciones que se adaptan a la construcción de nuestra cámara son los paneles EHP-8PCL y EHP-12PCL de ETS-Lindgren.

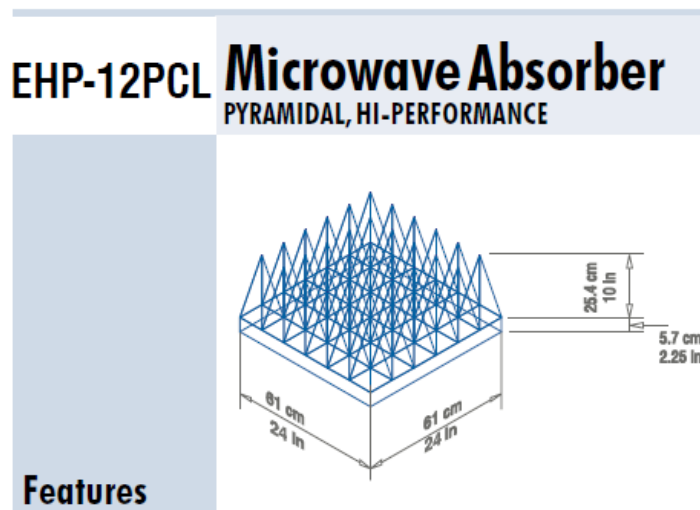


Figura 29: absorbente piramidal EHP-12PCL (ETS-Lindgren)

Optamos por avanzar con nuestro diseño por el panel Modelo EHP-12PCL, ya que resulta conveniente, tanto por su característica física como como por su índice de reflectividad garantizado

Frequency (GHz)

| FREQUENCY/BAND | TYPICAL REFLECTIVITY | GUARANTEED REFLECTIVITY |
|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 -2 GHz L-Band | <-35 dB | -35 dB |
| 2 -4 GHz S-Band | <-45 dB | -40 dB |
| 4 -8 GHz C-Band | <-55 dB | -45 dB |
| 8 -12 GHz X-Band | <-55 dB | -50 dB |
| 12 -18 GHz Ku-Band | <-55 dB | -50 dB |
| 18 -40 GHz K-Band | <-50 dB | -50 dB |

Figura 30: índice de reflectividad de panel EHP-12PCL (fuente: <http://ets-lindgren.com/all/EHP-MicrowaveAbsorber>)

5.7 Construcción del recinto de la cámara Anecoica

En este apartado determinaremos, por un lado, la construcción del recinto que dará soporte a la cámara en sí (infraestructura edilicia) con su recubrimiento exterior (aislación), y por otro lado, el diseño y disposición del interior de la cámara (materiales absorbentes y accesorios).

Todo esto se hará en base a la teoría, cálculos e información de fabricantes que componen este documento

5.7.1 Estructura – Exterior

Para la construcción de la estructura de la cámara, podremos optar entre una solución tradicional como un esqueleto de acero liviano conformado por montantes y soleras, las cuales luego deberán ser recubiertas con placas de yeso (comúnmente conocidas como Durlock). Luego se deberá proceder a recubrir el exterior, como hemos visto en el desarrollo teórico, por láminas de hierro galvanizado o zincado.

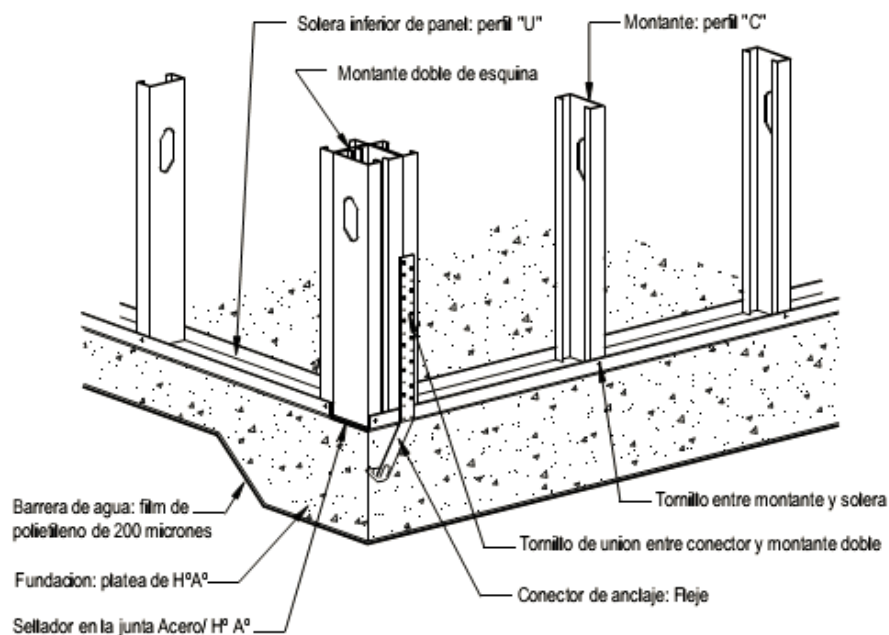


Figura 31: construcción típica con Montantes y Soleras

Si bien esta solución es una de las más utilizadas dentro del tipo obrar seca, es necesario de mano de obra especializada y varias horas de trabajo, sobre todo para la finalización de la estructura (toma de juntas, enduido y lijado) y, posteriormente, el recubrimiento de la estructura exterior.

Proponemos una opción más práctica y limpia, que es la de realizar la construcción del recinto con paneles aislantes inyectados (tipo sándwich) con recubierta de Zinc. Estos paneles pueden ser lisos u acanalados (estos últimos tiene un mayor nivel de rigidez estructural), con prestaciones de aislamiento térmico, resistencia mecánica, terminación estética, higiene y rapidez de montaje.

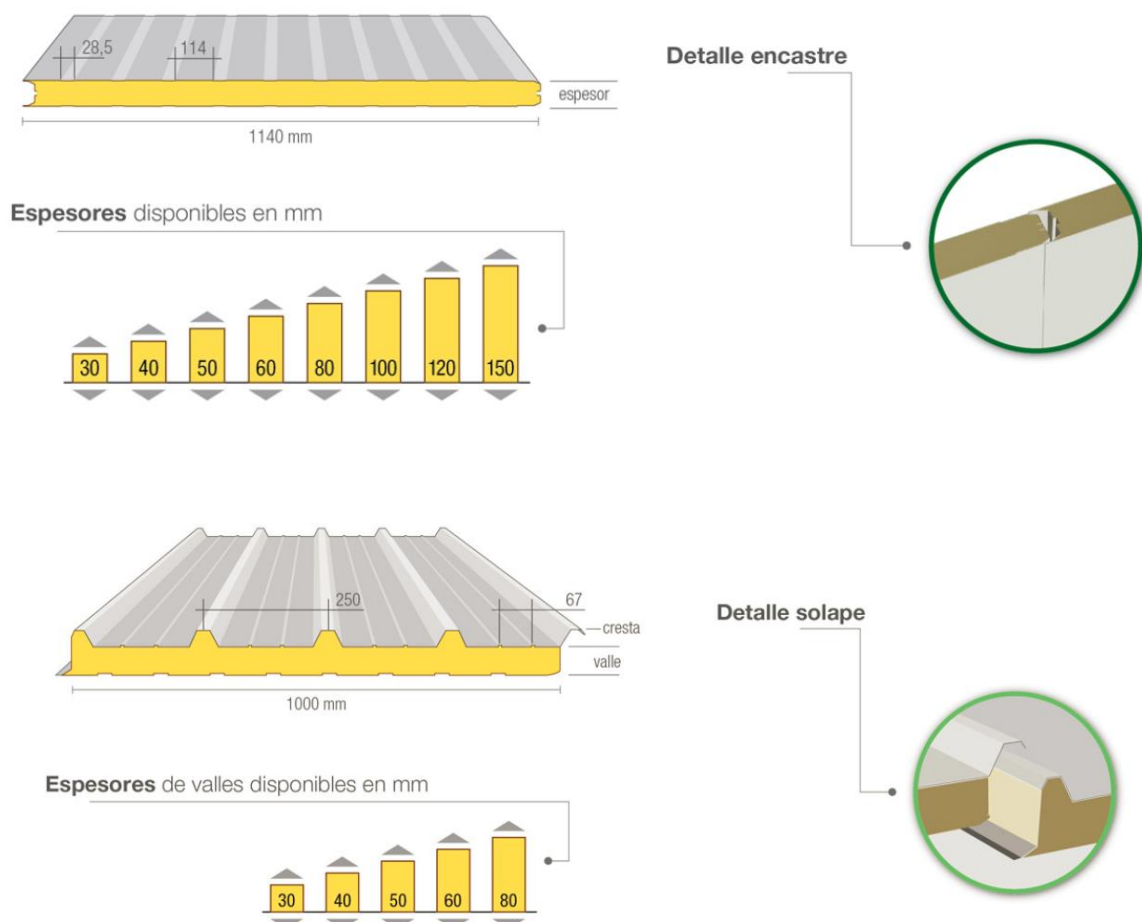


Figura 32: paneles inyectados lisos y acanalados (fuente: Arneg Argentina)

Estos paneles cuentan con un sistema de encastre del tipo machihembrado que permite una rápida instalación solo con amurar una solera con el perímetro de la sala al piso y realizar uniones con esquineros, como se puede observar en la figura 33



Figura 32: construcción de la cámara con paneles inyectados (fuente: Arneg Argentina)

De esta manera, obtenemos una estructura sólida y resistente, y como los paneles inyectados están recubiertos con una placa de zinc, cumplen satisfactoriamente con el requisito de “blindar” la cámara de interferencias externas. Será menester, asegurarse de que todos los paneles y puertas tenga una buena conductividad entre ellos, y que todo el sistema esté conectado a un buen sistema de P.A.T (puesta a tierra)

5.7.2 Interior de la cámara- Recubrimiento

Para este proyecto, se nos definió un ámbito de trabajo o sala con las siguientes dimensiones:

- Ancho de la cámara: 3 metros
- Alto de la cámara: 3 metros
- Largo de la cámara: 5 metros.

En cuanto al rango de frecuencias, se determinó (por el tipo de instrumental de medición disponible) a valores comprendido entre los 800 MHz a 5,8 GHz.

Los cálculos realizados en el apartado de Cálculo y Diseño, arrojaron que el panel estandarizado fabricado por ETS-Lindgren que mejor se adapta a nuestras necesidades es el Modelo EHP-12PCL.

Las medidas de este panel absorbente son de 61 cm de lado (24 pulgadas), y 31 cm de alto (12,25 Pulgadas).

Con el objeto de aprovechar en su totalidad los paneles y evitar desperdicios por recorte, se “ajustarán” las medidas interiores de la cámara, lo cual además, facilitará el armado y recubrimiento del interior de la cámara.

Comenzamos cubriendo las paredes que se encuentran en la trayectoria o incidencia directa del rayo, es decir las que están detrás de la antena fuente o emisora (pared 1) y detrás de la antena bajo prueba (pared 2). Entonces, cubriremos estas paredes con 5 paneles por lado, resultando un total de 25 paneles por pared y, un ancho y un alto interior de la cámara ajustado de 305 cm.

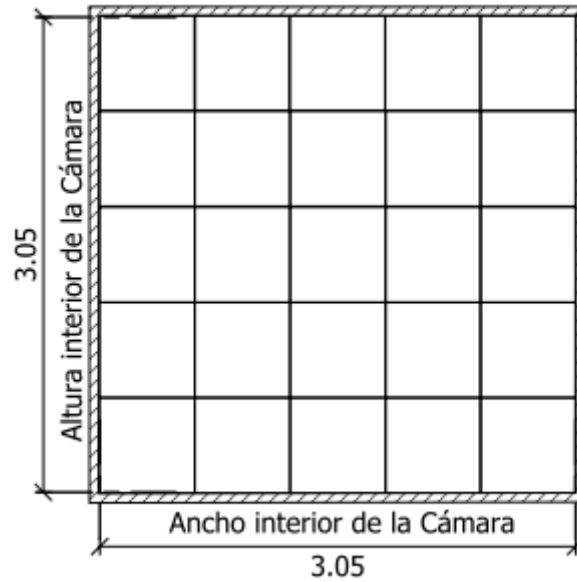


Figura 33: vista pared frontal y trasera, numeradas 1 y 2

Continuamos con el cálculo del recubrimiento de las paredes laterales (pared 3 y pared 4). Sabiendo que el alto de la cámara ya está fijado por los cálculos hechos para las paredes 1 y 2 (305 cm), podrán colocarse “a lo alto” 5 paneles de 61 cm de lado.

El alto de un panel EHP-12PCL es de 31cm. Esto significa, que de los 5 mts libres del interior de la cámara, 62 cm ya están ocupados por los paneles de las paredes 1 y 2, con lo cual, el espacio longitudinal libre será de 438 cm. Este espacio puede ser cubierto por 7 paneles, los cuales ocuparán un espacio de 427 cm, que sumados a los 62 cm (paredes 1 y 2), dan un total de 489 cm. Entonces, el nuevo valor ajustado de la cámara será de 489 cm, logrando de este modo optimizar el uso de material absorbente. Y cada una de estas paredes laterales (3 y 4) tendrá 35 paneles.

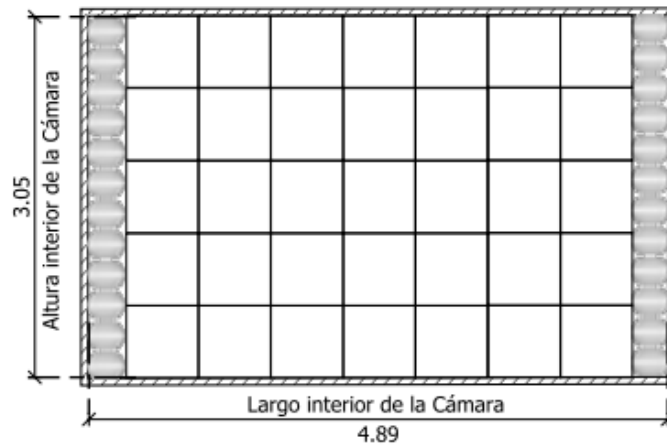


Figura 34: vista paredes laterales, numeradas 3 y 4

Queda solamente analizar el recubrimiento del techo y piso de la cámara. Sabemos, por el cálculo realizado para las paredes laterales, que el espacio longitudinal libre es de 7 paneles (427 cm), y que el ancho de la cámara es de 305 cm. Como las paredes laterales están recubiertas por paneles de 31 cm de alto, queda un espacio libre de 243 cm. Esto nos da lugar para colocar casi 4 paneles completos (habrá que hacer un recorte de 1 cm), resultando que tanto para el techo como para el piso, un total de 28 paneles cada uno

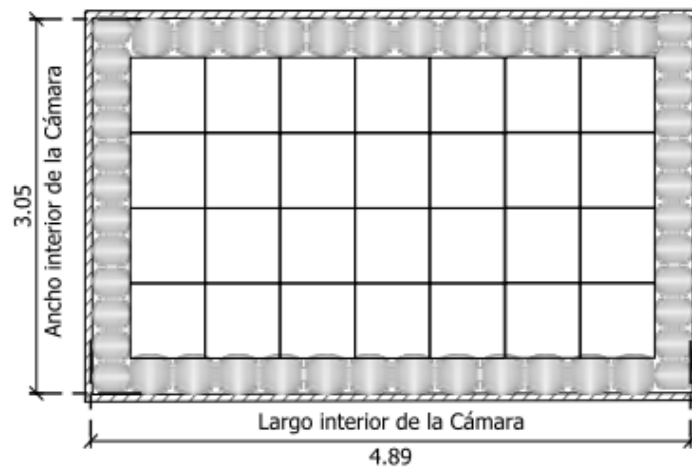


Figura 35: vista planta, techo y piso

En resumen, las medidas definitivas (interiores) de la cámara deberán ser de:

- Ancho interior de la cámara: 3,05 metros
- Alto interior de la cámara: 3,05 metros
- Largo interior de la cámara: 4,89 metros.

Y el total de paneles a utilizar será:

TABLA VII: distribución y cantidad de paneles absorbentes

| Superficie a Cubrir | Cantidad de paneles |
|----------------------------|----------------------------|
| Pared 1 | 25 |
| Pared 2 | 25 |
| Pared 3 | 35 |
| Pared 4 | 35 |
| Techo | 28 |
| Piso | 28 |
| TOTAL | 176 |

El cerramiento del recinto ocupa un lugar importante en el diseño, ya que, como se dijo en varias oportunidades a lo largo del proyecto, se necesita que la cámara logre permanecer lo más hermética posible a factores de interferencia externa y pérdidas de las emisiones internas. Para facilitar la construcción y lograr una adecuación con el resto del edificio, se sugiere utilizar las mismas puertas provistas por el proveedor Arneg que se adaptan a los mismos paneles sugeridos. La puerta también será recubierta en su interior con los paneles absorbentes ya sugeridos, mientras que el blindaje exterior será provisto por el

mismo material de construcción. Para mejorar aún más el cerramiento, se sugiere colocar un perfil de hierro zincado en los bordes de la puerta para que genere un efecto solapa con el resto de la estructura.



Figura 36: imagen ilustrativa de puerta (fuente: Arneg Argentina)

En lo referente a la ventilación del recinto, contando con las medianas dimensiones y el hecho de que no tendrá fuentes de calor permanente en su interior, se sugiere no colocar un sistema de ventilación forzada para evitar de este modo la pérdida del hermetismo de la cámara.

El ingreso de cables se hará por medio de un *entry port* ubicado en la parte inferior de la pared frontal (pared 1) el cuál será de las dimensiones mínimas necesarias para el pasaje de cables de alimentación y medición.

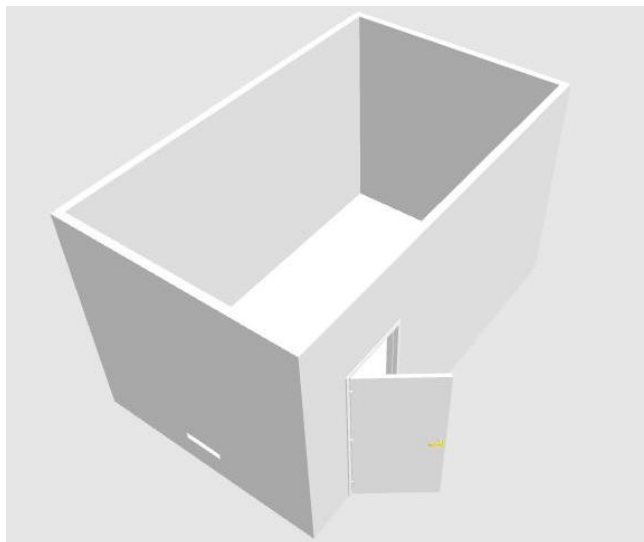


Figura 37: vista 3D de la cámara, con puerta y entry port de cables

5.7.3 Interior de la cámara- Iluminación y accesorios

Con el objeto de evitar que los artefactos de iluminación incidan en los resultados de las mediciones, nosotros sugerimos, tal como se realiza en las dependencias de CITEDEF, que la luz provenga de spot montados sobre trípodes que puedan introducirse en la cámara al momento de colocar o retirar los equipos, y que puedan ser retirados al momento de realizar la experiencia. De este modo se garantiza que dentro del recinto permanezcan solo los objetos de estudio y sus respectivas emisiones.



Figura 38: imagen ilustrativa de iluminación sugerida

En el espacio interior, será necesario contar con elementos tales como mesas, trípodes, posicionadores. Son elementos que no requieren mucha sofisticación pero sí conviene tenerlos disponibles y por lo tanto sería importante que formen parte del inventario de la cámara.

5.7.4 Mano de obra civil

Para la ejecución de la obra civil, se realizó la consulta con el Arquitecto Hernán Bocco, quien cuenta con acabada experiencia en infraestructura de Telecomunicaciones, y analizando el proyecto en conjunto acabamos por determinar las siguientes necesidades:

- El tiempo de armado y montaje se estimó en 3 días para lo que respecta a la construcción externa del recinto (I)
- Se consideró luego 1 día de trabajo para la colocación de los paneles absorbentes que recubrirán la totalidad del interior de la cámara (II)
- Se agregó un día más para realizar ajustes y detalles de último momento (III)

Para realizar la tarea, se consideró utilizar los servicios de un recurso con la categoría de oficial y otro con la de medio oficial (según normativas *UOCRA, Unión de Obreros de la Construcción de la República Argentina*).

Para la tarea (I) se utilizará tanto al oficial como al medio oficial, mientras que para las tareas (II) y (III) bastará con contar con los servicios de un medio oficial.

Cada recurso implica un costo diferente según su categoría, los cuales se describirán en el apartado correspondiente.

5. Resumen de Costos.

Siendo que el objeto de estudio se remite a la factibilidad de la construcción y el uso de una cámara como la descrita, los costos que se enumerarán a continuación son a los meros fines de conocer un presupuesto que brinde una idea relativa de la inversión necesaria. Estos costos podrían ajustarse a través de un estudio dedicado específicamente a los mismos.

Para lograr un entendimiento lo más detallado posible, desarrollaremos el punto en cuatro ejes, a saber: Materiales de construcción (los propios que sostienen la estructura); material absorbente (los paneles internos); mano de obra (construcción de paredes, techos, piso y pegado de paneles internos).

En referencia a instrumental y accesorios serán descriptos los sugeridos sin tener en cuenta su costo ya que su valor será independiente de la comparación de costos entre la construcción con mano de obra propia y el servicio en modalidad “llave en mano” y podrán ser objeto de un estudio específico y dedicado.

Los valores serán expresados en dólares estadounidenses con la tasa de referencia actual a Julio 2016 de ARS 15 = USD 1

| Ítem | Costo unitario | Cantidad | Costo total |
|---|----------------|--------------|-----------------|
| Panel inyectado (marca Arneg) | \$43 x m2 | 80 m2 | \$3440 |
| Puerta (marca Arneg) | \$100 | 1 unidad | \$100 |
| Panel absorbente interior EHP-12PCL (marca ETS-Lindgren) | \$85 | 180 unidades | \$15300 |
| Mano de obra | \$128 x día | 5 días | \$640 |
| Costo Total (construcción propia) | | | \$19480 |
| Costo “llave en mano” marca ETS-Lindgren modelo AMS-8100 | | | \$232000 |

Instrumental de generación y medición sugerido, no limitado a esta lista:

- Posicionadores de antena x 2 unidades
- Mesas de material no ferroso x 2 unidades
- Generador de señales de RF x 1 unidad
- Medidor de potencia x 2 (potencia irradiada y potencia recibida)
- Analizador de espectro x 1 unidad
- Antenas patrones
- Bocina de medición de RF

Materiales adicionales varios, sugeridos no limitados a esta lista:

- Iluminación en soporte externo
- Alargues eléctricos
- Matafuegos
- Cartelería y señalización
- Elementos de limpieza (aspiradora y otros)

6. Conclusiones

Las premisas con las que se inició este trabajo eran fundamentalmente tres: La posibilidad de construir una cámara anecoica en un recinto con las dimensiones pre definidas; conocer el costo de construcción de la misma respecto de su valor de adquisición bajo la modalidad “llave en mano”; la estimación de los beneficios y utilidades que se podrían obtener.

A continuación, analizaremos cada uno de estos tres ejes de manera independiente.

Nuestro análisis concluye que sí, es posible realizar la construcción de la cámara anecoica en dicho recinto. Las dimensiones de la cámara son adecuadas para realizar pruebas y ensayo de dispositivos de pequeño porte y principalmente con fines académicos. Esto hace que nos encontremos frente a un panorama auspicioso para continuar elaborando conclusiones.

Respecto del costo de la construcción paso a paso y con mano de obra propia contratada a los efectos del proyecto en contraste con lo que costaría adquirir una solución “llave en mano” las diferencias son notorias. La relación que existe entre ambas propuestas es de **10 a 1** en favor de la realizada con mano de obra propia. En otras palabras, construirla de manera propia costaría aproximadamente un 10% del valor que representaría comprarla ya fabricada. En los anexos podrá encontrarse una cotización de ETS-Lindgren quien fue proveedor de 3 de las 4 cámaras de este estilo instaladas en el país que sustenta lo antedicho. Esto claramente tiene un beneficio desde lo económico, aunque puede presentar algunas demoras y contratiempos debido a la inexperiencia en la construcción de estas cámaras, pero consideramos que hasta la experiencia de construcción de la misma y los mismos errores que eventualmente se presenten, pueden ser un interesante ejercicio de aprendizaje y de toma de experiencia por parte de la Universidad. El análisis en detalle de la factibilidad económica respecto de la inversión, escapa del foco de este proyecto y merecería ser objeto de un estudio en sí mismo.

En referencia a los beneficios que se podrían obtener de contar con este tipo de instalaciones, consideramos que serán muy positivos y de variado interés. Arribamos a dicha conclusión luego de haber consultado a alumnos, profesores y personal calificado de INTI, CITEDEF y especialistas tecnológicos, así como nuestra propia experiencia como alumnos y trabajadores del rubro por más de 20 años. Al alumno lo ayudará en su formación, ya que podrá vivir la experiencia de trabajar en un entorno práctico de ensayo que replicará la situación que observa en la teoría teniendo la oportunidad de contrastarla con la realidad. A los profesores, les permitirá elaborar además de los laboratorios de ensayo para con los alumnos, otros en los cuales se puedan encontrar nuevas experiencias, desarrollar tesis y guiar pasantías.

Por último, para la UADE toda, será la oportunidad de sumar un valor de prestigio, ya que junto con el Instituto Balseiro, de quién tenemos conocimiento que cuenta con una cámara similar, serán las únicas dos instituciones educativas en el país y una de las pocas de Latinoamérica, que contará con una facilidad como la descrita. Esto sin duda entusiasmará a sus actuales y potenciales alumnos, a los colegios de profesionales afines al rubro, como así también potenciará el acercamiento de empresas y emprendedores que podrán encontrar por este medio un nuevo vínculo con la institución.

Por lo antedicho, concluimos que este trabajo abre una puerta de análisis interesante hacia la posibilidad de obtener beneficios tangibles. Desde nuestra opinión, recomendamos avanzar con la implementación de esta iniciativa, de la cual estaríamos orgullosos de participar como profesionales y miembros de esta casa de estudios.

7. Bibliografía

Leland H. Hemming, *Electromagnetic Anechoic Chambers. A Fundamental Design and Specification Guide*, IEEE Press – ISBN 0471208108, 2002.

Jyrkit Penttinen, *The Telecommunications Handbook*, Ed. Wiley, ISBN 9781119944881, 2015

Andrew Oliviero, Bill Woodward, *Cabling The Complete Guide to Copper and Fiber-Optic Networking 5th Ed*, Ed. Wiley, ISBN: 9781118807323, 2014

<http://www.ieee.org/>

<http://www.iec.ch/> (International Electrotechnical Commission)

<http://www.enacom.gob.ar/>

<http://www.inti.gov.ar/noticiero/noticiero98.htm> (Noticiero Tecnológico Semanal N° 98 · 31 de marzo de 2008 – INTI - NUEVA CAMARA SEMIANECOICA DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA UNICA EN SUDAMERICA)

<http://www.ets-lindgren.com/>

http://www.mvg-world.com/products/field_product_family/absorber-6

<http://www.siepel.com/en/siepel-international/product/electromagnetic-absorbers>

<http://www.wavecontrol-emc.com/es/54216/Productes-n2/Absorbentes-electromagneticos.htm>

<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/absorbente-rfi-78381.html> (Listado de industrias de paneles absorbentes)

<http://www.antenna-theory.com/>

<http://www.inceleris.com/material-absorbente-y-mosaicos-de-ferritas.html>

<http://arneg.com.ar/productos/camarapuertas/CamaraIndustrial.html>

8. Glosario

Antena: Parte de un sistema de transmisión o recepción, diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas

Cámara Anecoica: Cámara diseñada para reducir la energía no deseada reflejada, de modo tal de poder simular el espacio libre en forma aceptable.

Compatibilidad Electromagnética: Las normas técnicas internacionales definen a la Compatibilidad Electromagnética (EMC) como: la aptitud de un aparato o un sistema para funcionar en forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo lo que se encuentra en dicho entorno, y a la vez funcionar satisfactoriamente bajo perturbaciones electromagnéticas provenientes de un entorno electromagnético (<http://www.inti.gov.ar/electronicaeinformatica/emc/ce.htm>)

Constante Dieléctrica: es la propiedad macroscópica de un medio que es dieléctrico (sin conductividad eléctrica), y está directamente relacionado con la permitividad que tiene el medio

Ferrite (absorbentes): Placas de cerámica cargados con óxidos magnéticos que absorben la energía radiada

Jaula de Faraday: recinto metálico que protege a su interior de la incidencia de los campos electromagnéticos.

Longitud de Onda (λ): es la distancia correspondiente entre puntos de dos ciclos consecutivos de la onda. La longitud de onda (λ) es la relación entre la Velocidad de Fase V_f y la Frecuencia f , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\lambda = V_f / f$$

En el espacio libre, la velocidad de una onda electromagnética es igual a la de la velocidad de la luz, aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Open-area Test Site (OATS): Sitio o recinto usado para la medición de emisiones radioeléctricas. Definido en la Norma ANSI C63 .4- 1 992.

Panel de absorción electromagnética: Panel de espuma generalmente adicionado con carbono y otro material absorbente de energía.

Permitividad: es una constante que describe como un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio

Poliuretano expandido: material plástico espumado derivado del poliestireno, que se utiliza para la fabricación de paneles, piezas de embalaje, etc.

Resistividad: resistencia eléctrica específica de un material. Su valor (en ohm-metro) describe el comportamiento de un material frente al paso de una corriente eléctrica

9. Anexos

Los siguientes documentos se encontrarán en la versión digital, presentándose de forma impresa aquellos considerados de mayor relevancia.

- ENACOM, Normas y resoluciones de interés al proyecto (Resolución 202/95 Estándar Nacional de Seguridad para la exposición a radiofrecuencias; 530/2000 Estándar Nacional de Seguridad Sistemas de Telecomunicaciones ; y otros documentos de interés)
- ENACOM, Informe Radiaciones No Ionizantes y su implicancia con la salud
- ENACOM, Carpeta técnica
- ENACOM, Formularios de homologación de equipos
- UIT (ITU) Recomendación UIT-R BS.1698
- ETS-Lindgren, cotizaciones
- ETS-Lindgren, hojas de datos
- Arneg Argentina, hojas de datos
- Entrevista al Ingeniero Norberto Dalmas Di Giovanni (CITEDEF)
- Entrevista al Ingeniero Lucas Blas (INTI)