

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de
Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE GRADO

DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE
MEDIDAS DE EMISIONES ESPURIAS
RADIADAS UTILIZANDO UNA CELDA
GTEM

CAROLINA HIDALGO ROJAS

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación
Julio 2017



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Diseño del procedimiento de medidas de Emisiones Espurias Radiadas utilizando una celda GTEM.

AUTOR: Carolina Hidalgo Rojas

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación.

DIRECTOR: Oscar Javier Suárez Vicente

TUTOR: Florentino Jiménez Muñoz

DEPARTAMENTO: Teoría de la Señal y Comunicaciones

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Rubén de Diego Martínez

Vº Bº

TUTOR: Florentino Jiménez Muñoz

SECRETARIO: Rafael Herradón Díez

Fecha de lectura: 26 de julio de 2017

Calificación:

El Secretario,

Agradecimientos

Gracias a Oscar Javier Suárez Vicente y a David Rubio Palao, por la ayuda que me han prestado durante la realización de este proyecto y también gracias a Florentino Jiménez Muñoz por su tiempo y ayuda.

Agradecimientos

Resumen

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un procedimiento de medida de las emisiones espurias radiadas por un equipo de telecomunicación, usando como entorno de medida una celda GTEM (GigaHertz Transverse Electromagnetic), en lugar de la tradicional cámara anecoica, donde se realizan actualmente este tipo de medidas.

En las labores de vigilancia de mercado, los equipos de telecomunicación son evaluados a través de ensayos para verificar el cumplimiento con los requisitos esenciales. Y entre los ensayos que se realizan están las medidas de emisiones espurias radiadas que son realizadas por la Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (DGTTI).

Actualmente las medidas de emisiones espurias radiadas se realizan en una cámara anecoica, que obligatoriamente debe tener grandes dimensiones y además está ubicada lejos del lugar donde se realizan el resto de medidas destinadas a la vigilancia de mercado.

Con el diseño del procedimiento de medida de emisiones espurias radiadas propuesto, se pueden reproducir estas medidas en una celda GTEM en vez de en una cámara anecoica, ganando no solo en espacio, ya que las dimensiones de la GTEM son menores que las dimensiones de la cámara anecoica, sino también en costes.

Para la realización del PFG, en lo que se refiere a la parte tecnológica, se necesitan dos entornos de medida, como son la cámara anecoica y la celda GTEM. En este caso ambos entornos están disponibles para su uso, ya que son facilitados por la Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (DGTTI). En la misma línea, para las medidas se necesitan diferentes tipos de antenas y por supuesto la instrumentación de medida y el software correspondiente para la realización de los ensayos.

Por otra parte, el condicionante económico tiene un gran valor, ya que las instalaciones donde se realizan las medidas, y la instrumentación necesaria para las mismas, conllevan un gasto importante en el proyecto.

Otro aspecto importante es la normativa, todo el proyecto debe ser conforme a las normas establecidas. En este proyecto, las normas que son referencia son las siguientes:

- ETSI TR 102273-2. Normativa de cámara anecoica para medidas de potencias.
- EN 610000-4-20. Normativa referente a la celda GTEM.

En cuanto a la metodología usada, en una primera etapa se caracterizan y analizan de forma teórica la celda GTEM, estudiando en profundidad la celda GTEM y el comportamiento que describe la transmisión de campos electromagnéticos y su variación con la frecuencia.

La siguiente etapa, es la etapa de realización de pruebas y ensayos para verificar y analizar el comportamiento de la GTEM en diferentes configuraciones de medida.

En un siguiente paso, se realiza el diseño de la configuración para la medida de emisiones espurias radiadas utilizando una celda GTEM y se analiza el procedimiento utilizado para medir estas mismas emisiones en una cámara anecoica. Seguidamente se realizan las medidas

con el diseño propuesto en la celda GTEM, y si los resultados son aceptables, se pasa a realizar las medidas en los dos entornos de medida comparando los resultados obtenidos en ambos entornos de trabajo. Con esto se puede verificar con datos reales la posibilidad de sustituir la cámara anecoica por una celda GTEM para la realización de estas medidas.

Para la realización de las medidas de emisiones espurias radiadas se utilizará el método de sustitución, en el que se hará uso de diferentes dipolos cuyas características son conocidas. Con ellos podremos caracterizar los dos entornos y a partir de ahí obtener las características de la celda GTEM y su adaptación a la normativa sobre emisiones espurias radiadas.

Finalmente, después de montar las configuraciones propuestas y tras realizar medidas de prueba con diferentes antenas, y comprobar que dichas medidas son medidas válidas se procede a realizar medidas con equipos reales, con el fin de obtener medidas reales de emisiones espurias radiadas.

Como conclusión podemos decir que la celda GTEM es un entorno de medida válido para realizar la medida de emisiones espurias radiadas de un ESE. Y también puede decirse que para la realización de estas medidas puede intercambiarse por la cámara anecoica, ya que los resultados de medida obtenidos en ambos entornos de medida son muy similares.

Abstract

The main objective of this project is to design a procedure for the measurement of the radiated spurious emissions by a telecommunication equipment, using as the adjustment of the measurement a cell GTEM (electromagnetic transverse GigaHertz), in the place of the traditional anechoic chamber, where are currently carried out this type of measures.

In the market surveillance work, telecommunication equipment is evaluated through tests to verify compliance with the essential requirements. Among the tests carried out are the radiated spurious emissions measurements carried out by the General Directorate of Telecommunications and Information Technologies (DGTI).

Currently, radiated spurious emission measurements are performed in an anechoic chamber that must have large dimensions and is located far from the place where the other measures are carried out to market surveillance.

With the design of the radiated spurious emission measurement procedure, these measurements can be reproduced in a GTEM cell rather than in an anechoic chamber, gaining not only space, since the dimensions of the GTEM are smaller than the dimensions of the chamber anechoic, but also costs.

On the one hand, as far as the technological part is concerned, two measurement environments are needed, such as the anechoic chamber and the GTEM cell, in this case both environments are available for use, as they are provided by the General Directorate of Telecommunications and Information Technology (DGTI). In the same line for the measurements different types of antennas are needed and of course the instrumentation of measurement and the corresponding software for the realization of the tests.

On the other hand, the economic condition has a great value, since the facilities where the measures are carried out and the necessary instrumentation entail an important expense in the project.

Another important aspect is the regulations; the whole project must be in accordance with the established standards. In this project the standards as a reference are the following:

- ETSI TR 102273-2. Anechoic chamber regulations for power measurements.
- EN 61000-4-20. Regulations regarding the GTEM cell.

As for the methodology used, in a first stage, the GTEM cell, is studied and analyzed in a theoretical way, studying in depth the GTEM cell and the behavior that describes the transmission of electromagnetic fields and its variation with frequency.

In the next stage, it is the stage of tests and tests to verify and analyze the behavior of the GTEM in different measurement configurations.

In a next step, the design of the configuration for the measurement of radiated spurious emissions using a GTEM cell is performed and the procedure used to measure these same emissions in an anechoic chamber is analyzed. Then, the measurements are performed with the proposed design in the GTEM cell and if the results are acceptable, the measurements are carried out in the two measurement environments comparing the results obtained in both

working environments to verify with real data the possibility of replace the anechoic chamber with a GTEM cell to perform these measurements.

In order to carry out the radiated spurious emission measurements, the substitution method will be used, in which different dipoles whose characteristics are known will be used, to characterize the two environments and from there to obtain the characteristics of the cell GTEM and its adaptation to the radiated spurious emission regulations.

Finally, after assembling the proposed configurations and after carrying out test measurements with different antennas, and after verifying that these measures are valid measures are made to measure with real equipment, in order to obtain a final measure of radiated spurious emissions.

In conclusion, it is obtained that the cell GTEM is a valid measurement environment to carry out the measurement of radiated spurious emissions of an ESE, and that can be substituted by the anechoic chamber since the measurement results obtained in both measurement environments are similar.

Índice

Resumen	i
Abstract.....	iii
Acrónimos	
1.- Introducción.....	1
2.- Antecedentes o “marco tecnológico”	3
3.- Especificaciones y restricciones de diseño	4
4.- Descripción de la solución propuesta.....	5
4.1-Entornos de medida	5
4.2-Introducción y evolución de la celda TEM.....	6
4.3-La celda GTEM	9
4.4-Verificaciones de la celda GTEM	15
4.4.1-Verificación de orientación.....	17
4.4.2-Verificación de posición en el eje Y	19
4.4.3-Verificación de posición en el eje Z.....	22
4.4.4-Verificación de posición en el eje X	24
4.4.5-Verificación de relación campo-potencia.....	25
4.5-Propuesta de procedimiento para medida de emisiones.....	29
4.5.1-Rango 1: desde 30 MHz hasta 1 GHz.....	30
4.5.1.1-Medida de PRA: Dipolos de referencia	36
4.5.1.2-Medida de PRA: Antena biconica	40
4.5.1.3-Medida 1 de PRA: ESE en GTEM y en cámara anecoica	43
4.5.1.4-Medida 2 de PRA: ESE en GTEM y en cámara anecoica	51
4.5.2-Rango 2: desde 1 GHz hasta 13 GHz. Propuesta inicial.	53
4.5.2.1-Análisis del rizado.....	60
4.5.2.2-Medida de PRA: Antena de bocina.....	71
4.5.3-Rango 2: desde 1 GHz hasta 13 GHz. Propuesta final.	74
4.5.3.1-Medida de PRA: Antena de bocina.....	75
5.- Presupuesto	78
6.- Conclusiones	79
7.- Bibliografía	81
8.- Referencias	82
I.- Anexo 1. Antena biconica.....	83

II.- Anexo 2. Celda GTEM.....	87
-------------------------------	----

Acrónimos

ESE: Equipo sometido a ensayo.

GTEM: TEM en gigahercios (GigaHertz Transverse Electromagnetic).

OATS: Emplazamiento de ensayo en campo abierto (Open Area Tests Site).

PRA: Potencia radiada aparente.

RF: Radiofrecuencia.

ROE: Relación de onda estacionaria.

TEM: Modo transversal electromagnético.

1.- Introducción

La finalidad de este proyecto es realizar una comparación de las medidas de Emisiones Espurias Radiadas obtenidas utilizando algunos de los diferentes entornos definidos en las normas, como por ejemplo, una cámara anecoica, respecto de las que se obtendrán en una celda GTEM. Los equipos que se evaluarán serán equipos de radiocomunicación orientados a la vigilancia de mercado de equipos de telecomunicación.

En las labores de vigilancia de mercado de los equipos de radiocomunicación se realizan varios tipos de ensayos para verificar el cumplimiento con los requisitos esenciales. Uno de ellos es el de uso eficaz y eficiente del espectro, cuya conformidad se comprueba mediante ensayos definidos en las normas técnicas armonizadas en la Unión Europea. Las emisiones espurias radiadas forman parte del conjunto de requisitos técnicos de los parámetros de radio que tienen que ser ensayados.

Las emisiones espurias radiadas son las emisiones en frecuencias que están fuera del ancho de banda de trabajo del equipo, y cuyos niveles no puedan afectar a otros servicios. Están incluidos, armónicos, emisiones parásitas, productos de intermodulación y productos de conversión de frecuencia. Dentro de las emisiones espurias encontramos dos tipos de medidas, las conducidas y las radiadas, siendo analizadas en este proyecto las radiadas.

En este PFG precisamente se abordará cómo realizar estas medidas de Emisiones Espurias Radiadas utilizando una celda GTEM en lugar de la tradicional cámara anecoica.

El proyecto de desglosa en los siguientes apartados:

Los primeros apartados, contienen el resumen, en castellano y en inglés, indicando el propósito general del proyecto, junto con los condicionantes tecnológicos, económicos, etc., además de los resultados y las conclusiones obtenidas.

El apartado de acrónimos, contiene una lista de acrónimos que se utilizan a lo largo del proyecto.

Este apartado, el apartado 1, presenta una breve descripción del marco tecnológico donde se ubica el proyecto, e indica la justificación del proyecto, junto con los objetivos buscados y una breve descripción del contenido de cada apartado.

El apartado 2, aporta una visión global del estado actual del campo de conocimiento donde se ubica el proyecto y aporta la información necesaria para seguir adecuadamente el desarrollo del mismo.

El apartado 3, presenta las especificaciones iniciales y las restricciones de diseño del problema abordado.

El capítulo 4, se desglosa en diferentes apartados.

El apartado 4.1, hace una introducción de los entornos de medida utilizados.

El apartado 4.2, presenta una introducción a la celda GTEM y su evolución.

El apartado 4.3, analiza la celda GTEM, profundizando en sus características.

El apartado 4.4, presenta medidas para verificar el comportamiento de la celda GTEM.

El apartado 4.5 se desglosa en tres grandes bloques. El primero, 4.5.1, propone un procedimiento de medida utilizando la GTEM para el rango de frecuencias desde 30 MHz hasta 1 GHz, y realiza varias medidas para comprobar su funcionamiento. El segundo, 4.5.2 propone otro procedimiento de medida en el rango de 1 GHz a 13 GHz. En este apartado, además de realizar una medida de prueba, se analizará el procedimiento propuesto y sus características para, en el tercer apartado, 4.5.3, proponer una configuración mejorada, que se verifica a partir de las correspondientes medidas.

El apartado 5, presenta el presupuesto necesario para montar el banco de medidas y poder realizar las medidas de emisiones espurias radiadas.

El apartado 6, expone las conclusiones a las que se ha llegado después de la realización del proyecto.

El apartado 7, lista las fuentes bibliográficas utilizadas.

Y el apartado 8, contiene las referencias bibliográficas citadas en el texto.

2.- Antecedentes o “marco tecnológico”

Actualmente existen multitud de elementos que hacen uso del espectro electromagnético, tantos que es necesario tener un control. Para ello existe una normativa que se encarga de poner los límites y establecer las reglas.

Una de las medidas utilizadas es la asignación de bandas de frecuencias concretas a cada servicio, donde cada rango de frecuencias está destinado para un uso concreto, de tal manera que unos servicios no puedan perturbar a otros.

En particular, los equipos de telecomunicación, que forman parte de los servicios que utilizan el espectro electromagnético, deben cumplir con una serie de requisitos esenciales. Para llevar a cabo la verificación de estos requisitos se realizan las labores de vigilancia de mercado, donde se realizan diversos tipos de ensayos para verificar que los requisitos esenciales se cumplen.

Uno de los requisitos esenciales es el uso eficaz y eficiente del espectro, cuya conformidad se comprueba mediante ensayos definidos en las normas técnicas armonizadas en la Unión Europea. Como parte del conjunto de los requisitos técnicos de los parámetros de radio que tienen que ser ensayados se encuentra las emisiones espurias. Dentro de este tipo de emisiones existen dos tipos, las emisiones espurias radiadas y las emisiones espurias conducidas, donde las primeras son el objeto de estudio de este proyecto.

Las emisiones espurias radiadas, son las emisiones en frecuencias que están fuera del ancho de banda de trabajo del equipo, y cuyos niveles no pueden afectar a otros servicios. Están incluidos, armónicos, emisiones parásitas, productos de intermodulación y productos de conversión de frecuencia.

En lo referente a la parte de los ensayos a los que son sometidos los equipos de telecomunicación, para determinados ensayos se necesitan entornos específicos, como pueden ser una cámara anecoica, o cámara semianecoica, emplazamientos de ensayos en campo abierto, OATS (open-area test site), o celdas TEM o GTEM.

Las celdas GTEM son instrumentos de medida precisos que se pueden utilizar para realizar ensayos tanto de inmunidad como de emisiones.

Una celda GTEM es una guía de onda TEM cerrada, capaz de trabajar en frecuencias de gigahercios, en muchas ocasiones una línea de transmisión coaxial rectangular, dentro de la que se propaga una onda en modo electromagnético transversal para producir un campo específico para la realización de ensayos. [1]

Una celda GTEM es una sección piramidal, terminada por una línea de transmisión de 50 Ω . La sección piramidal está compuesta por: un conductor interior llamado “*septum*” terminado en un conjunto de resistencias, material absorbente en una pared interior, y un segundo conductor que recubre toda la celda. [2]

El principio de una celda GTEM, a modo de introducción, es la generación de un campo eléctrico uniforme dentro de la sección piramidal mediante el funcionamiento de una línea de transmisión expandida en el modo TEM. [3]

3.- Especificaciones y restricciones de diseño

En cuanto a las especificaciones y restricciones de diseño de este proyecto se distinguen varias partes.

Por una parte, tecnológicamente, se necesitan dos entornos de medida como son una cámara anecoica y una celda GTEM, es este caso ambos entornos están disponibles para su uso, ya que son facilitados por la Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (DGTTI). En la misma línea, para las medidas se necesitan diferentes tipos de antenas y por supuesto la instrumentación de medida y el software correspondiente para la realización de los ensayos.

Además, como en cualquier otro proyecto, el condicionante económico tiene un gran valor, ya que las instalaciones donde se realizan las medidas y la instrumentación necesaria para las mismas conllevan un gasto importante en el proyecto.

Otro aspecto importante es la normativa, ya que todo proyecto debe ser conforme a las normas establecidas.

Por otra parte, dado que el objetivo del proyecto es el diseño del un procedimiento de medida de emisiones espurias radiadas utilizando una celda GTEM, el problema que se plantea resolver es verificar si se puede sustituir un entorno, como es una cámara anecoica, por una celda GTEM para la medida de estas emisiones. Por ello, para la resolución de este problema se deben tener en cuenta el comportamiento de una celda GTEM, y sus características como, por ejemplo, su tamaño, que es menor que el de la cámara anecoica y eso será un factor a tener en cuenta dadas las dimensiones de los posibles equipos a los que se tenga que someter a ensayo.

Para abordar este proyecto, dado que es difícil realizar un estudio teórico, la metodología se basará en realizar una comprobación con medidas concretas para ver si se consigue que las diferencias entre los resultados obtenidos utilizando la celda GTEM y la cámara anecoica sean relativamente pequeñas. Posiblemente se necesitará dividir el margen de frecuencias en diferentes bandas, utilizando configuraciones de medida diferentes en función de las necesidades de cada banda de frecuencias, ya que el comportamiento de la celda GTEM empeora con la frecuencia y además el ESE tendrá dimensiones apreciables que complicarán el análisis.

4.- Descripción de la solución propuesta

4.1-Entornos de medida

Existen varios entornos de medida donde se pueden realizar las medidas necesarias, entre ellas las medidas de emisiones, de forma fiable. A continuación se muestran algunos de ellos con sus características.

OATS (Open Area Test Site):

Es un entorno que necesita un terreno plano y sin obstáculos. La configuración de medida consta de un mástil de medida, un plano de tierra que hace de superficie reflectora y una mesa giratoria. Para realizar la medida se coloca el ESE sobre la mesa giratoria y se van realizando las medidas a diferentes alturas moviendo la antena con el mástil de medida y moviendo la mesa. Debido a varios factores como el tiempo, los movimientos de la mesa giratoria, la terminación del plano de masa y la exposición a los elementos externos que puedan radiar, las medidas pueden variar de forma considerable. Los OATS son entornos en los que las medidas de interferencias electromagnéticas se pueden considerar fiables, sin embargo, es complicado y caro conseguir un espacio libre perfecto que esté libre de interferencias.

Cámara anecoica:

Se trata de un entorno cerrado, como una jaula de Faraday, donde las paredes están recubiertas de material absorbente con el objetivo de evitar las reflexiones. Por lo tanto, las cámaras anecoicas tienen la ventaja de que son recintos aislados y no son perturbados por elementos externos. Para lograr ese aislamiento se debe cuidar mucho la construcción de elementos como las puertas, los elementos de ventilación, o cualquier rendija por la que se puedan introducir los efectos de elementos del exterior. De esta manera se obtendrán medidas fiables.

Las cámaras anecoicas se utilizan como un medio alternativo a los OATS para las medidas de emisiones.

Por otra parte, tanto los OATS como las cámaras anecoicas tienen una desventaja, y es que las medidas en estos entornos requieren mucho tiempo.

La celda TEM:

Este entorno está formado por una línea de transmisión con dos conductores, uno central y otro que recubre y delimita el entorno de medida. Esta línea está terminada en punta para terminar en conectores coaxiales estándar (tipo N) y dirigir las señales hacia aparatos de medida. Con el fin de minimizar las reflexiones en el interior de la celda, la impedancia es de 50Ω . Una de las limitaciones de este entorno de medida es que el ESE no puede sobrepasar un tercio de la altura de la celda, para de este modo asegurar que el campo sea uniforme en esa sección.

La celda GTEM:

Este entorno se trata de un híbrido entre una cámara anecoica y una celda TEM. Es un entorno que introduce muchas ventajas frente a los OATS y las cámaras anecoicas:

- Presta un rango de frecuencias de trabajo mayor que una celda TEM.
- Ocupa menos espacio que una cámara anecoica o los OATS.
- Tiene un precio aceptable para las ventajas que ofrece.
- Tiene un buen comportamiento en su rango de frecuencias y ofrece un buen blindaje del exterior.

4.2-Introducción y evolución de la celda TEM

La celda electromagnética transversal, conocida como celda TEM o de Crawford, es una línea de transmisión coaxial rectangular extendida que trabaja en el modo electromagnético transversal.

La estructura típica de una celda electromagnética consiste en una caja metálica con un conductor interno y otro externo entre los cuales se crean campos electromagnéticos transversales estables y uniformes, motivo por el que esta celda se considera adecuada para: calibraciones de medidores de radiación electromagnética, medidas de inmunidad y emisiones en dispositivos o equipos electrónicos.

Desde el primer diseño de una celda TEM, diseñado por Crawford en 1974 [4], se han realizado investigaciones y mejoras para dicha celda.

Las celdas TEM con instrumentos de medida de gran precisión, debido a que tienen un gran aislamiento y no les influye el campo electromagnético externo, al igual que ocurre con las cámaras anecoicas. Por otra parte las celdas TEM son portátiles y de menor coste que las cámaras anecoicas.

Una de las características de la celda TEM es su frecuencia de trabajo, que es función de las dimensiones físicas de la celda, y estas dimensiones condicionan el tamaño físico del ESE. Por lo tanto para ensayos de equipos pequeños la celda TEM presenta una ventaja en cuanto a optimización del espacio.

La primera celda TEM se construyó en 1971 [4], y posteriormente en 1974 Crawford [4] creó el diseño de la celda TEM rectangular que se puede ver en la figura 1 que se desarrollo para propósitos de calibración.

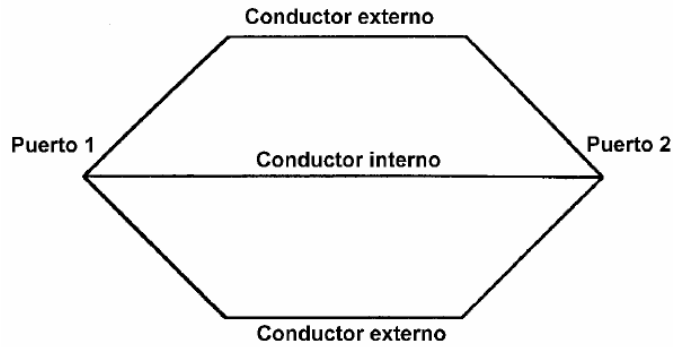


Figura 1. Celda rectangular de Crawford [4]

Como se puede ver en la figura 1, el diseño de la celda de Crawford tiene dos terminaciones de sección piramidal y se construyen para una impedancia de 50Ω , 75Ω etc. Con la finalidad de obtener la mínima relación de onda estacionaria.

A partir de la primera celda TEM, se han ido realizando modificaciones para obtener mejoras, como por ejemplo la celda de la figura 2, denominada celda TEM asimétrica, donde se proponía colocar el conductor interno a $2/3$ de la altura de la celda, en vez de utilizar una altura de $1/2$ como en la celda original, para de ese modo aumentar el volumen de prueba disponible.

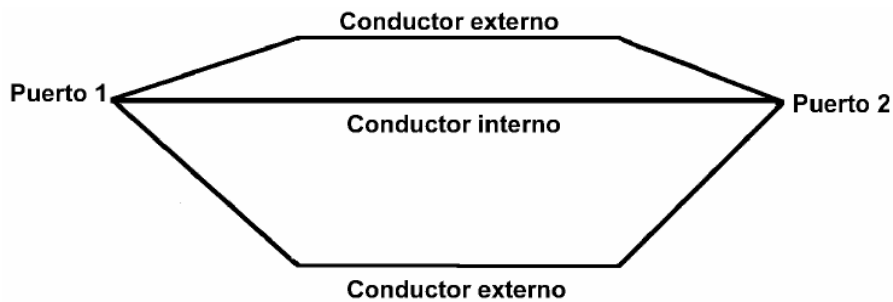


Figura 2. Celda TEM asimétrica [4]

Con el objetivo de compensar los problemas de resonancia que presentan las celdas se propone cubrir la parte interna con material absorbente como se ve en la figura 3 y de este modo se logra aumentar el intervalo de frecuencia en que trabaja la celda.

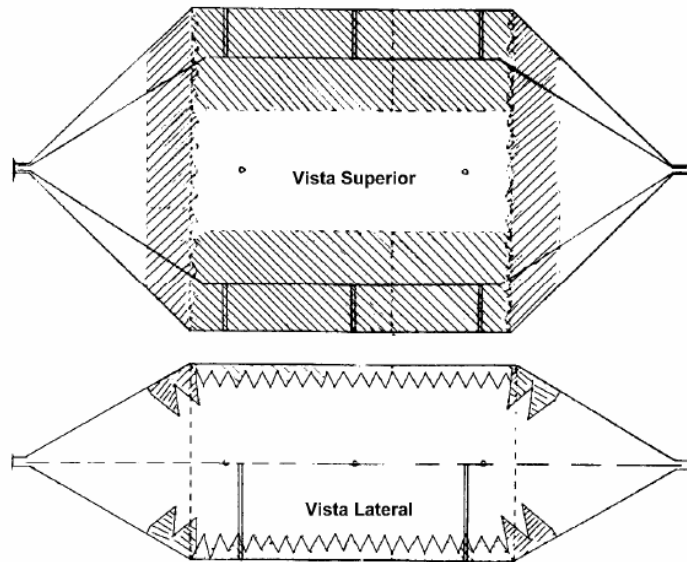


Figura 3. Celda TEM con absorbente [4]

Sin embargo, la presencia de material absorbente dentro de la sección transversal de la celda provoca que los campos electromagnéticos se propaguen más lentos, lo que conlleva un decremento de la uniformidad de campo. Como solución a este problema se propone usar solo la sección piramidal, colocando en la base una carga. Este tipo de celda se ilustra en la figura 4.

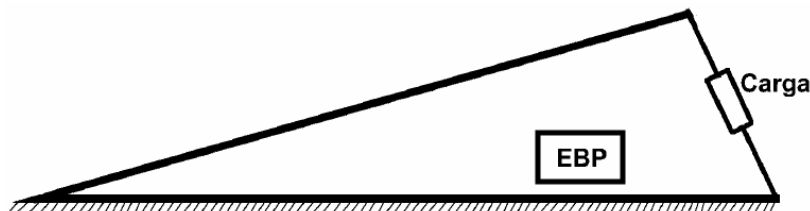


Figura 4. Celda TEM piramidal [4]

Si la señal de radiofrecuencia que se utiliza para excitar la celda TEM tiene una longitud de onda del mismo orden de magnitud que la altura de la pirámide, entonces la carga utilizada no debe ser puramente resistiva, por ello se utiliza también material absorbente [4]. De este modo se combina una parte resistiva para bajas frecuencias con material absorbente para altas frecuencias.

Otra de las celdas TEM fue desarrollada en suiza por Brown Boveri. Se trata de una celda piramidal con un conductor interno asimétrico. Este tipo de celda se llama celda GTEM y se puede ver en la figura 5.

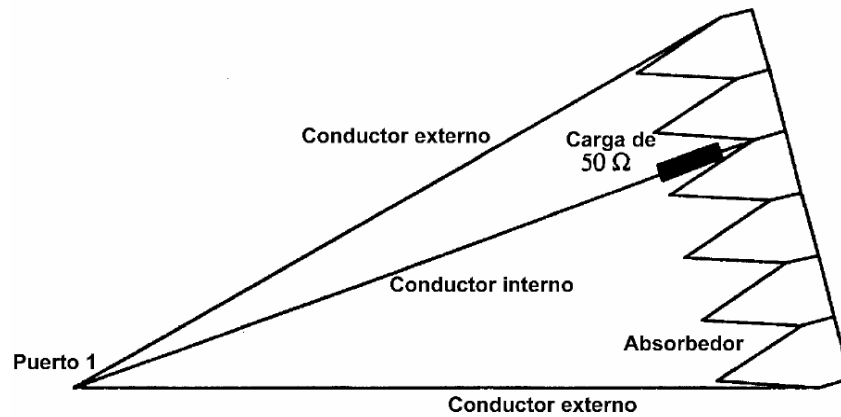


Figura 5. Vista lateral de una celda GTEM [4]

4.3-La celda GTEM

La celda GTEM (Gigahertz Transversal Electromagnetic Mode) fue introducida por D. Königsten and D. Hansen en 1987 [5] y esta celda superó las limitaciones que presentaba la celda TEM previa. Está basada en un híbrido entre una celda TEM y una cámara anecoica, se puede ver como una línea de transmisión rectangular piramidal extendida operando en un modo TEM y terminada en una carga. Su principio de funcionamiento es la generación de un campo uniforme dentro del entorno cerrado, a través de una línea de transmisión extendida en modo TEM.

La celda GTEM tiene un amplio rango de frecuencias y trabaja desde DC hasta los 20 GHz, siendo ésta una de las principales ventajas de la celda GTEM frente a la celda TEM, que solo es capaz de trabajar a frecuencias inferiores a 1GHz. La idea que existía detrás de la celda GTEM era la de evitar las esquinas y los efectos de borde que poseía la celda TEM y que eran la principal razón para las limitaciones de frecuencia que tenía la celda TEM.

El propósito inicial de la construcción de la celda GTEM fue permitir realizar ensayos de las propiedades de radiación de equipos pequeños de acuerdo con los estándares internacionales para la medida de emisiones.

El diseño de la GTEM, tiene una longitud de conductor interno igual a la longitud del conductor externo y por lo tanto el recorrido a lo largo de cada conductor es igual, siendo éste un factor importante ya que para mediciones de impulsos la dispersión del pulso se minimiza.

En cuando a las características físicas de las celdas GTEM su geometría define:

- El máximo volumen de prueba donde colocar el ESE.
- La máxima frecuencia de operación.
- Las características de uniformidad de campo eléctrico.
- El acoplamiento de los campos electromagnéticos
- La relación de onda estacionaria.
- La impedancia del sistema.

Por otra parte, en relación a las características eléctricas, la celda GTEM se concibió para cumplir:

- Una máxima transferencia de energía en la celda (obteniendo una mínima desigualdad entre la impedancia de la línea de transmisión y los puertos).
- Una uniformidad de campos electromagnéticos generados en el volumen de prueba.
- Una respuesta específica en frecuencia.

A continuación, se analizan un poco más a fondo algunos los aspectos anteriores.

La impedancia característica depende de la capacitancia de la línea de transmisión y de la velocidad de propagación de la onda electromagnética. Y a su vez, la capacitancia se determina a partir de la geometría de la línea. Por lo tanto, la impedancia de la celda depende de la geometría de la celda. [6]. En la figura 6 se ilustra la sección transversal de una celda GTEM.

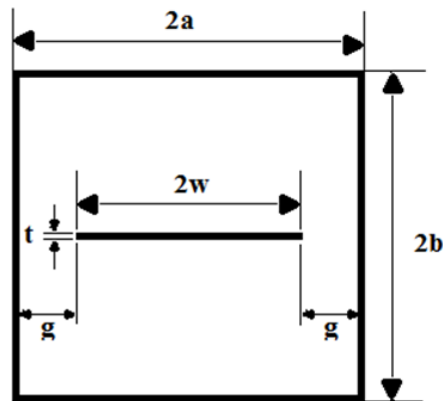


Figura 6. Sección transversal de una celda GTEM. [6]

Donde:

$2a$ = ancho de la celda.

$2b$ = altura de la celda.

$2w$ = anchura del conductor interno o *septum*.

t = grosor del conductor interno.

g = distancia entre el *septum* y las paredes laterales.

La celda GTEM presenta una impedancia de 50Ω [7] [8]. La anchura de la celda se minimiza para obtener este valor de impedancia. El puerto de la celda, o pico de la pirámide tiene una impedancia de 50Ω . En la parte posterior de la celda, o base de la pirámide, existe una terminación híbrida para evitar la propagación de modos a altas frecuencias.

La terminación está compuesta por un conjunto de resistencias paralelas que proporciona una resistencia de 50Ω y unas pirámides absorbentes que constituyen una carga adaptada en todo el rango de frecuencias, para evitar así reflexiones de las posibles desadaptaciones.

El objetivo de esta terminación es, que la reflexión en esta zona de la celda sea muy pequeña y se minimice el efecto de las ondas estacionarias en el campo uniforme dentro del volumen de ensayo.

En cuanto a la parte de los resistores, hasta frecuencias de algunos megahercios con una simple resistencia de 50Ω colocada en la parte de atrás del conductor interno sería suficiente, sin embargo, para altas frecuencias la anchura del conductor interno no permite la colocación de una sola resistencia, ya que los efectos capacitivos e inductivos de la conexión a la pared del fondo producirían reflexiones. Por ello, como solución a este problema se coloca un conjunto de resistores entre el conductor central y la pared del fondo o base de la sección piramidal.

Por otra parte, las pirámides de absorbentes de RF están formadas por un material con pérdidas que absorbe las ondas incidentes. Una de las características del absorbente es que evita las frecuencias parásitas muy bien en su rango de actuación.

El rango de actuación del material absorbente viene dado por la altura de las pirámides en relación con la longitud de onda. Como regla general, el absorbente puede usarse hasta una frecuencia en la que la altura de la pirámide sea la mitad que la longitud de onda [9] como se ve en la ecuación (1). La ecuación (1) proporciona la frecuencia inferior a partir de la que trabaja el material absorbente, es decir, donde tiene buenas pérdidas de retorno.

$$H \geq \lambda/2 \quad (1)$$

Donde:

H = Altura de la pirámide.

λ = Longitud de onda.

Otra de las características importantes de la celda GTEM es la generación de campo eléctrico uniforme entre el conductor interno y el cuerpo de la celda o conductor externo. Muchos estudios han analizado esta característica de uniformidad de campo [10] y han sacado curvas típicas de su distribución que se muestran en la figura 7, donde los datos, que se muestran normalizados, se han tomado entre el conductor central y la parte inferior (o superior) de la celda TEM y donde la altura de la celda es $2b$ y la anchura $2a$.

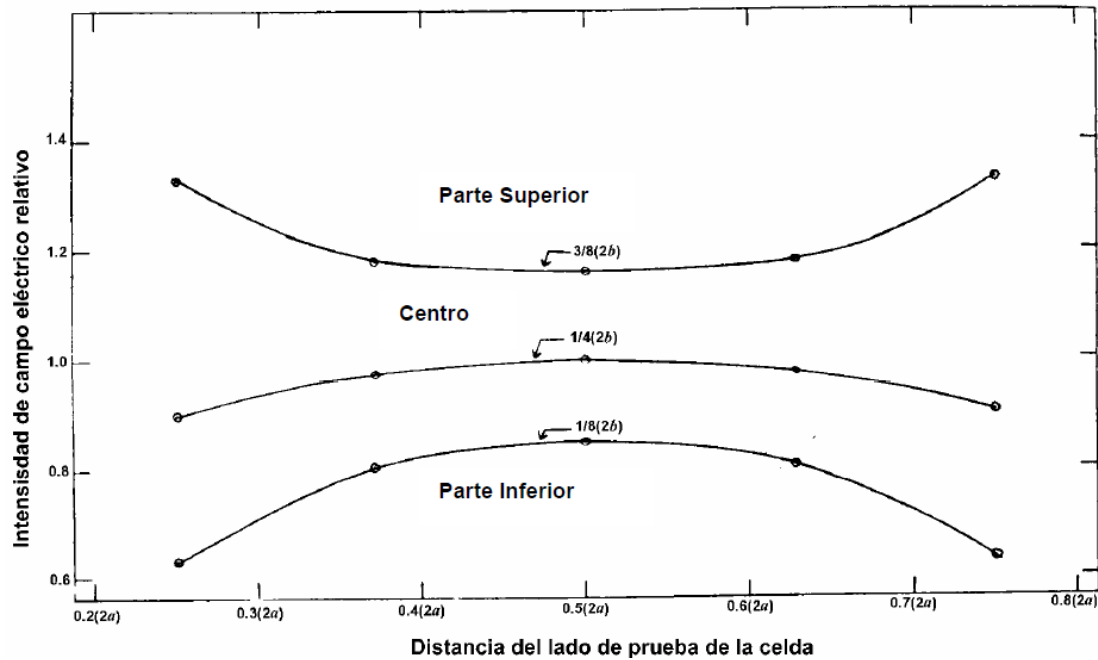


Figura 7. Distribución de campo eléctrico relativo dentro de una celda TEM. [10]

Como se ve en [10] la intensidad de campo es mucho mayor cerca de conductor central, y disminuye a medida que se aleja del mismo. Y la uniformidad de campo es mejor si nos alejamos un poco de los conductores tanto interior como exterior. Estas condiciones delimitan el volumen de prueba que se puede utilizar dentro de una celda. En relación a la distancia entre el *septum* o conductor central y las paredes laterales se fija una distancia para poder despreciar la capacitancia de borde

La uniformidad de campo que se consigue dentro del volumen de pruebas de una celda GTEM depende en gran medida de un bajo nivel de reflexiones desde el extremo final de la celda. Para absorber la mayor parte de la energía que llega al extremo final se monta en la parte posterior una terminación de banda ancha.

La uniformidad de campo es ligeramente peor [5] si comparamos una celda GTEM con una TEM, ya que la asimetría de una GTEM en cuanto a colocación del conductor interno hace que la uniformidad de campo dentro del volumen por debajo del *septum* central empeore, sin embargo esta degradación es despreciable frente a las ventajas del aumento del volumen de ensayo.

La uniformidad de campo es un aspecto muy importante dentro de una celda GTEM, sin embargo alcanzar una uniformidad perfecta no es posible y a frecuencias superiores a 2 GHz esta degradación de uniformidad se incrementa [11]. La causa de una uniformidad no perfecta viene dada por las reflexiones que se producen dentro de la celda GTEM, también por la excitación de modos más altos debidos a los objetos dentro de la celda, y estas son razones para que existan esas fluctuaciones en el área de ensayo.

Debido a los pequeños ángulos de la apertura, 20° en el plano vertical y 30° en el plano horizontal, al utilizar un generador y conectarlo a la celda GTEM para crear un campo, el modo de propagación es el modo TEM. A pesar de que las ondas son, en este caso, ligeramente esféricas, como los ángulos de apertura son pequeños estas ondas se asemejan mucho a las ondas planas en el espacio libre. Por lo tanto, los procedimientos de medida en

una celda GTEM pueden ser comparados con los estándares de medida de las cámaras anecoicas.

Cuando se utiliza una antena como transmisor en la celda GTEM, la posición de la antena influye en la forma en la que se excitan los modos superiores, esto significa que en diferentes áreas pueden acoplarse varios modos.

Los modos de orden superior no puedan propagarse hasta el puerto de la celda [11] debido a las dimensiones decrecientes en la sección transversal, ya que esta disminución de la sección hace que vaya aumentando la frecuencia de corte hasta que solo el modo TEM se puede propagar de manera eficiente. Parte de la energía que pasa a modos superiores puede llegar al modo TEM, o se refleja de nuevo hacia el final de la celda. Esta pérdida de energía no se puede medir en el puerto de la celda, y esto afecta a las medidas que se realizan. Además la energía de modos de orden superior que puede propagarse aumenta con la frecuencia, por lo que las medidas dependerán de la frecuencia utilizada.

En la figura 8 se ilustra cómo se distribuye la potencia dentro de una celda GTEM en los diferentes modos a una frecuencia de 700 MHz.

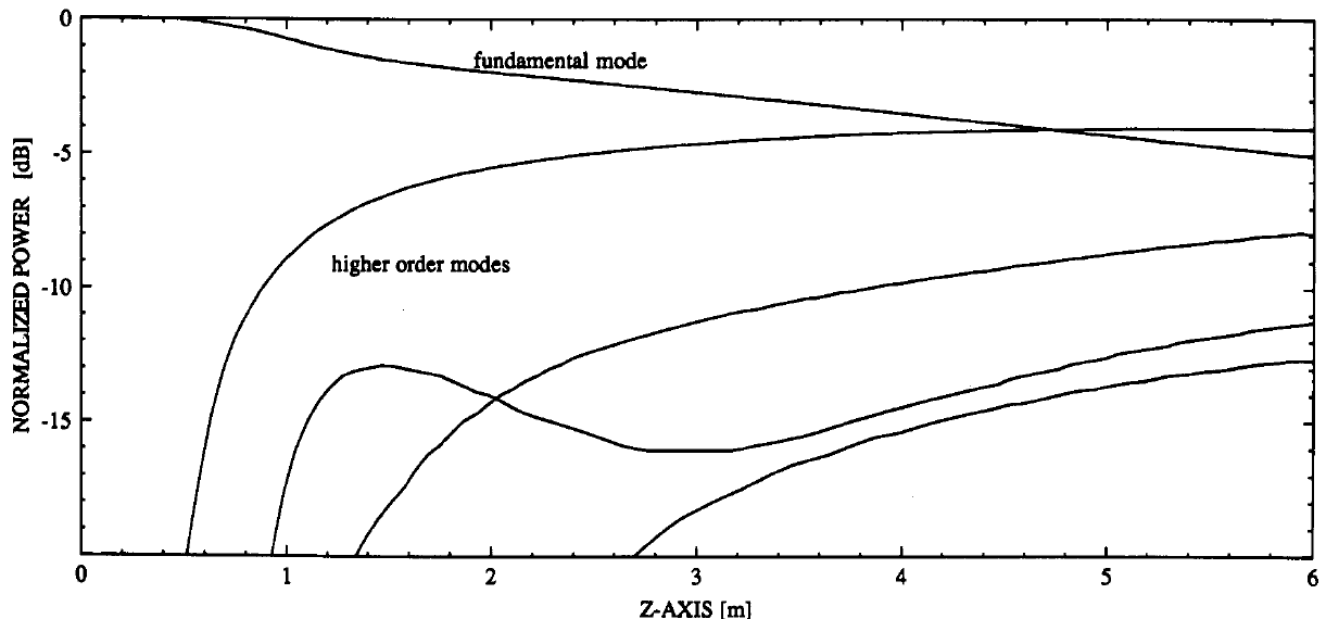


Figura 8. Distribución de potencia en una GTEM [12]

En cuanto a la intensidad del campo eléctrico, dentro de una celda GTEM, depende de la potencia de entrada [5], o dicho de otra manera, depende de la tensión que existe en el extremo de la GTEM, la impedancia de la celda GTEM y de la altura desde el suelo de la GTEM, o conductor externo, hasta el conductor interno o *septum*. la intensidad viene dada por la fórmula (2).

$$E = \frac{\sqrt{P \cdot Z}}{h} \quad (2)$$

Donde

E = Campo eléctrico nominal.

P = Potencia de entrada a la GTEM.

Z = Impedancia de la celda GTEM.

h = Altura desde el suelo hasta el conductor interno o *septum*.

Otro parámetro muy importante es el volumen de ensayo utilizable.

Se define un volumen de ensayo, que está situado en el centro del volumen de la celda GTEM, por debajo del conductor interno, y justo delante de las puntas de material absorbente, ya que no todo el espacio dentro de la GTEM constituye el volumen de ensayo utilizable. En este volumen de ensayo las variaciones de intensidad de campo están dentro de un límite definido. Esto garantiza la fiabilidad y repetitividad de las medidas.

En cuando a la extensión vertical del volumen de ensayo está restringida a 1/3 de la altura entre el suelo de la GTEM y el conductor interno. Esto es debido a dos razones, la primera de ellas es que en esta región la intensidad de campo se mantiene suficientemente constante en esta región, y la segunda de las razones es que equipos muy grandes podrían alterar demasiado la distribución de los campos y las mediciones no se podrían considerar fiables. Por lo tanto, la altura de un ESE no debe superar un tercio de la altura de la celda para poder garantizar unos buenos resultados de medida.

Una de las ventajas de la celda GTEM frente a la TEM está relacionada con el volumen de ensayo, ya que al colocar el *septum* en el último tercio de la altura de la celda GTEM, se aumenta el volumen de ensayo disponible.

Por otra parte, la celda GTEM puede utilizarse tanto para medidas de inmunidad radiada como para medida de emisiones tal y como se indica en [13, 14, 15,16]. Es aceptable el uso de una celda GTEM como medio de medida de emisiones alternativo a los OATS, ya que las medidas de emisiones en ambos entornos de medida dan resultados muy similares.

La celda GTEM se comporta como un transductor en las medidas de emisión, por esta razón no es necesario el uso de antenas, evitando de esta manera la necesidad de tener que cambiar las antenas para cada rango de frecuencias, siendo ésta otra de las ventajas de la celda GTEM.

Para la medida de emisiones, en el extremo de la GTEM se debe conectar un receptor que sea capaz de medir el voltaje producido por la emisión del ESE. Se puede asumir que solo será medida la potencia que vaya a lo largo del eje longitudinal hacia la punta de la celda GTEM y que en cualquier otra dirección las ondas provocadas por el ESE no se propagan. Ese voltaje está relacionado con la radiación electromagnética que está emitiendo el ESE en la dirección indicada anteriormente.

4.4-Verificaciones de la celda GTEM

A continuación, con el objetivo de verificar el comportamiento del campo eléctrico dentro de la celda GTEM, se han realizado una serie de medidas usando una celda GTEM, una sonda de medida de nivel de campo eléctrico, y el correspondiente software de medida de la sonda y el programa EMC 32 utilizado para la medida de inmunidad y emisiones.

Las medidas de verificación utilizan una configuración independiente al resto de medidas utilizadas en este proyecto, por este motivo hay un rango de frecuencias que no se evalúa ya que no se dispone de equipos que trabajen adecuadamente en ese rango. Para el resto de medidas de este proyecto las medidas se realizan en todo el rango indicado en cada caso.

En primer lugar analizaremos el punto en el que se va a colocar la sonda de medida.

Dado que la celda GTEM se muestra en las figuras 9 y 10 con sus ejes correspondientes, se tomarán estos ejes como los ejes de referencia. Las dimensiones de la GTEM utilizada en el presente PFG, sin tener en cuenta posibles soportes como patas, son:

Longitud = 3 m

Anchura = 1.6 m

Altura = 1.7 m

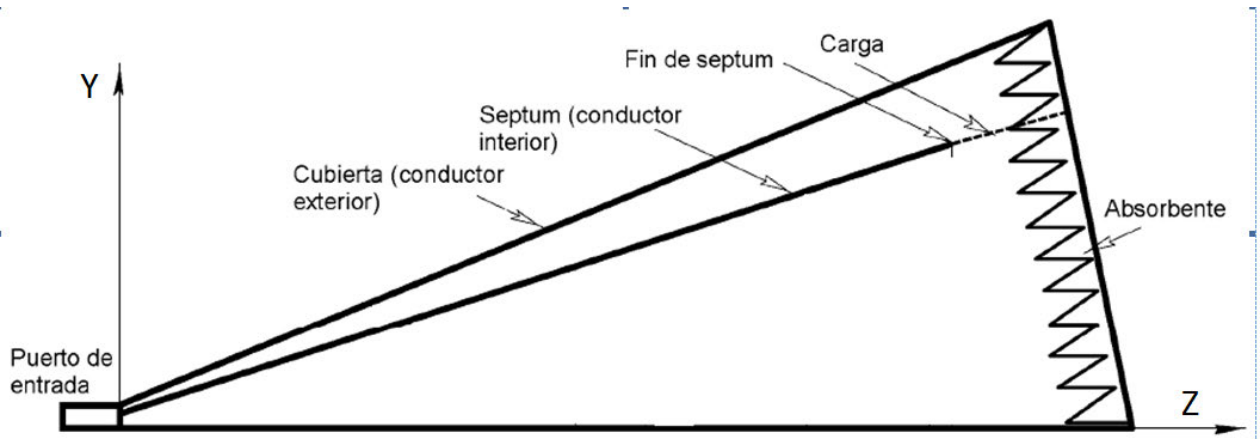


Figura 9. Vista lateral de la celda GTEM [1]

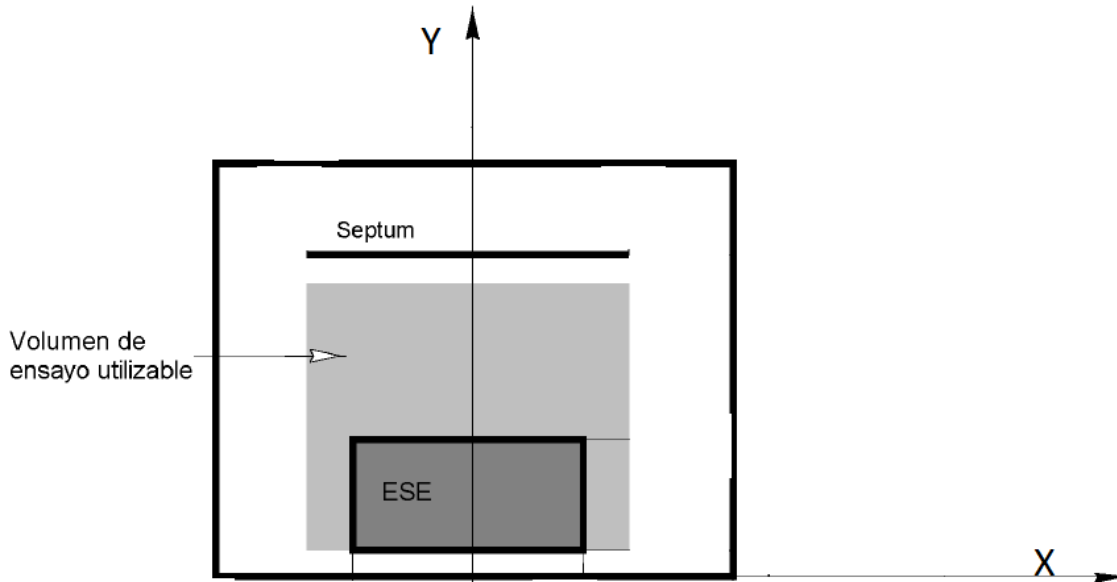


Figura 10. Sección transversal de la celda GTEM [1]

Las medidas para el rango de frecuencias desde 80 MHz hasta 1 GHz se realizarán utilizando la sonda que aparece en la figura 11.1. Como puede apreciarse esta sonda nos permitirá obtener las tres componentes del campo eléctrico, la componente “x”, la componente “y” y la componente “z”. Esta sonda tiene unas dimensiones aproximadas de 11 cm, tanto en ancho como en largo y en alto, y se irá colocando en diferentes posiciones dentro de la celda GTEM. También se utilizará la sonda de la figura 11.2 para las medidas en el rango de frecuencias entre 6 GHz y 13 GHz. En el rango de frecuencias de 1 GHz hasta 6 GHz no se realizarán las verificaciones ya que no se dispone de todos los equipos de medida necesarios para realizar las verificaciones en ese rango de frecuencias.

Para las medidas en el rango de 80 MHz hasta 1 GHz se utiliza una configuración cuya obtención se omite en esta memoria ya que se basa en una configuración ya utilizada por la DGTTI, obtenida a partir de estudios previos, que no es relevante para el desarrollo siguiente de este proyecto. La potencia de transmisión es de 30 dBm, y en el rango de 6 GHz hasta 13 GHz se utiliza la configuración de medida más sencilla posible, basada en un transmisor, un amplificador, ya que se necesita un nivel alto de potencia para poder medir el campo eléctrico en la GTEM a altas frecuencias, y también se usa un acoplador direccional, un receptor y, por supuesto, la celda GTEM. En este rango se utiliza una potencia inicial de -5 dBm, y el amplificador posee una ganancia de 42 dB.



Figura 11.1 Sonda de medida frecuencias hasta 1 GHz.



Figura 11.2 Sonda de medida frecuencias superiores a 6 GHz

Las posiciones de las sondas variarán con el objetivo de realizar un análisis espacial y obtener el comportamiento del campo eléctrico en diferentes puntos del interior de la celda GTEM

Las posiciones serán cercanas a la parte más central de la celda GTEM ya que la uniformidad de campo en esta zona es mejor [10].

En algunas de las siguientes medidas también se debe tener en cuenta que la sonda se debe colocar en el tercio intermedio de la altura entre el *septum* y el conductor externo inferior, ya que en ese tercio es donde el campo se mantiene más uniforme [11].

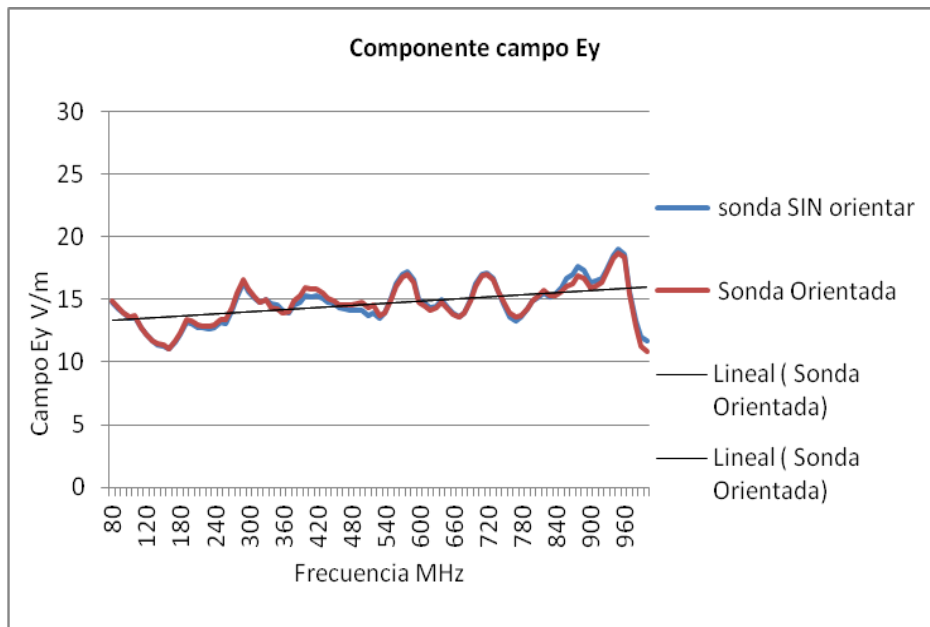
4.4.1-Verificación de orientación

Se podría suponer, y se puede verificar en [17], que la orientación del ESE, o en este caso la sonda de medida, influye en la medida de campo obtenida.

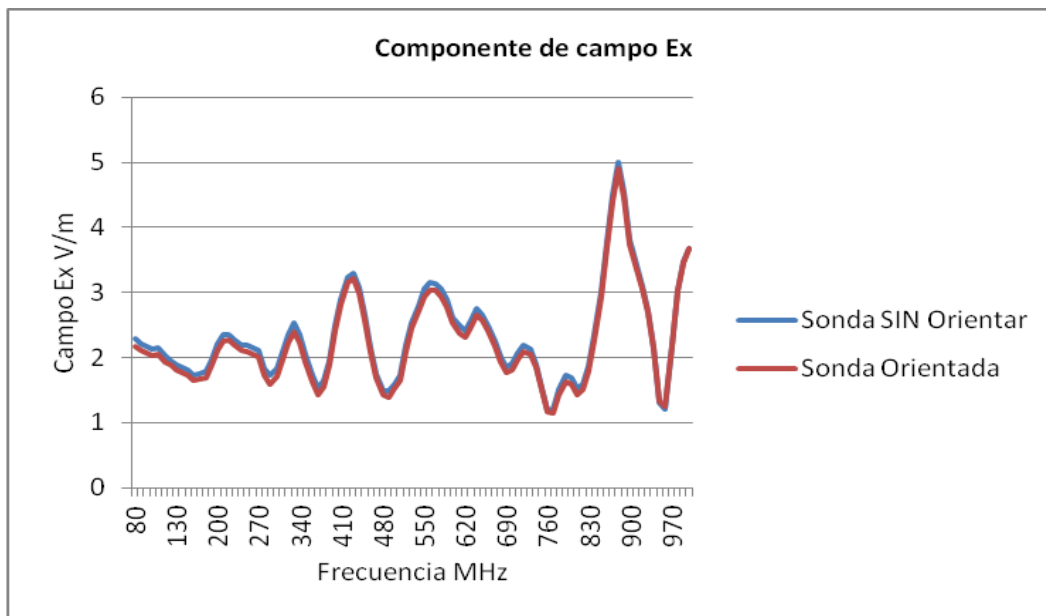
Para verificarlo nosotros experimentalmente se realiza la siguiente medida: Se introduce una potencia de 30 dBm (1W) en el puerto de la GTEM, se coloca la sonda en el punto $Z=2$ m, $Y=23$ cm, $X=0$ m, que a partir de ahora se llamará punto 1, y se obtienen los resultados que aparecen en las figuras 12, 13 y 14, al orientar o no la sonda hacia el extremo de la GTEM.

En este punto de medida debemos comprobar que la altura de la sonda se encuentra en el tercio intermedio de la altura entre el conductor interno o *septum* y el conductor externo, para asegurar la uniformidad de campo. En este caso la altura del *septum* es de 52 cm por lo que la sonda debe estar colocada a una altura Y comprendida entre 17.3 cm y 34.6 cm.

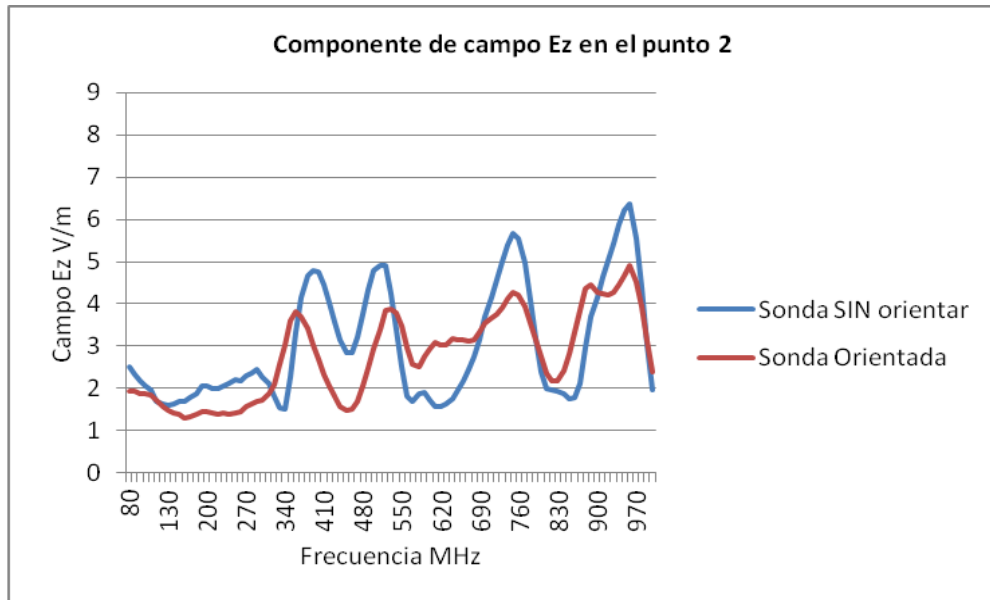
En las gráficas 1, 2 y 3 vemos los resultados obtenidos de las medidas realizadas con la sonda en el margen de frecuencias de 80 MHz a 1 GHz. Tenemos dos curvas, una cuando orientamos la sonda de medida hacia el extremo, o puerto de la celda GTEM, y otra cuando no se orienta la sonda y se deja alineada con el eje Z .



Gráfica 1. Componente Y de campo eléctrico en función de la orientación.



Gráfica 2. Componente X de campo eléctrico en función de la orientación.



Gráfica 3. Componente Z de campo eléctrico en función de la orientación.

En la gráfica 1 se muestra el comportamiento de la componente “Y” del campo eléctrico, que es la componente que posee el valor más alto de campo, y la componente que más se va a analizar. Como se observa en la gráfica 1, la componente “Y” del campo no varía apenas si orientamos la sonda hacia el extremo de la GTEM o si se alinea con el eje Z, por lo tanto podremos decir que la orientación no afecta apenas a la medida del nivel de campo. Así pues, por comodidad, para las medidas de emisiones no será necesario orientar el ESE para esta componente, que recordamos es la d mayor nivel.

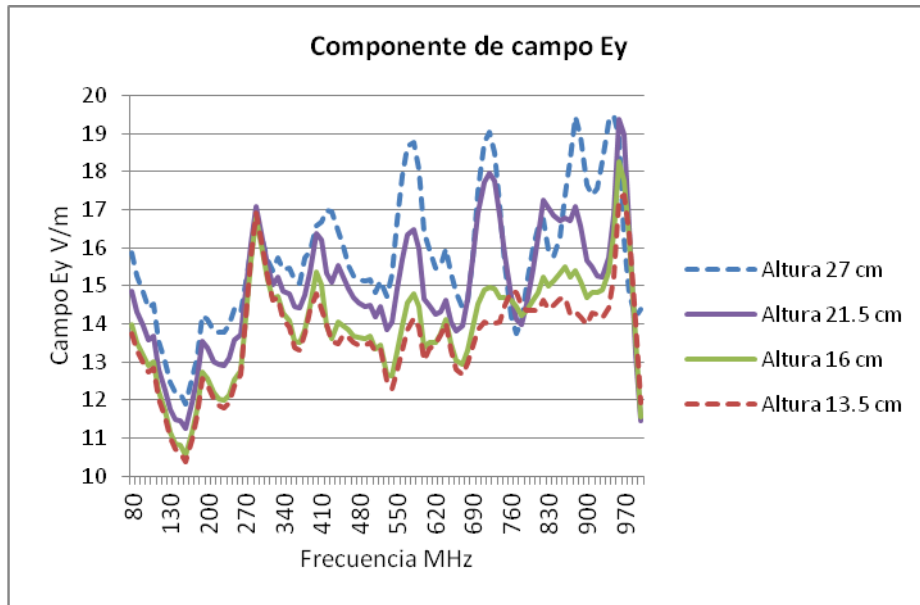
En las gráficas 2 y 3 aparecen las otras dos componentes de campo, la componente “X” y la componente “Z”, ambas con niveles bastante más bajos que la componente “Y”. La componente “X” tiene un comportamiento similar a la componente “Y”, es decir, cuando oriento o no la sonda tiene un comportamiento muy similar. En cuanto a la componente Z, varía ligeramente su comportamiento, dando valores menores, y por lo tanto mejores, si oriento la sonda. En este caso, la orientación es beneficiosa para la medida, pero como esta mejora no es considerable, ya que el nivel es bastante inferior al de la componente “Y”, se seguirá manteniendo, más que nada por sencillez y comodidad, la decisión de no orientar el ESE en las medidas de emisiones.

4.4.2-Verificación de posición en el eje Y

En las siguientes medidas se analiza el comportamiento del campo eléctrico en función de la distancia del ESE al conductor interno o *septum*.

Para estas medidas se toma como punto de medida el punto 1, donde la altura del *septum* es de 52 cm y, a partir de los resultados obtenidos en las medidas anteriores, se realizan sin orientar la sonda hacia el extremo de la GTEM.

La gráfica 4 muestra el comportamiento de la componente “Y” del campo eléctrico en función de las diferentes alturas medidas desde el suelo de la GTEM hasta la sonda de medida.



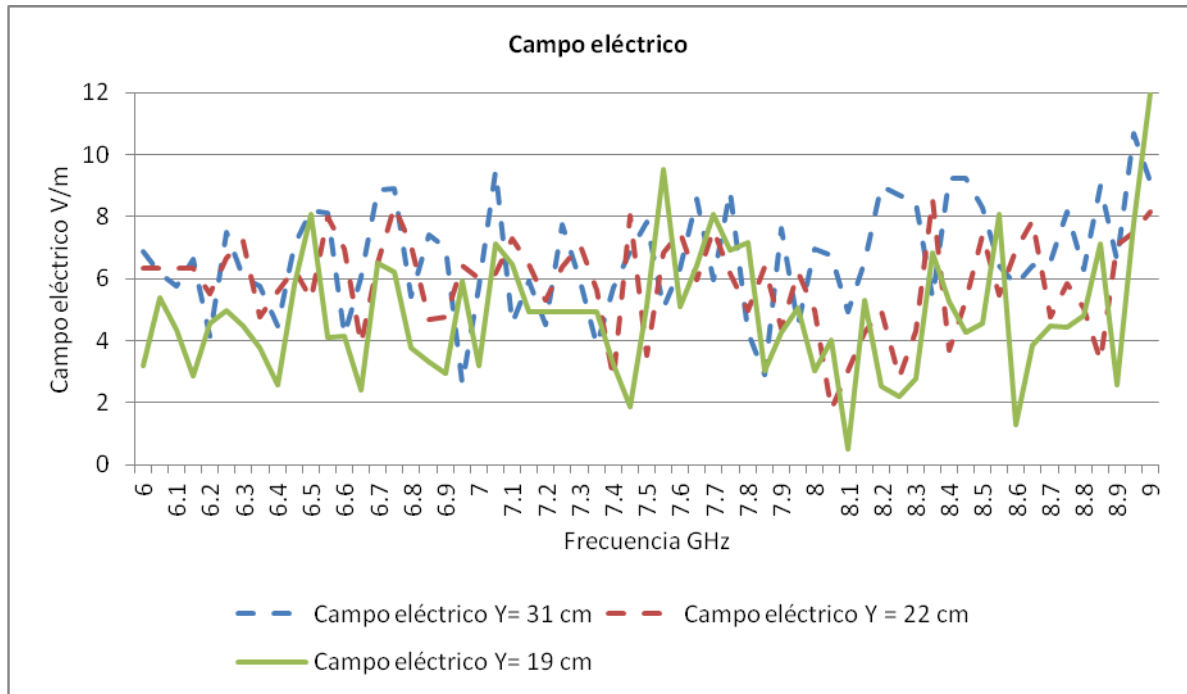
Gráfica 4. Intensidad de campo en función de la altura.

Como se puede observar en la gráfica 4, la intensidad del campo eléctrico es mayor a medida que el ESE, o en este caso la sonda de medida, se acerca al conductor interno. Esta misma conclusión puede obtenerse de [10].

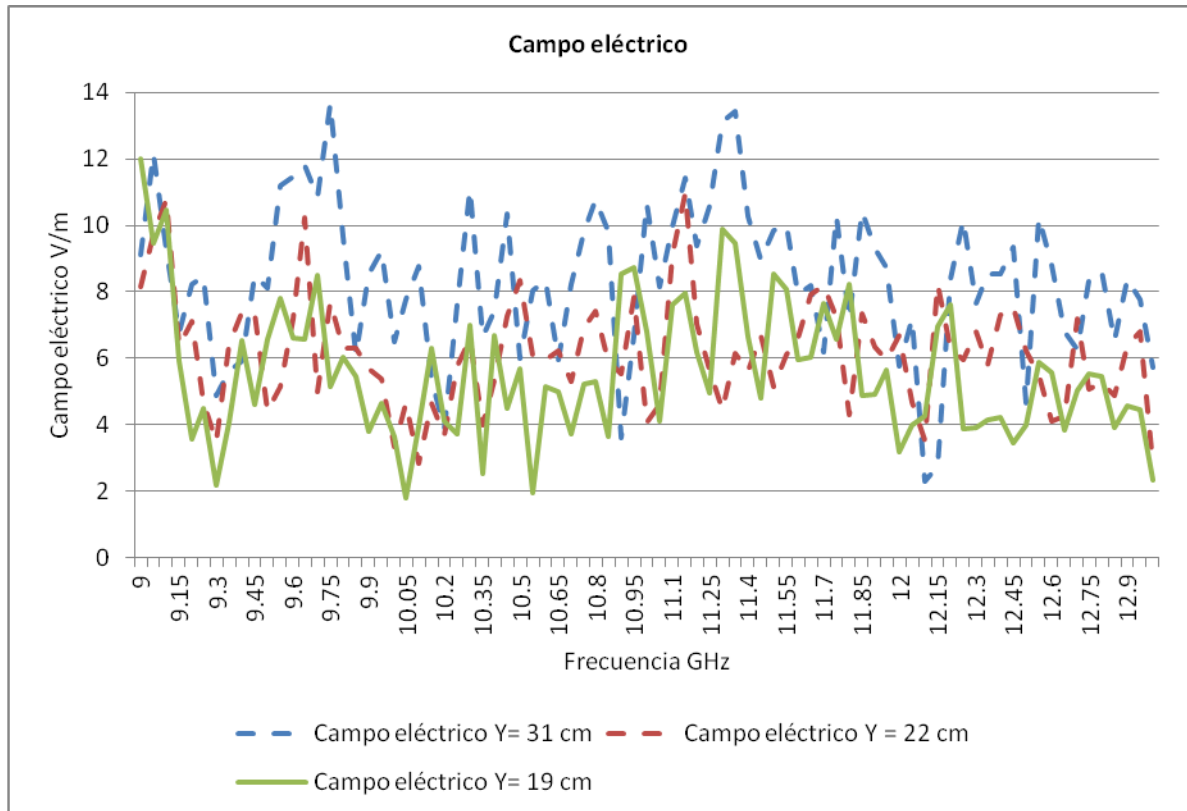
El siguiente paso es observar qué sucede en el margen de frecuencias más elevado. Para ello en las siguientes medidas se analiza el comportamiento del campo eléctrico en función de las diferentes distancias al conductor interno o *septum*, en el rango de frecuencias de 6 GHz hasta 13 GHz, con el objetivo de observar el comportamiento del campo eléctrico en el margen de frecuencias más altas.

Para estas medidas se sigue tomando como punto de medida el punto 1, donde la altura del *septum* es de 52 cm y, a partir de los resultados obtenidos en las medidas anteriores, se realizan sin orientar la sonda hacia la punta de la GTEM.

Las gráficas 5 y 6 muestran el comportamiento de la componente “Y” del campo eléctrico en función de la frecuencia para las diferentes alturas utilizadas desde el suelo de la GTEM hasta la sonda de medida.



Gráfica 5. Campo eléctrico de 6 GHz hasta 9 GHz



Gráfica 6. Campo eléctrico de 9 GHz hasta 13 GHz.

Como se puede observar en las gráfica 5 y 6, (se ha dividido el margen de frecuencias en dos para una mejor visualización de las gráficas), para puntos de medida más próximos al *septum* el campo eléctrico es mayor, al igual que ocurre en frecuencias bajas, desde los 80 MHz hasta 1 GHz.

Por otra parte, es importante destacar que para todas las medidas realizadas, tanto para el rango de frecuencias bajas (de 80 MHz – 1 GHz) como para el rango de frecuencias altas (6 GHz – 13 GHz), se observa que existe un rizado en la medida del campo eléctrico, por lo tanto podemos deducir que la celda GTEM tiene un rizado. El análisis de este rizado se analiza más a fondo en el apartado correspondiente al análisis del rizado de este proyecto.

Además, centrando la atención en la parte de medidas del campo eléctrico en el rango de 6 GHz – 13 GHz, se observa que los máximos de campo no coinciden en frecuencia para las diferentes alturas a las que se coloca la sonda, esto permítenos indica que deberemos hacer un análisis espacial, y no solo en un punto de la celda GTEM, ya que se puede observar que, dependiendo del punto de medida utilizado, los máximos del campo eléctrico varían con la frecuencia.

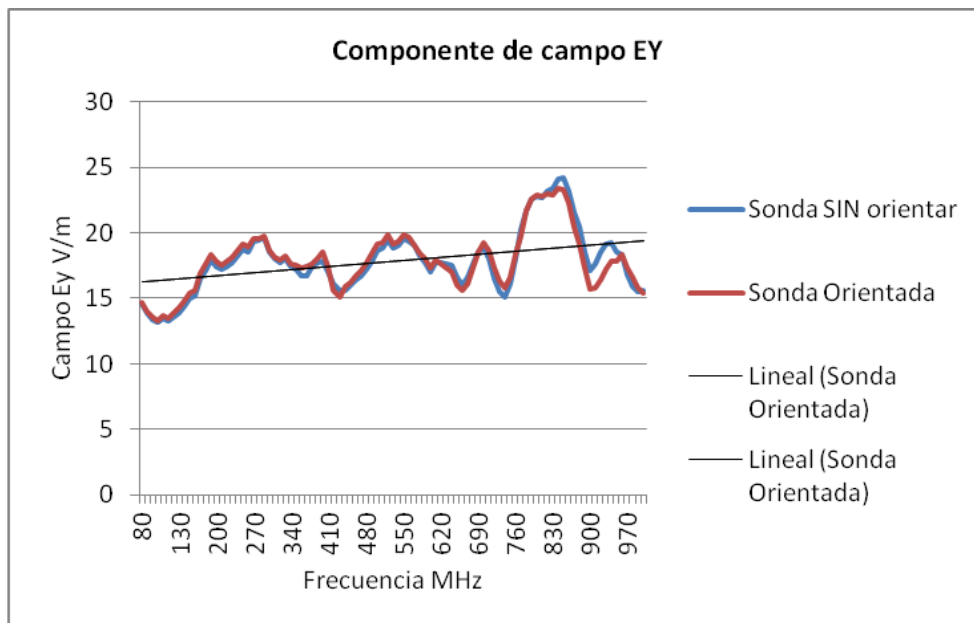
4.4.3-Verificación de posición en el eje Z

En este apartado analizaremos los dos rangos diferenciados de medida, el primero, el rango desde 80 MHz hasta 1 GHz y el segundo, desde 6 GHz hasta 13 GHz. En el rango de 6 GHz – 13 GHz se analizará únicamente la componente “Y” del campo eléctrico porque es la componente que más información aporta.

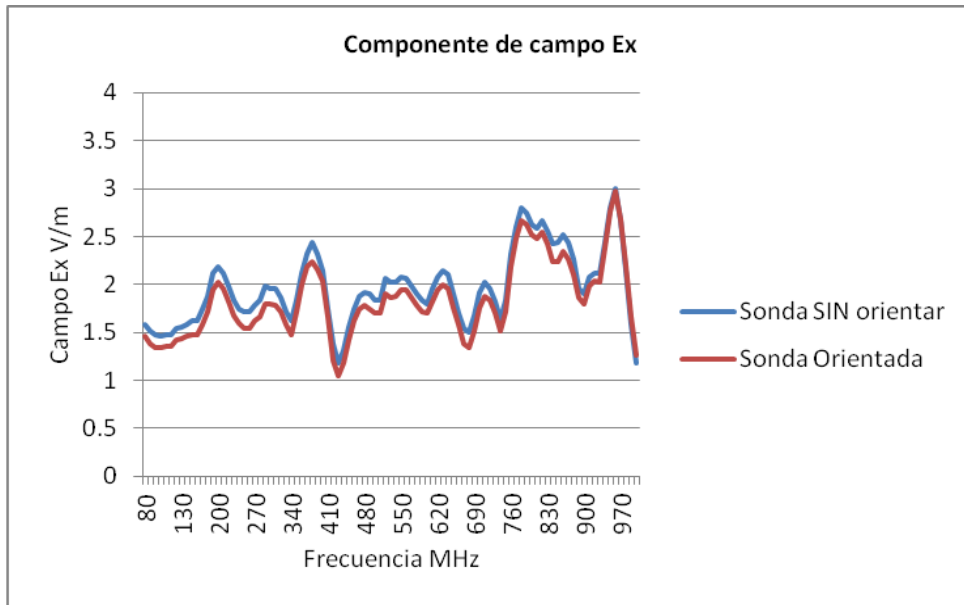
Comenzando por el rango de frecuencias bajas, en la primera medida se comprueba el comportamiento del campo eléctrico en un punto más cercano al puerto de la celda GTEM.

Se coloca la sonda en el punto $Z= 1.7$ m, $Y= 19.5$ cm $X=0$ m, que a partir de ahora se llamará punto 2, donde la altura entre el *septum* y el conductor interno es de 44 cm, por lo tanto la sonda debería de estar entre 14,7 cm y 29.33 cm.

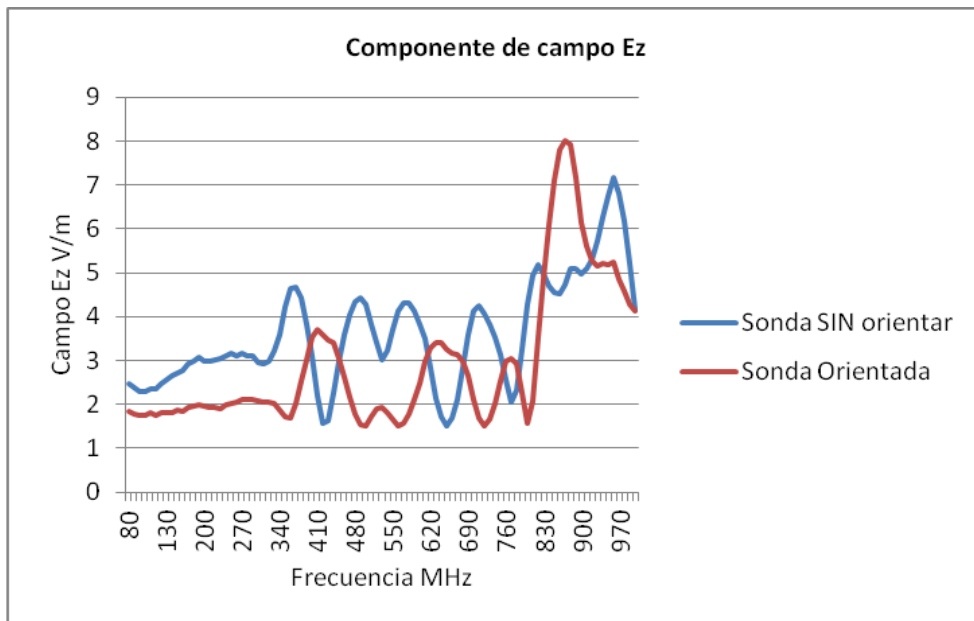
Se introduce nuevamente una potencia de 1 W y en las gráficas 7, 8 y 9 se representan los resultados obtenidos para cada una de las componentes del campo eléctrico cuando acerco la sonda al puerto de la GTEM y oriento la sonda o no hacia el mismo.



Gráfica 7. Componente Y de campo eléctrico



Gráfica 8. Componente X de campo eléctrico



Gráfica 9. Componente Z de campo eléctrico

Las gráficas 7 y 8 representan, respectivamente, la componente “Y” y la componente “X” del campo eléctrico. Ambas componentes presentan un comportamiento muy similar cuando se realiza o no la orientación de la sonda para medir la componente correspondiente.

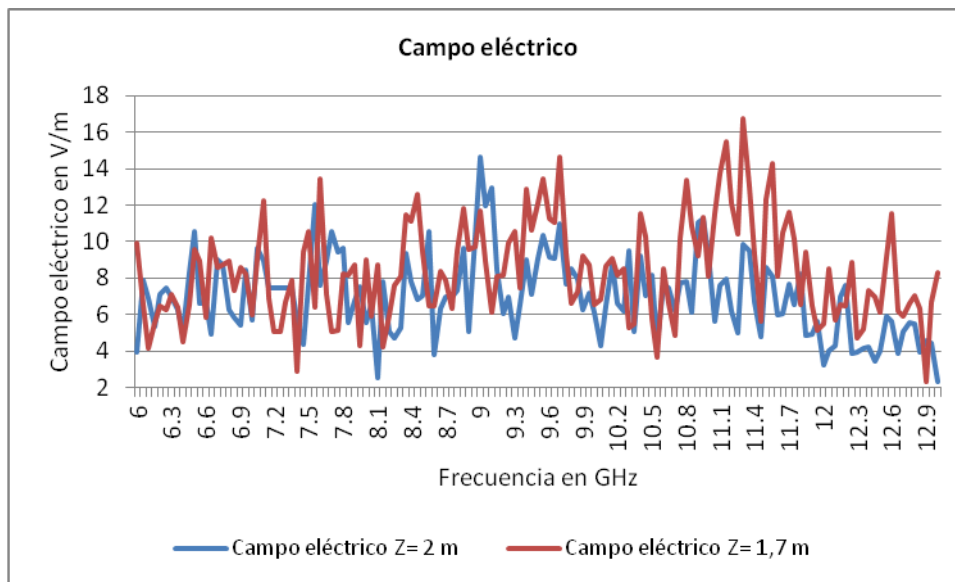
En la gráfica 9 se representa la componente “Z” de campo eléctrico, que a pesar de mostrar una variación mayor que las otras componentes de campo tiene un comportamiento relativamente similar a la componente Z del campo medida en el punto 1.

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que, además de poder despreciar la orientación hacia el puerto de la GTEM, en términos de incertidumbre tanto la posición 1 como la posición 2 se comportan de manera muy parecida. Por tanto se puede elegir cualquiera de los dos puntos indistintamente para realizar las medidas. En un principio se tomaron estos dos puntos distintos ya que, a una distancia menor del puerto de la GTEM, la

inclinación que debe tomar la sonda de medida es mayor para conseguir orientarla hacia el puerto de la GTEM y por lo tanto se quería verificar si la diferencia de orientación en función de la distancia al puerto de la GTEM era destacable o no en relación al comportamiento del campo eléctrico.

Por otra parte, debido a la forma piramidal de la celda GTEM, la parte más alejada de la punta de la GTEM, y por lo tanto, más cercana a la base de la pirámide, proporciona un volumen de ensayo mayor, por este motivo el punto 1 presenta una ventaja, ya que permite un volumen mayor de un posible ESE que se introduzca en la celda GTEM para ser ensayado.

En cuanto al segundo rango de frecuencias, desde 6 GHz hasta 13 GHz, se analiza la componente Y de campo eléctrico comparando dos puntos de medida donde $X = 0$ m, $Y = 20$ cm y es la variable Z la que toma dos valores, en función de las dos posiciones donde se sitúa la sonda de medida, obteniendo así las medidas de la gráfica 10.



Gráfica 10. Campo eléctrico a lo largo del eje Z.

De la gráfica 10 se deduce, por una parte, que para el punto de medida donde $Z = 1,7$ m, el campo es mayor debido a que en ese punto el campo se encuentra más próximo al *septum* y por lo tanto los niveles de nivel de campo son mayores [10].

Por otra parte, se observa también, además de que existe rizado en toda la banda, que para posiciones diferentes a lo largo del eje Z los máximos de campo eléctrico no coinciden en frecuencia, al igual que ocurre al variar el punto de medida a lo largo del eje Y.

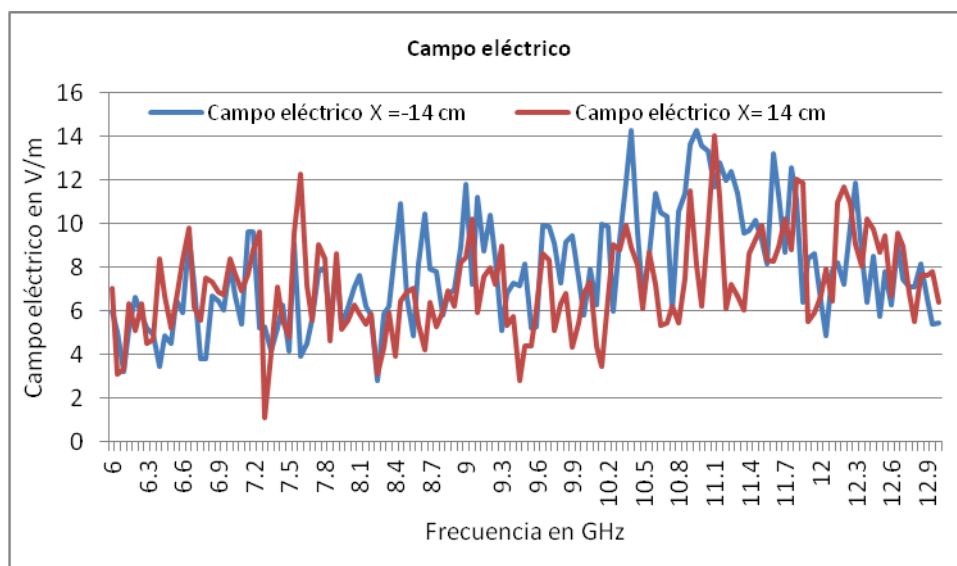
4.4.4-Verificación de posición en el eje X

Las siguientes medidas se realizan para verificar el comportamiento de la componente “Y” del campo eléctrico en dos puntos de medida a lo largo del eje X de la GTEM. Los dos puntos de medida tienen $Z = 2$ m, $Y = 22$ cm y la variable X toma dos valores: $X = 14$ cm y $X = -14$ cm en función de la colocación de la sonda.

Las verificaciones en el eje “X” solo se realizan a frecuencias en el rango de frecuencias desde 6 hasta 13 GHz ya que cuando se realizaron las medidas en bajas frecuencias no se tuvo

en cuenta este eje porque se tomaba como eje de medida principal el eje “Y”. Las medidas en los otros dos ejes se toman como valores de incertidumbre.

La gráfica 11 muestra las medidas de campo eléctrico obtenidas en ambos puntos de medida.



Gráfica 11. Campo electrico a lo largo del eje X.

La gráfica 11 muestra, de la misma manera que las medidas a lo largo del eje Z y del eje Y, que la celda GTEM presenta un rizado en la banda de 6 GHz a 13 GHz, además, igual que en las medidas anteriores, los valores máximos del nivel de campo se obtiene en diferentes frecuencias al comparar las medidas en las dos posiciones a lo largo del eje X.

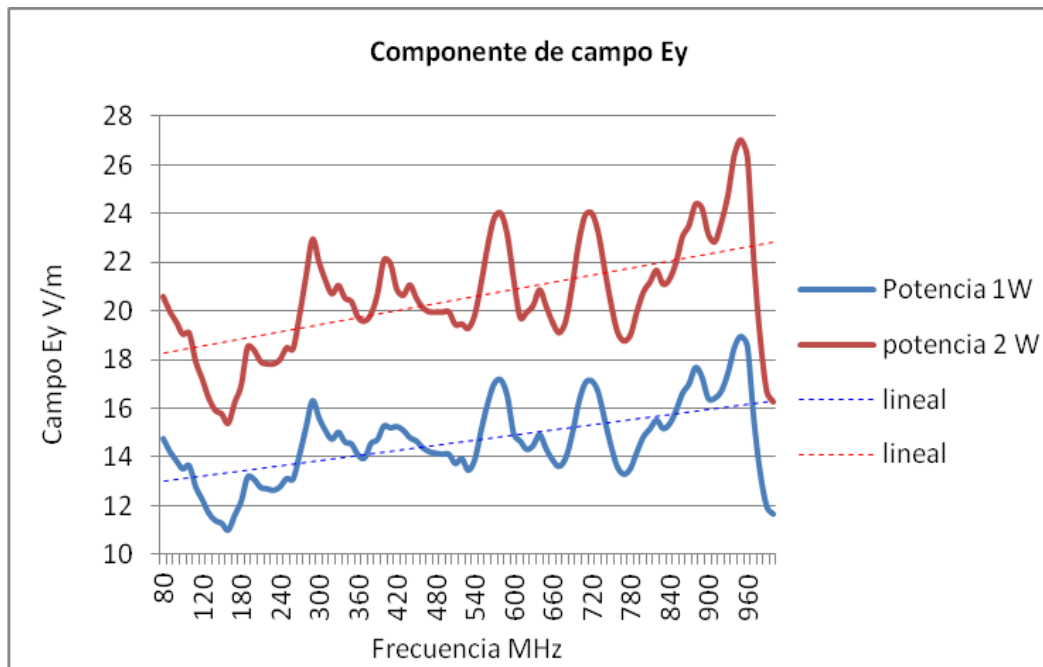
Tanto el rizado que presenta la celda GTEM como el análisis espacial realizado en los diferentes puntos de la celda GTEM que muestran que los máximos de nivel de campo varían en frecuencia en función del punto de media de la GTEM se tendrán en cuenta a lo largo del proyecto para justificar las medidas realizadas más adelante.

4.4.5-Verificación de relación campo-potencia

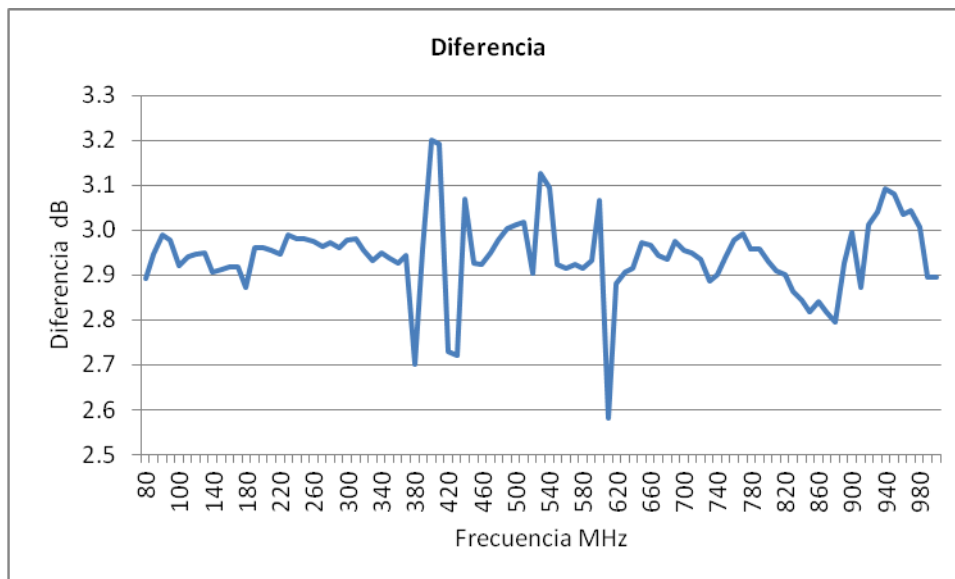
Para la realización del ensayo lo que realmente necesitamos es obtener los niveles de potencia emitidos por el ESE, por tanto deberemos obtener una relación entre los niveles de campo que hemos medido y la potencia emitida. Las siguientes medidas verifican la relación que existe entre la potencia de entrada que se introduce en el extremo, o puerto, de la GTEM y el campo eléctrico generado en el interior de la celda GTEM.

Ambas medidas se realizan en el punto 1 de medida descrito en apartados anteriores. En un caso la potencia que se introduce es de 1 W de potencia y en la segunda medida la potencia introducida es de 2W, es decir, el doble de potencia, 3 dB más.

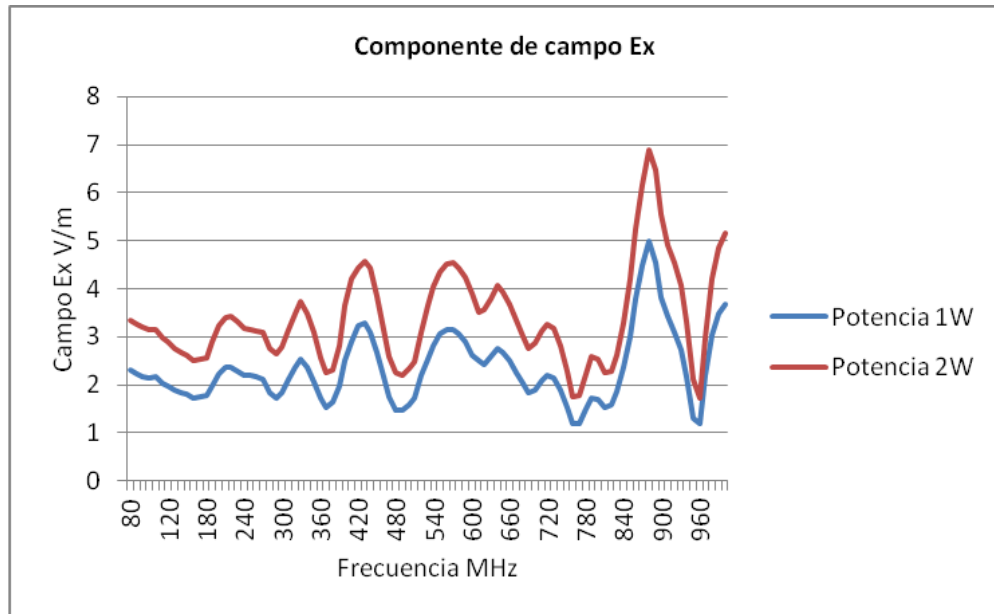
La gráficas 12, 13 y 14 muestran el comportamiento de las tres componentes de campo eléctrico al variar la potencia de entrada en 3 dB. Y las respectivas gráficas 12.1, 13.1 y 14.1 muestran la diferencia en dB que existe entre las dos medidas de cada gráfica.



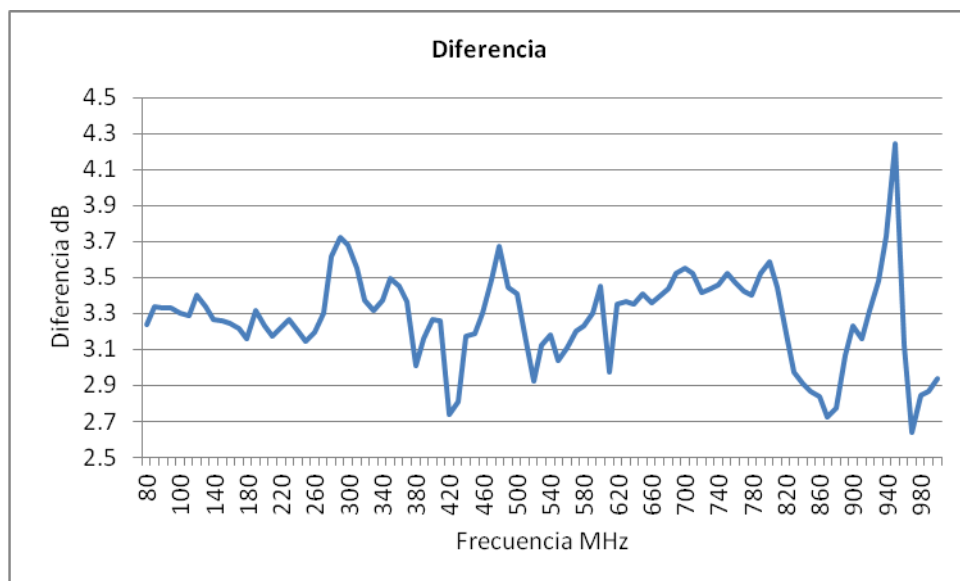
Gráfica 12. Componente Y de campo eléctrico en función de la potencia de entrada.



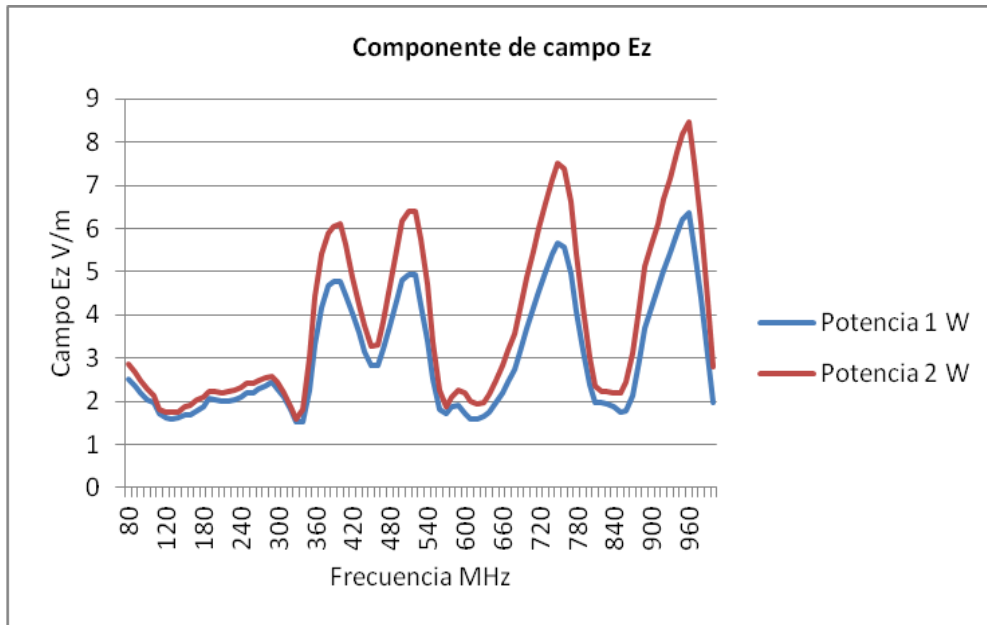
Gráfica 12.1. Diferencia entre las medidas de la gráfica 12.



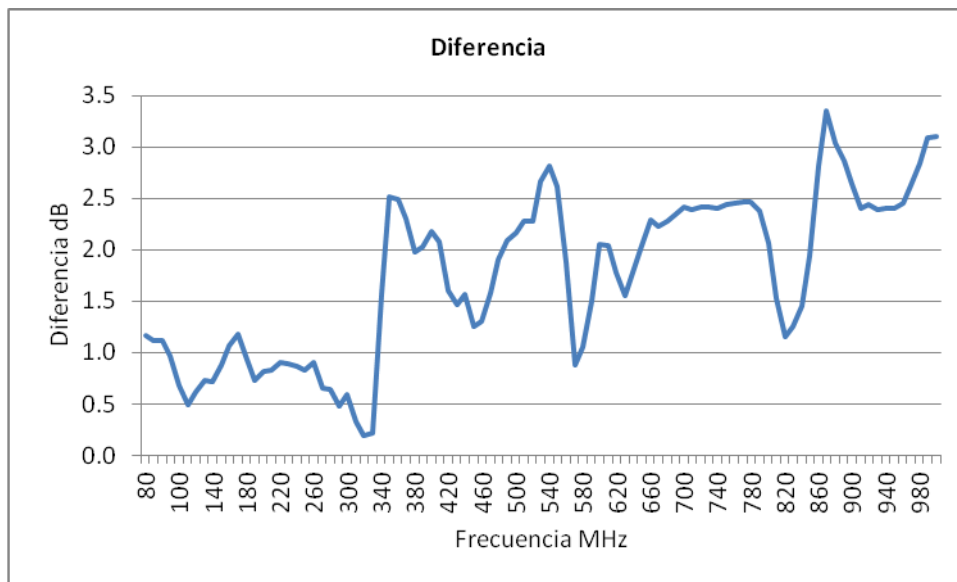
Gráfica 13. Componente X de campo eléctrico en función de la potencia de entrada.



Gráfica 13.1. Diferencia entre las medidas de la gráfica 13.



Gráfica 14. Componente Z de campo eléctrico en función de la potencia de entrada.



Gráfica 14.1 Diferencia entre las medidas de la gráfica 14.

Como se ilustra en las gráficas 12, 12.1, 13, 13.1, 14 y 14.1, al introducir 3 dB más de potencia en la GTEM, la componente “Y” de campo eléctrico aumenta en un valor aproximado de 3 dB, con una diferencia máxima de 3.2 dB y una mínima de 2.6 dB. La componente “X” de campo eléctrico presenta también una diferencia de aproximada de 3 dB, con una diferencia máxima de 4.2 dB y una mínima de 2.6 dB. Finalmente, la componente “Z” presenta una diferencia más irregular, con una diferencia máxima de 3.4 dB y 0.2 dB de mínima.

Por lo tanto, de forma aproximada las componentes de campo eléctrico “Y” y “X” creadas en la celda GTEM, son directamente proporcionales a la potencia introducida en la celda GTEM, y la componente “Z” de campo eléctrico creada dentro de la celda GTEM presenta un comportamiento distinto.

4.5-Propuesta de procedimiento para medida de emisiones

En el siguiente apartado, se describe el procedimiento propuesto para realizar la medida de emisiones espurias radiadas haciendo uso de la celda GTEM.

El parámetro utilizando será la PRA ya que en medidas de radio es el valor principal que se emplea para ensayos radiados.

En la figura 12 aparece la celda GTEM utilizada para este procedimiento.



Figura 12. Celda GTEM.

Para las medidas de emisiones se proponen dos configuraciones diferentes en función del rango de frecuencias que se vaya a medir, ya que cada tramo presenta unas características diferentes y en el segundo tramo se deben hacer diferentes configuraciones para poder realizar las medidas. Estos dos rangos han sido escogidos porque son los rangos de frecuencias donde se van a medir los ESE.

Los rangos de frecuencias a medir son, los siguientes, donde se dispone de todos los equipos necesarios para realizar las medidas en todo el rango de frecuencias indicado a continuación:

- Rango 1: desde 30 MHz hasta 1 GHz
- Rango 2: desde 1 GHz hasta 13 GHz

4.5.1-Rango 1: desde 30 MHz hasta 1 GHz

La figura 13, muestra la configuración propuesta para medir la PRA (Potencia radiada aparente) de un ESE (Equipo sometido a ensayo).

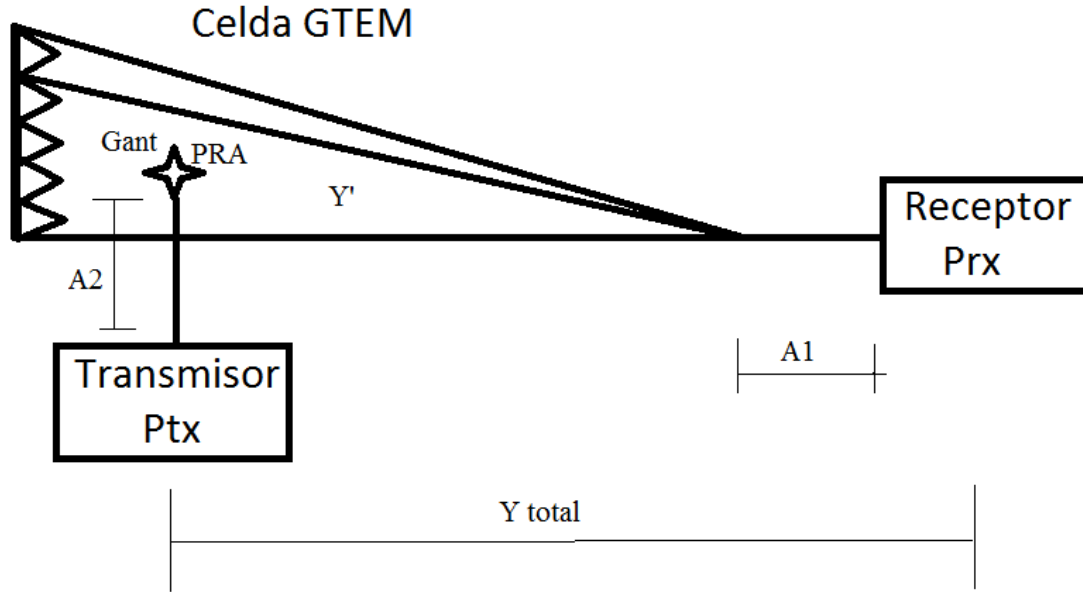


Figura 13. Configuración para la medida de PRA.

Donde:

P_{tx} = Potencia del transmisor.

P_{rx} = Potencia recibida en el receptor.

PRA = Potencia radiada aparente.

G_{ant} = Ganancia de la antena transmisora.

A_1 = Atenuación producida por los cables de conexión entre el puerto de la GTEM y el receptor.

A_2 = Atenuación producida por los cables entre el transmisor y la antena.

Y' = Atenuación introducida por la celda GTEM

Y_{total} = Atenuación total entre el transmisor y el receptor teniendo en cuenta todos los elementos intermedios.

A continuación, se analiza la configuración de la figura 13, teniendo en cuenta cada elemento de la configuración (generador, antena, celda GTEM, receptor y cables) y su función dentro de la configuración.

El procedimiento propuesto está basado en el método de sustitución, y cuando se realice la medida de un ESE, se sustituirá la antena de la figura 13 y los cables A₂, por el ESE, que será el elemento que radie.

La configuración de la figura 13 está compuesta por los siguientes elementos:

- Transmisor, que será el encargado de alimentar a la antena. Para ello, son necesarios cables, que proporcionen la conexión entre el transmisor y la antena. Para poder conectar el transmisor, que se encuentra fuera de la celda GTEM, con la antena, que se encuentra dentro, la celda tiene unos conectores que comunican la parte interior de la celda con la parte exterior.
- Antena transmisora, que es el elemento radiante, y posee una ganancia. La antena se coloca en la posición donde posteriormente se colocará el ESE, por lo tanto, debe colocarse en el volumen de ensayo, teniendo en cuenta la altura del *septum*. En este caso, la antena se coloca en el punto $Z = 2$ m, $Y = 21,5$ cm, $X = 0$ m (la medida en Y se hace desde el suelo hasta el punto medio de la antena).
- Celda GTEM, que es el entorno de medida, donde se colocará el ESE, o en este caso la antena transmisora, y donde se propaga la potencia producida por el elemento radiante. Este elemento se modela como una atenuación.
- Receptor, es el elemento encargado de recibir y medir la potencia en el extremo, o puerto, de la celda GTEM. El receptor mide la potencia recibida en forma de voltaje y está conectado a la celda GTEM a través de elementos de conexión como conectores y cables. El receptor mide los valores en dB μ V debido a que el software de medida que se utiliza, el EMC 32, trabaja teniendo en cuenta que el receptor da los valores en dB μ V, y de esta manera puede manejar las tablas con las que trabaja el software, ya que es un software pensado para medidas de campo dB μ V/m.
- Elementos de conexión, son los encargados de conectar los elementos de la configuración, como el generador con la antena, o el puerto de la GTEM con el receptor. Estos elementos de conexión introducen atenuaciones.

En las figuras 14, 15 y 16 se ilustra el generador, el receptor y la antena de sustitución, utilizados en la configuración de la figura 13. El generador trabaja en el rango de frecuencia de 9 kHz a 6 GHz, el receptor trabaja desde 20 MHz hasta 40 GHz y la antena trabaja en el rango de frecuencias de 30 MHz a 1 GHz.

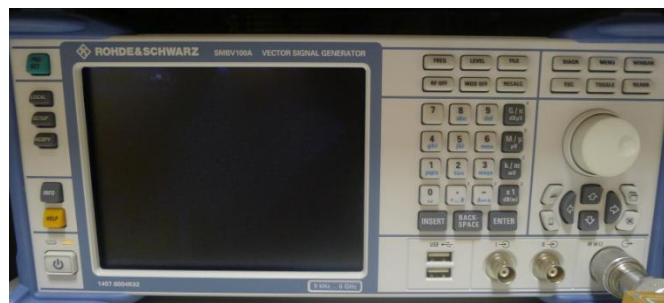


Figura 14. Generador de señal de 9 kHz a 6 GHz.



Figura 15. Receptor de señal de 20 MHz a 40 GHz.

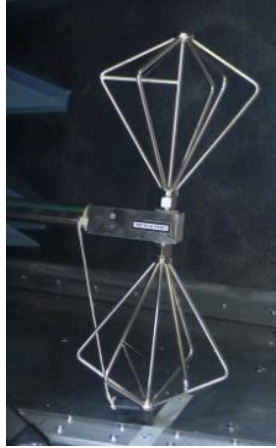


Figura 16. Antena bicónica de sustitución.

A continuación se indican las ecuaciones que modelan la configuración de la figura 13, y que proporcionan el cálculo de la PRA.

$$PRA = P_{rx} + A_I + Y' \quad (2)$$

La ecuación (2) calcula la PRA (todo en unidades logarítmicas), en función de la potencia recibida en el receptor. A partir de la potencia recibida si se suma la atenuación A_I y la atenuación Y' se obtiene la PRA.

La ecuación (3) modela la atenuación total, Y total, que hay entre el generador y el receptor. Como se observa en dicha ecuación (3), al tratarse de una atenuación total, los elementos atenuadores se colocan como sumandos y el elemento G_{ant} , que es un elemento de ganancia, se coloca restando.

$$Y_{total} = A_2 - G_{ant} + Y' + A_I \quad (3)$$

Si se reescribe la ecuación (3) se obtiene la ecuación (4) que nos da la atenuación introducida por la celda GTEM

$$Y' = Y_{total} - A_2 - A_I + G_{ant} \quad (4)$$

Introduciendo la ecuación (4) en la ecuación (2) se obtiene la ecuación (5), que ya nos da el valor de la PRA que buscábamos.

$$PRA = P_{rx} + Y_{total} - A_2 + G_{ant} \quad (5)$$

Donde las unidades de cada componente de la ecuación son:

$$[PRA] = \text{dBm}$$

$$[Y_{total}] = [A_2] = [G_{ant}] = \text{dB}$$

Para llevar a cabo las medidas, además de hacer uso de la configuración de la figura 13 y los elementos que contiene, se utiliza un software de medida llamado EMC 32, con el que se realizan las medidas de PRA.

En el software EMC 32 se deben introducir los parámetros de la ecuación (5) para poder realizar las medidas.

Primero se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El receptor de medida, recibe la potencia en el puerto de la GTEM en forma de voltaje, en $\text{dB}\mu\text{V}$, así que, siguiendo la ecuación (6) se pasa de unidades de $\text{dB}\mu\text{V}$ a unidades de dBm .

$$\text{Potencia (dBm)} = \text{potencia (dB}\mu\text{V)} - 107 \text{ dB} \quad (6)$$

- La PRA, se define como la potencia radiada tomando como referencia la antena dipolo $\lambda/2$, que tiene una ganancia de 2,15 dB_i , donde las unidades de dB_i muestran la ganancia tomando como referencia la ganancia de la antena isotrópica. En la ecuación (7) se muestra esta relación, donde PRA es la potencia radiada aparente y PIRE la potencia isotrópica radiada equivalente. Y en la ecuación (7.1) la relación entre la ganancia en dB_i y en dB_d .

$$PRA = PIRE - 2,15 \text{ dB} \quad (7)$$

$$\text{Ganancia (dB}_d\text{)} = \text{Ganancia (dB}_i\text{)} - 2,15 \quad (7.1)$$

Teniendo en cuenta estas dos consideraciones, si el receptor mide en unidades de $\text{dB}\mu\text{V}$, y por lo tanto la P_{tx} tiene unidades de $\text{dB}\mu\text{V}$ y la ganancia de la antena está en dB_i , es decir tomando como referencia la antena isotrópica, se reescribe la ecuación (5) y se obtiene la ecuación (8).

$$PRA (\text{dBm}) = P_{tx} (\text{dB}\mu\text{V}) + Y (\text{dB}) - A_2 (\text{dB}) \quad (8)$$

Donde el nuevo parámetro Y hace una función de elemento de transducción y convierte las unidades de $\text{dB}\mu\text{V}$ a dBm utilizando la ecuación (6) y la ganancia respecto a la antena isotrópica en dB_i a una ganancia respecto a la antena dipolo $\lambda/2$, en dB_d , usando la ecuación (7). De esta manera el parámetro Y, donde también se introduce el término de Y_{total} por comodidad, viene dado por la ecuación (9).

$$Y = G_{ant} - 107 + Y_{total} - 2,15 \quad (9)$$

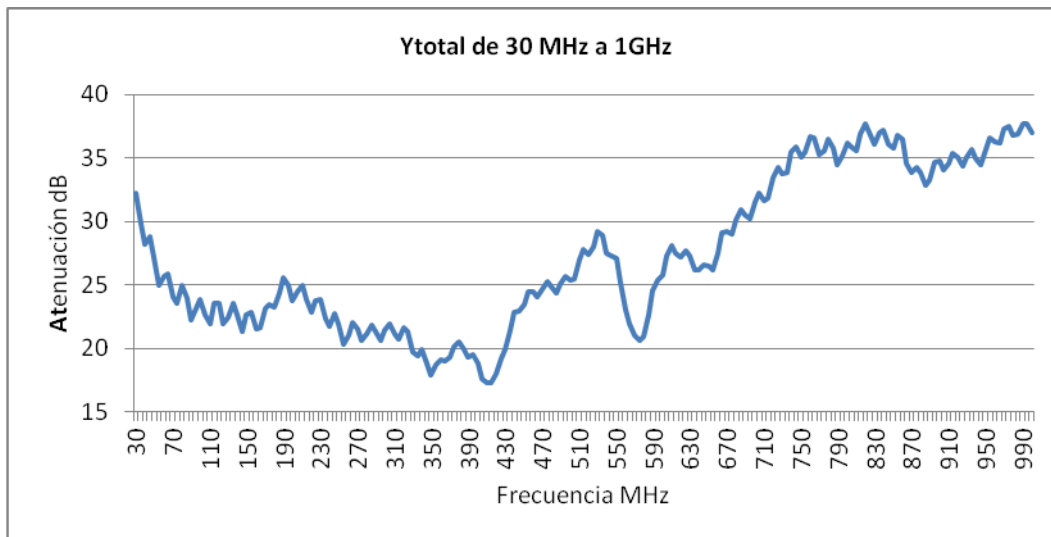
Después del análisis de este balance de enlace se realizan las medidas para obtener todos los parámetros que componen la ecuación final (8) para la medida de PRA.

Ya que el procedimiento se realiza en un rango de frecuencias y no solo en una frecuencia dada, cada elemento de la ecuación (8) se corresponde con una tabla de valores donde cada valor corresponde a una frecuencia.

Las tablas de medidas se obtienen de la siguiente manera:

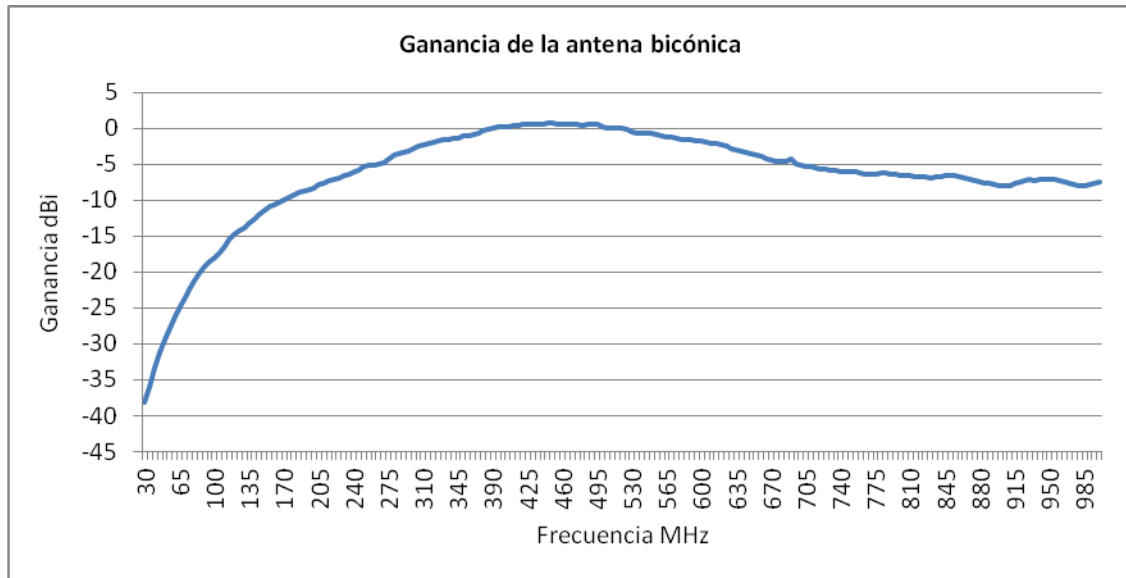
- Primero, se debe realizar una normalización para asegurar que las posteriores medidas solo tienen en cuenta los elementos que se quieren medir. Para este paso se realiza la normalización entre el transmisor y el receptor utilizando un cable entre ambos elementos.
- Después, se debe hacer la calibración de los cables que componen el elemento de conexión A_2 para tener en cuenta la atenuación que proporcionan los cables a las distintas frecuencias.
- También, utilizando el software EMC 32, se mide la atenuación Y_{total} , que mide la atenuación que existe entre el generador y el receptor, teniendo en cuenta los elementos intermedios como los cables, la celda GTEM y la antena. Para el cálculo de la variable Y_{total} se utiliza una potencia de transmisión de 0 dBm.
- Se obtienen los valores de las hojas de calibración de la antena, en este caso se usa una antena bicónica, y se elabora una tabla con la ganancia de la antena en cada frecuencia.

La gráfica 15 representa la atenuación Y_{total} que existe entre el transmisor y el receptor utilizando la configuración de la figura 13. Se observa que la atenuación va aumentando a medida que aumenta la frecuencia, y el rizado existente es relativamente pequeño.



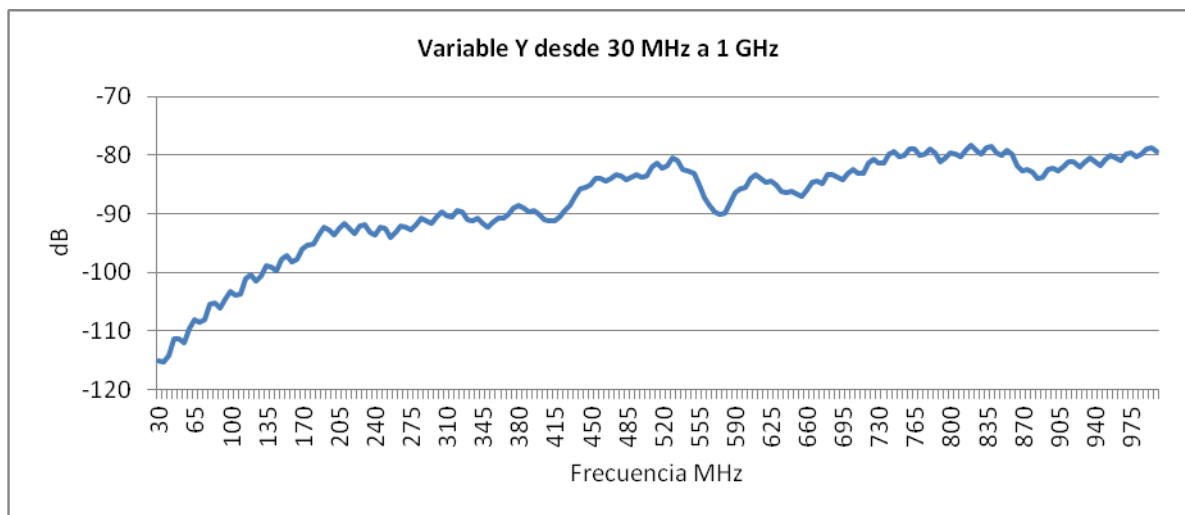
Gráfica 15. Atenuación Y_{total} .

La gráfica 16 muestra la ganancia de la antena bicónica en función de la frecuencia de trabajo, en un rango de frecuencias desde 30 MHz hasta 1 GHz.



Gráfica 16. Ganancia de la antena bicónica.

Una vez obtenidas las tablas, se realizan las operaciones que se muestran en la ecuación (9) y se obtiene la tabla del elemento Y. En la gráfica 17 se pueden ver los valores que toma la variable “Y” en función de la frecuencia.



Gráfica 17. Valores de la variable Y.

La tabla de valores Y junto con las correspondientes tablas de calibraciones de los elementos que componen el parámetro A_2 se introducen en el software EMC 32, que será el encargado de realizar la operación indicada en la ecuación (8).

En el EMC 32 se configuran los elementos que hacen la función de recepción, atenuación y transducción, para introducir en ellos las tablas correspondientes. En este caso la tabla Y se introduce en el elemento transductor, y la tabla A_2 en el elemento atenuador.

El EMC 32, realiza la operación de sumar las tablas que contiene, en nuestro caso la tabla de transducción “Y” y la tabla de atenuaciones A_2 . Como la atenuación del parámetro A_2 , siguiendo la ecuación (8), debe ser restada, los valores de A_2 se deben introducir multiplicados por un signo negativo.

El software va obteniendo los valores, P_{rx} , que recibe del receptor y les aplica la ecuación (8) para obtener y mostrar por pantalla la PRA obtenida en cada frecuencia.

Dado que el método propuesto para la medida es el de sustitución, para realizar la medida se debe sustituir la antena utilizada y los cables A_1 , por el elemento que queramos medir.

A continuación, con el objetivo de comprobar la validez del procedimiento propuesto se realizan una serie de medidas. Se proponen dos configuraciones de medida con antenas distintas para ver la similitud de los resultados de PRA obtenido.

4.5.1.1-Medida de PRA: Dipolos de referencia

En una primera verificación se van a utilizar 8 dipolos de referencia para realizar medidas puntuales. Estos 8 dipolos de referencia son antenas con una muy buena precisión y ajustadas a una frecuencia, cada dipolo posee un balun, que influye en la ganancia total de la antena.

Se puede ver uno de los dipolos en la figura 17.



Figura 17. Dipolo de 500 MHz

Las características de los dipolos son conocidas, por lo tanto, el valor de PRA de un dipolo se puede obtener fácilmente. Por esta razón, primero se obtendrá el valor de PRA esperado para cada dipolo en función de la frecuencia en la que trabaja cada uno, y posteriormente se utilizará el procedimiento propuesto en este proyecto para obtener la PRA y a continuación comparar ambos resultados.

Para obtener la PRA de un dipolo se utiliza la ecuación (10)

$$PRA (dBm) = P_{t2} (dBm) + G_{dipolo} (dB_d) \quad (10)$$

Donde:

P_{t2} = Potencia introducida directamente al dipolo.

G_{dipolo} = Ganancia del dipolo.

Para la medida de la PRA de un dipolo se utiliza la configuración de la figura 18. Donde la potencia de salida del transmisor, P_{t1} , es de 0 dBm y la potencia P_{t2} es la potencia de entrada al dipolo. La potencia P_{t2} se mide con un receptor en ese punto antes de conectar dicho punto a la entrada del dipolo (teniendo en cuenta que deben presentar la misma impedancia), de esta manera se conoce la potencia real que se introduce al dipolo y no hay que tener en cuenta el cable de conexión desde el generador hasta el dipolo y las atenuaciones que dicho cable introduce.

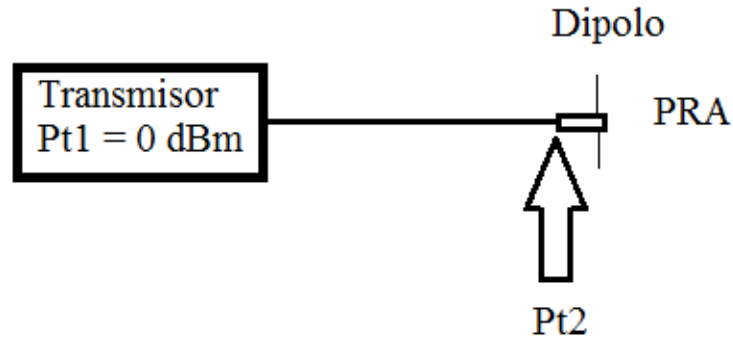


Figura 18. Configuración para la medida de la PRA de un dipolo.

Para obtener la ganancia del un dipolo se hace uso de sus hojas de datos donde aparecen los factores de antena, y a partir de los cuales con la ecuación (11) y la (12) se puede sacar la ganancia de cada dipolo en función de su frecuencia de trabajo.

El factor de antena utilizado tiene en cuenta tanto al dipolo como al balun, que introduce muchas pérdidas, utilizado para adaptar la antena, por lo tanto la ganancia total no es la de un dipolo ideal.

$$G_{dipolo} (dB_i) = 20 * \log (F_{MHz}) - AF (dB/m) - 29.79 \quad (11)$$

$$G_{dipolo} (dB_d) = G (dB_i) - 2,15 (dB) \quad (12)$$

Donde:

G_{dipolo} = Ganancia del dipolo.

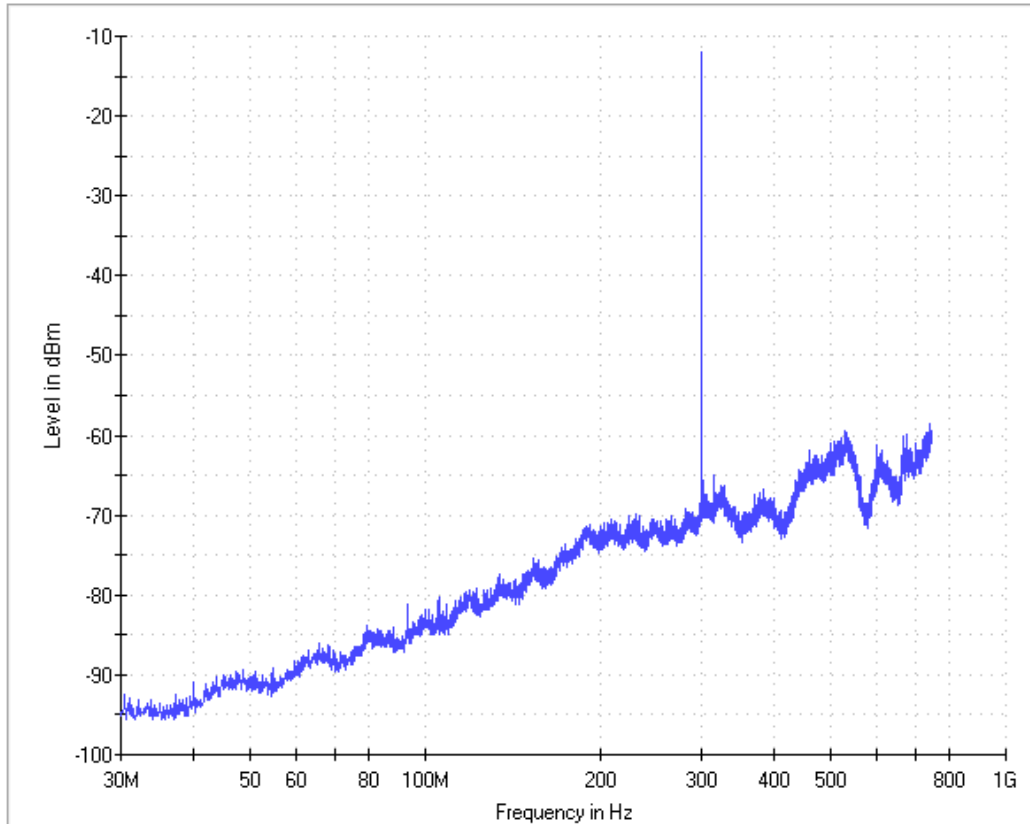
F_{MHz} = Frecuencia de trabajo del dipolo.

AF = factor de antena del dipolo.

La tabla 1 representa los valores de la PRA de los dipolos. La primera columna corresponde a la frecuencia de trabajo, la segunda a la potencia P_{t2} introducida al dipolo, la tercera a la ganancia del dipolo, la cuarta a la PRA medida utilizando la configuración de la figura 18 y la ecuación (10) y la última columna corresponde a la PRA del dipolo obtenida utilizando el procedimiento de medida propuesto en este proyecto. Para la obtención de los datos de la

última columna se ha utilizado la configuración de la figura 13, sustituyendo la antena por el dipolo, y el software EMC 32 que sigue la ecuación (8).

A modo de ejemplo de una de las medidas de la tabla 1, la gráfica 18 muestra la PRA medida usando la configuración de la figura 13 y el software EMC 32. Se observa que la potencia que se introduce a la antena, es la potencia del transmisor menos la atenuación producida por los cables, que en este caso es muy alta.

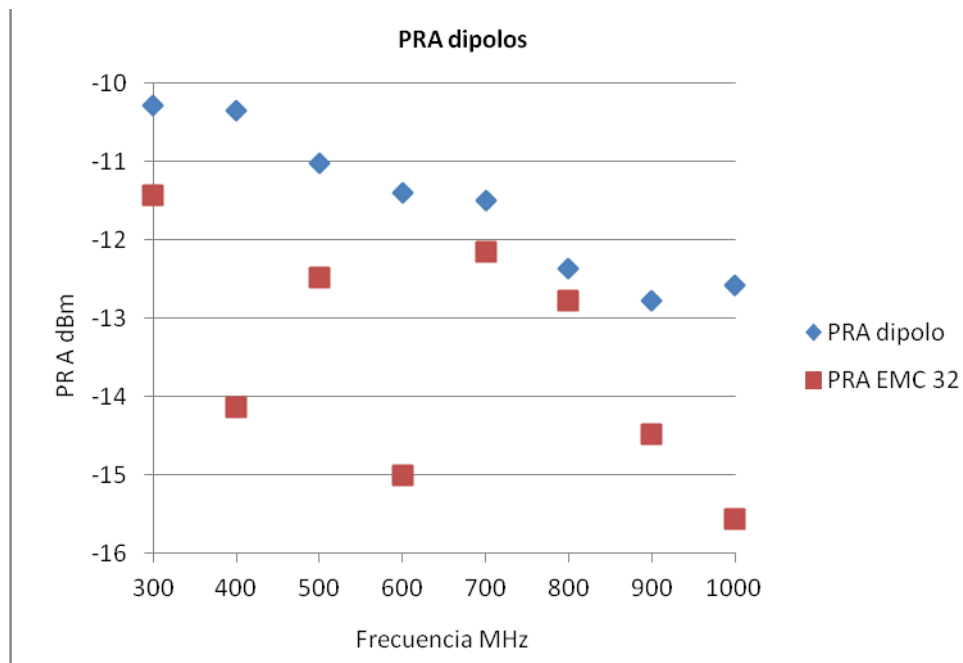


Gráfica 18. PRA de un dipolo a 300 MHz

Tabla 1. Medidas de PRA de dipolos

Potencia para alimentar al dipolo P_{t1} / P_{tx} en las configuraciones de las figuras 15 y 13. (0 dBm)				
Frecuencia MHz	P_{t2} dBm	G antena dipolo dB _d	PRA del dipolo con (10) dBm	PRA usando la GTEM y EMC32 dBm
300	-2,8	-7,488	-10,288	-11,428
400	-3,1	-7,249	-10,349	-14,136
500	-3,7	-7,32	-11,02	-12,48
600	-4	-7,397	-11,397	-15
700	-4	-7,488	-11,488	-12,155
800	-4,8	-7,568	-12,368	-12,764
900	-5,1	-7,665	-12,765	-14,482
1000	-4,8	-7,77	-12,57	-15,554

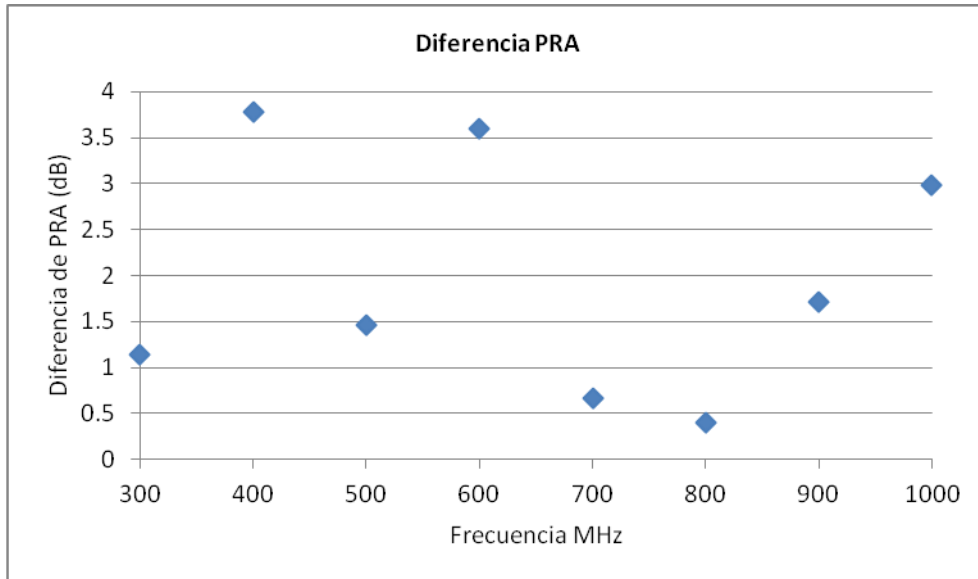
A continuación, en la gráfica 19 se representa para su comparación los valores obtenidos en las dos últimas columnas de la tabla 1.



Gráfica 19. Comparación de PRA de un dipolo

Como se puede observar en la gráfica 19 ambas medidas de la PRA de un dipolo presentan un comportamiento similar por lo que, a primera vista se puede considerar como apto el procedimiento diseñado.

En la gráfica 20 se puede ver el error cometido entre ambas medidas, ya que como se ve en la gráfica 19, los valores son similares pero no iguales. Este error, en el peor de los casos, toma un valor de 3.7 dB y, en el mejor de los casos, el error es de tan solo 0.4 dB.



Gráfica 20. Error cometido en la medida de PRA de los dipolos.

Debido al buen comportamiento de los dipolos, este error se puede considerar como el error entre la PRA real que radie un ESE y la PRA de un ESE medida con la GTEM.

4.5.1.2-Medida de PRA: Antena bicónica

En este caso se realizará un procedimiento similar al de la medida de PRA utilizando dipolos, pero en este caso se utiliza una antena bicónica, que es una antena de banda ancha como las utilizadas en la cámara anecoica, que trabaja en un rango de frecuencias desde 30 MHz hasta 1 GHz, para poder medir en un rango de frecuencias, y obtener más valores de medida, ya que con los dipolos solo es posible hacer las medidas puntuales a la frecuencia de trabajo de cada dipolo.

En la figura 19 se puede ver la antena bicónica utilizada.



Figura 19. Antena bicónica.

Para las siguientes medidas, primero se calcula la PRA esperada según la ecuación (13) y la configuración de la figura 20.

$$PRA \text{ (dBm)} = P_{t2} \text{ (dBm)} + G_{ant} \text{ (dBd)} \quad (13)$$

Donde:

P_{t2} = potencia que se introduce directamente a la antena.

G_{ant} = ganancia de la antena bicónica en dBd.

La potencia P_{t2} es la potencia P_{t1} que se configura en el transmisor menos la atenuación debida a los cables entre el transmisor y la antena, por lo tanto si se mide la potencia P_{t2} justo en el extremo del cable que se conecta a la antena con un receptor se obtiene la potencia real que se introduce a la antena.

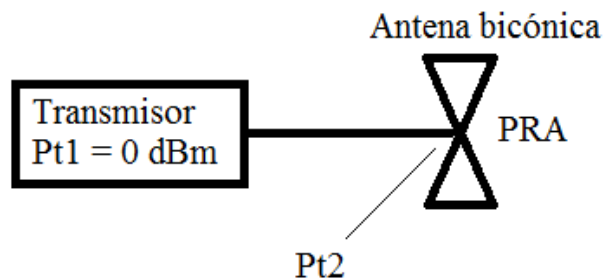
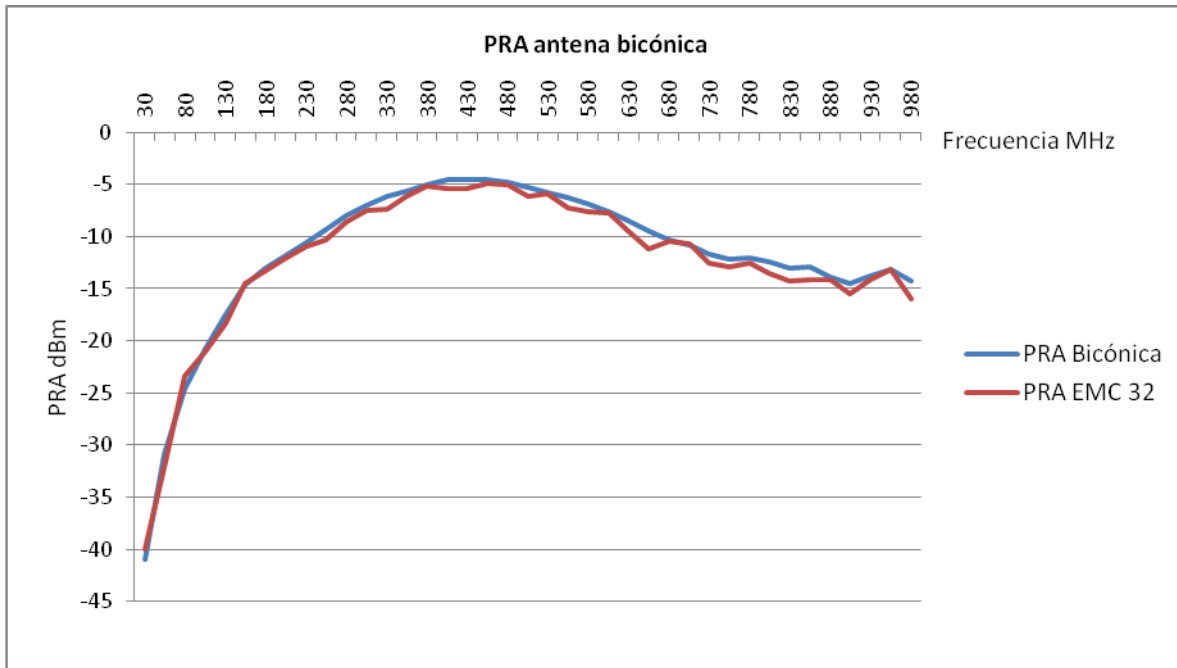


Figura 20. Configuración de medida de PRA de antena bicónica.

A continuación, para realizar la medida de PRA utilizando el procedimiento propuesto en este proyecto, se realiza la configuración de la figura 13 colocando la antena bicónica en la posición de la antena de sustitución. Se alimenta la antena desde el transmisor con una potencia de 0 dBm para realizar la comparación con la medida manual de la configuración de la figura 20 donde la potencia del transmisor es de 0 dBm y se utilizan los mismos cables para asegurar que la potencia que llega a la antena es la misma en ambos casos.

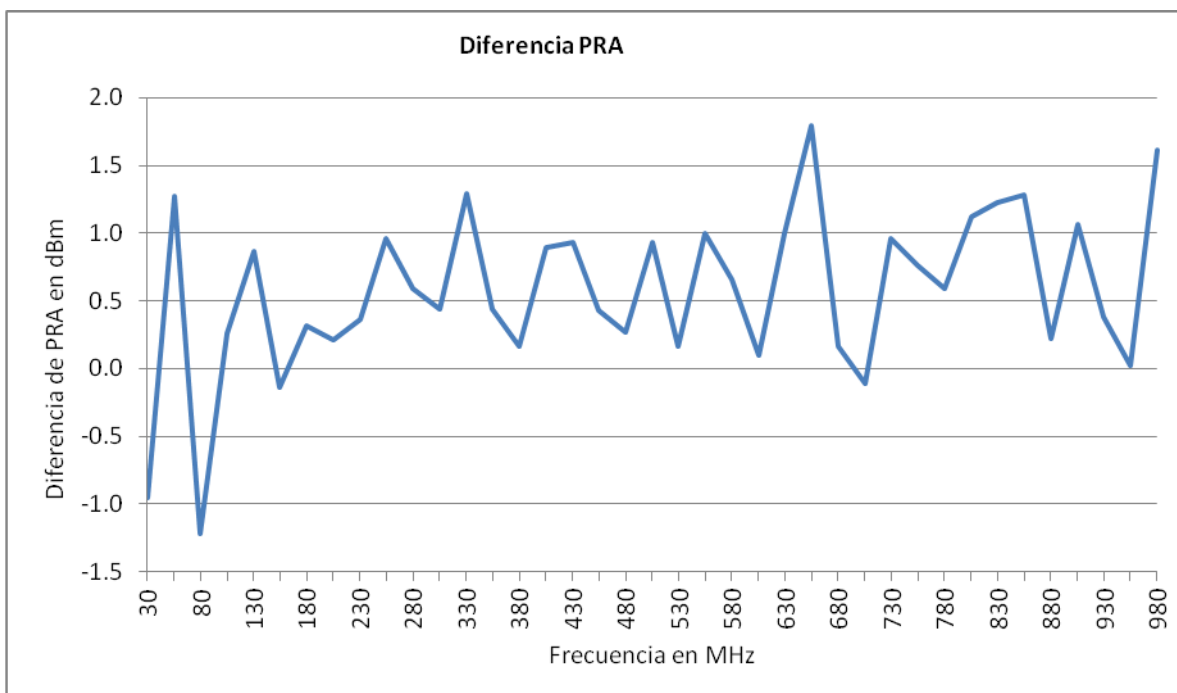
En la gráfica 21 se representan los valores de PRA obtenidos de las dos formas, la manual (PRA Bicónica en la gráfica 21) y mediante el procedimiento usando la celda GTEM (PRA EMC 32) para comparar ambas medidas.



Gráfica 21. Medidas de PRA de la antena bicónica.

La gráfica 21 muestra las medidas de PRA de la antena bicónica calculadas de las dos formas y en ambos casos las medidas son muy similares en todo el rango de frecuencia. Por lo tanto, el procedimiento usando la celda GTEM y el software EMC 32 proporciona medidas de PRA similares a las medidas de PRA obtenidas de forma manual, de este modo se puede considerar como aceptable el procedimiento de medida utilizando la celda GTEM para la medida de PRA.

Existe una pequeña diferencia en las medidas de la gráfica 21 obtenidas con ambos métodos y en la gráfica 22 se muestra esta diferencia.



Gráfica 22. Diferencia entre las medidas de PRA de la gráfica 20.

Como se ve en la gráfica 22 la máxima diferencia entre la PRA calculada de forma manual y la PRA calculada usando la celda GTEM varía entre -1.22 dB y 1.79 dB, estando en la mayoría de los casos en el intervalo entre 0 y 1 dB. Por lo que el error entre ambas medidas es relativamente pequeño.

4.5.1.3-Medida 1 de PRA: ESE en GTEM y en cámara anecoica

En este apartado se compara la medida de PRA de un ESE utilizando la celda GTEM y la cámara anecoica con el objetivo de ver las similitudes y diferencias que presentan ambas medidas realizadas al mismo ESE en dos entornos de medida diferentes.

La frecuencia de trabajo del ESE, que en este caso es un telemando, es 29.91 MHz.

En la figura 21 aparece la cámara anecoica utilizada. Y en la figura 22 el ESE utilizado.

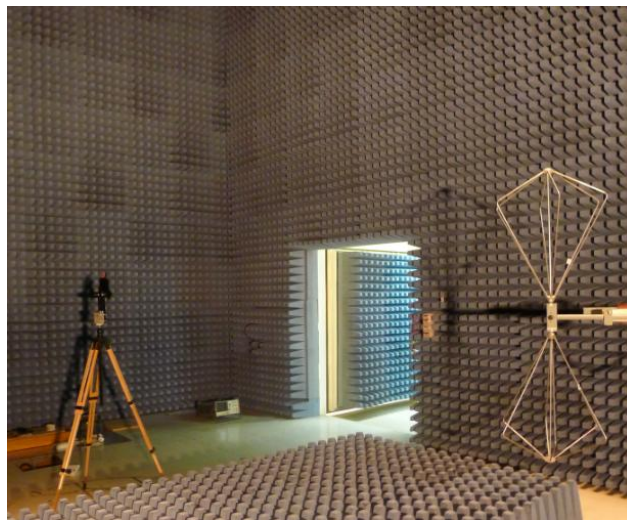


Figura 21. Cámara anecoica utilizada.



Figura 22. ESE utilizado.

En la primera medida se utiliza la celda GTEM utilizando el procedimiento propuesto en este proyecto y siguiendo la configuración de la figura 13, donde se sustituye la antena y los cables que componen la variable A_2 por el ESE que se introduce en la GTEM en la posición de la antena de sustitución quedando la configuración como la mostrada en la figura 23.

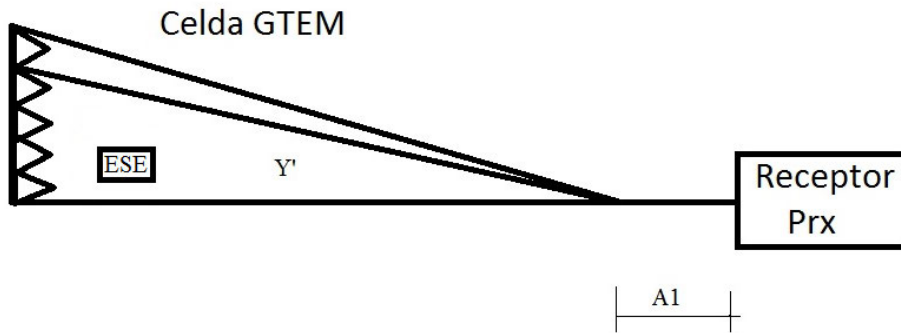


Figura 23. Configuración de medida PRA del ESE

Para realizar las medidas se coloca el ESE en modo transmisor, por lo tanto se debe encender. Se debe colocar el ESE, aproximadamente, en la posición donde estaba la antena de sustitución ($Z = 2$ m, $Y = 21,5$ cm, $X = 0$ m).

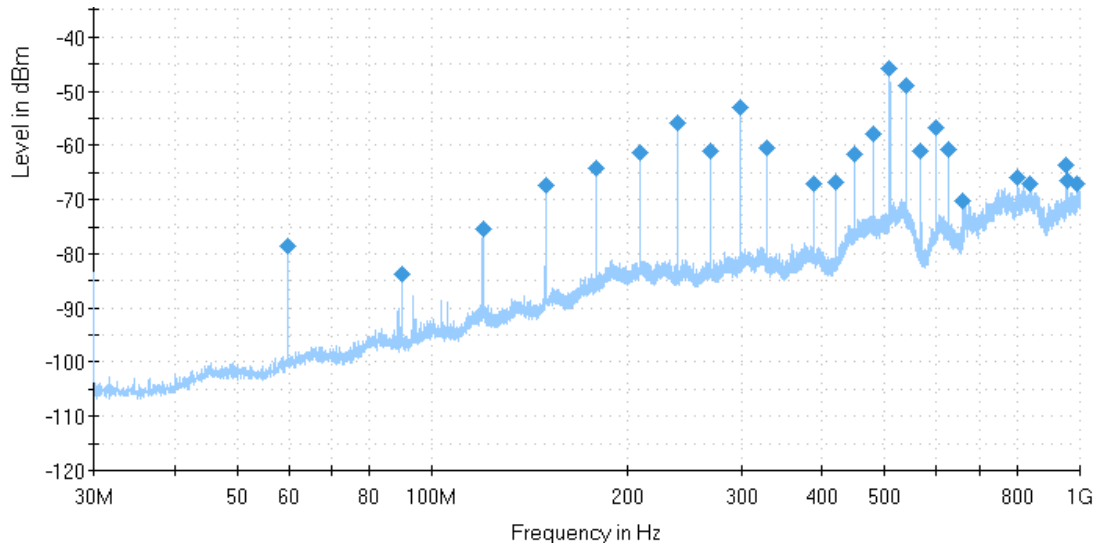
Se realizan 4 medidas de PRA del ESE colocando el ESE en diferentes posiciones con el objetivo de buscar la posición en la que más radie el ESE. Colocando el punto medio del ESE en la posición de medida.

La primera posición, o posición 1, se muestra en la figura 24, donde se coloca el ESE en el punto $Z = 2$ m, $Y = 20$ cm, $X = 0$ m. Para colocar el ESE en dicha posición se utiliza material de poliespán como el que se ve en dicha figura.



Figura 24. Posición 1 del ESE.

La gráfica 23 muestra la medida de las emisiones espurias radiadas del ESE. Mostrando la PRA medida de los armónicos del ESE en la posición 1.



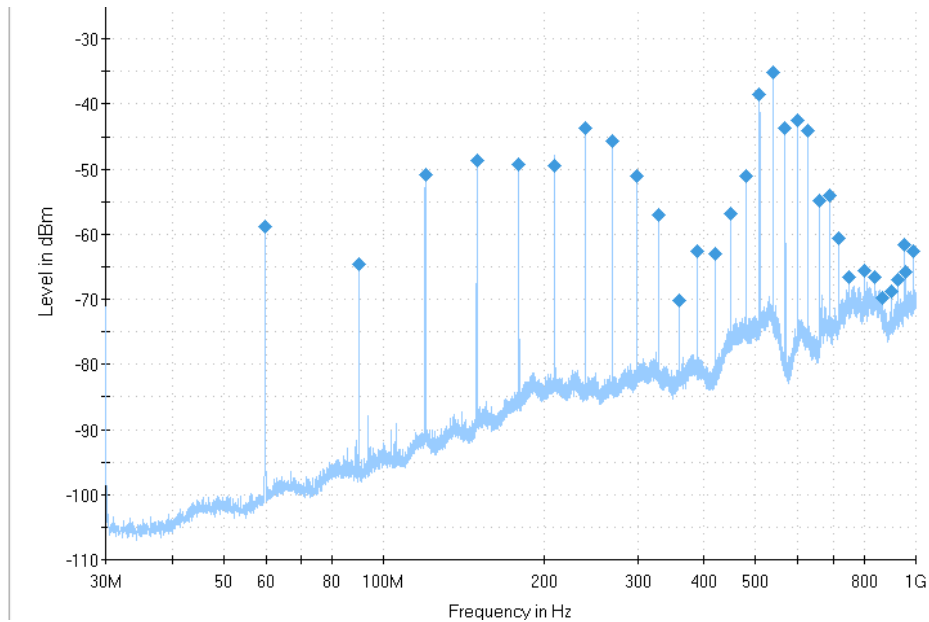
Gráfica 23. Medida con la GTEM de la PRA del ESE en la posición 1.

La segunda posición, o posición 2, del ESE se muestra en la figura 25, donde se coloca el ESE en la posición $Z=2\text{ m}$, $Y=20\text{ cm}$, $X=0\text{ m}$.



Figura 25. Posición 2 del ESE.

La gráfica 24 muestra la medida de las emisiones espurias radiadas del ESE. Mostrando la PRA medida de los armónicos del ESE en la posición 2.



Gráfica 24. Medida con la GTEM de la PRA del ESE en la posición 2.

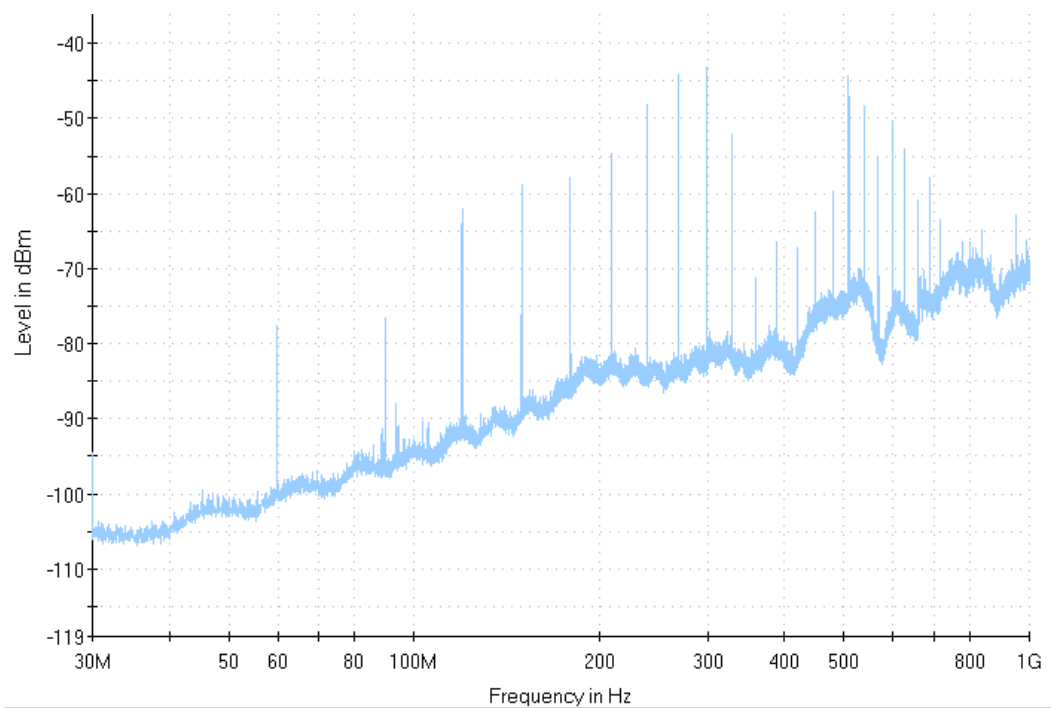
La posición 3 y 4 se muestran en la figura 26 y 27 respectivamente. Y la gráficas 25 y 26 muestran las medidas de emisiones espurias radidas del ESE en ambas posiciones.



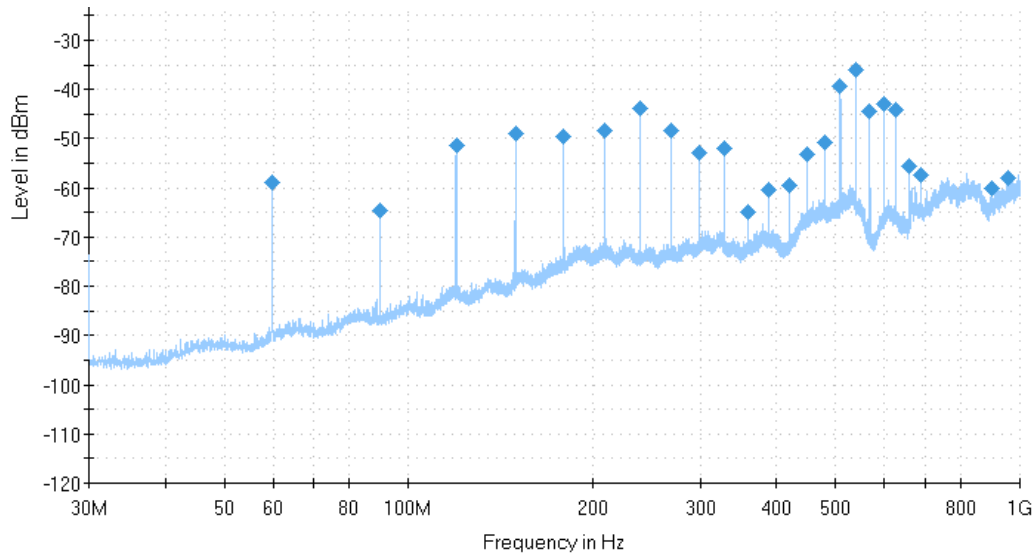
Figura 26. Posición 3 del ESE.



Figura 27. Posición 4 del ESE.

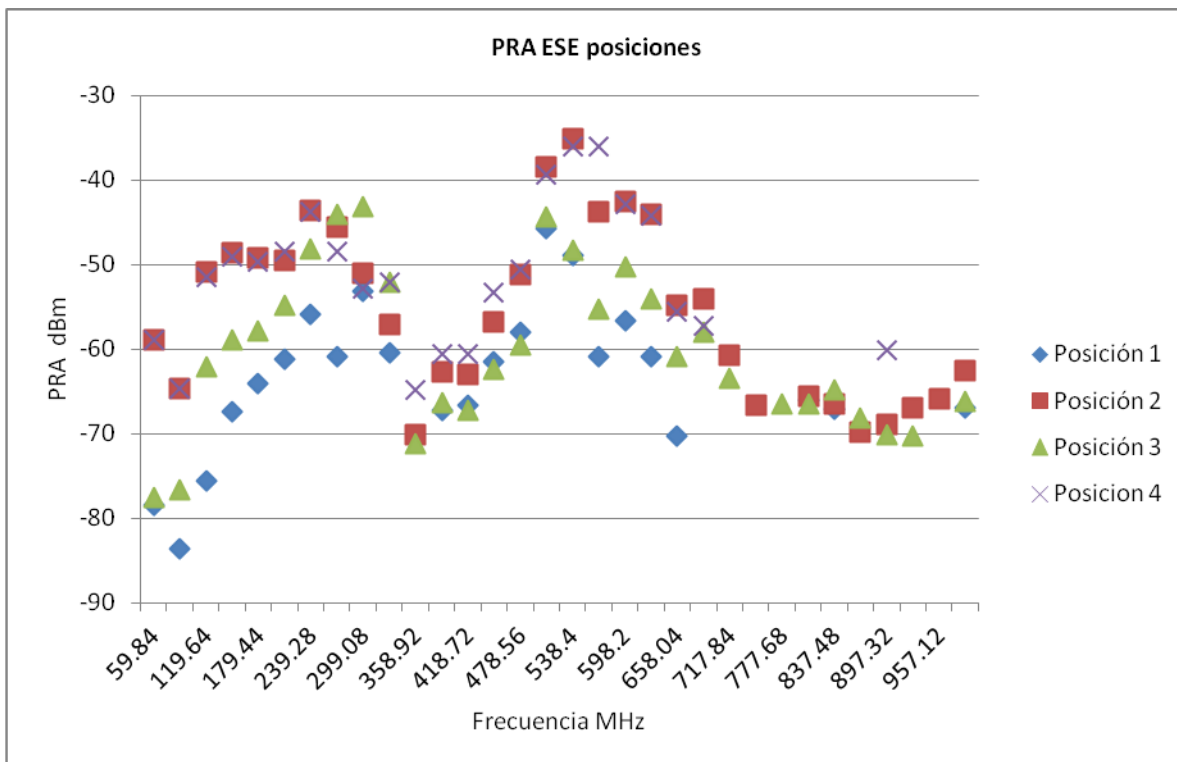


Gráfica 25. Medida con la GTEM de la PRA del ESE en la posición 3.



Gráfica 26. Medida con la GTEM de la PRA del ESE en la posición 4.

Con el objetivo de comparar los valores obtenidos en las cuatro posiciones del ESE la gráfica 27 muestra los resultados de las emisiones espurias radiadas en las cuatro posiciones mencionadas anteriormente.



Gráfica 27. Valores de PRA del ESE medidos con la GTEM.

La gráfica 27 muestra como la posición en la que más radia el ESE es en la posición 2. Y que los valores obtenidos de la posición 2 y 4 son similares, aunque la posición 4 presenta algún armónico menos.

Para comparar estos resultados con el método tradicional, se realiza la medida de emisiones espurias radiadas, a partir de la Potencia Radiada Aparente o PRA, utilizando una cámara anecoica. Para esta medida se utilizan las configuraciones de las figuras 28 y 29.

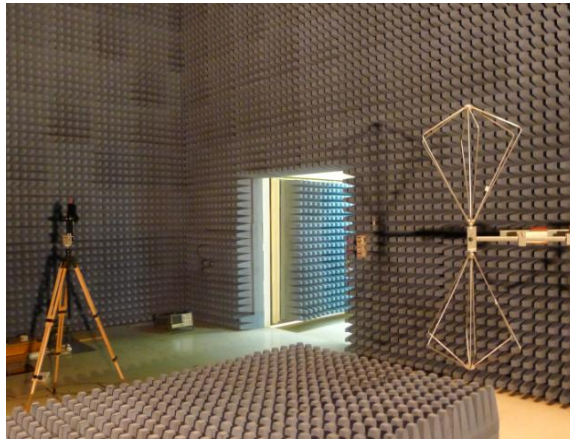


Figura 28. Cámara anecoica con antena bicónica y ESE.

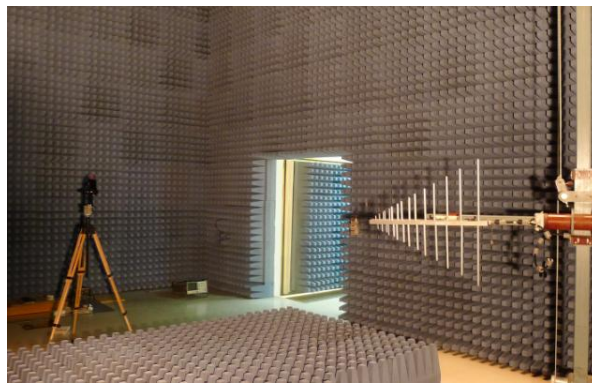


Figura 29. Cámara anecoica con antena logperiódica y ESE.

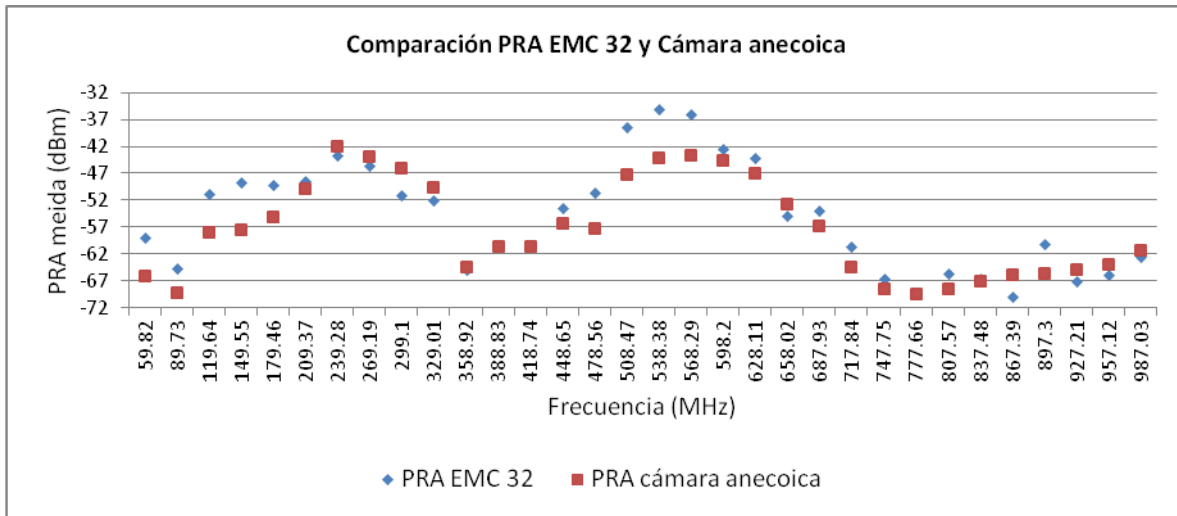
Para este tipo de medida, en general, se utilizan polarizaciones verticales y horizontales, pero para este caso debido a que en la GTEM se utiliza solo polarización vertical, en la cámara anecoica se realiza la medida de PRA con polarización vertical, para comparar ambos resultados. Además en este caso se realiza la medida con polarización vertical porque se conoce que el ESE tiene sus máximos en esa polarización.

Para la medida de la PRA del ESE en el rango de frecuencias que va desde 30 MHz hasta 1 GHz se utilizan dos antenas, la antena bicónica para cubrir las frecuencias desde 30 MHz hasta 200 MHz y la antena logperiódica para cubrir el rango de frecuencias desde 200 MHz hasta 1 GHz. Se trata de una misma medida, en la que se utiliza la antena adecuada para rango de frecuencias.

Para realizar la medida en la cámara anecoica se utiliza la configuración de las figuras 28 y 29, donde se coloca el ESE encima de una mesa giratoria, que gira 360° para obtener la medida a lo largo de los 360° de giro y buscar la posición de máxima radiación del ESE, para así comparar los máximos de potencia en la cámara anecoica y en la celda GTEM.

Siguiendo el procedimiento ya existente en la DGTTI, en la cámara anecoica se coloca el ESE a 1.5 m del suelo y la distancia entre el ESE y la antena es de 3 m.

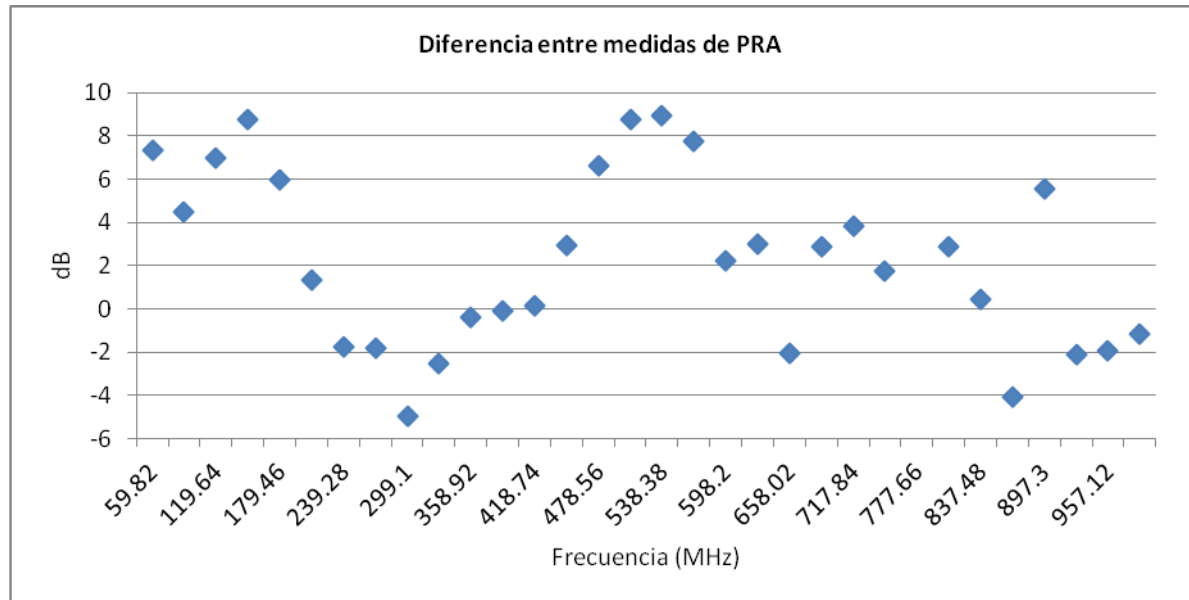
La gráfica 28 muestra la comparación entre las medidas de PRA del ESE realizadas en las cámara anecoica y en la celda GTEM, en ambos casos se muestran los valores máximos de PRA medidos a cada frecuencia en la posición donde más radia el ESE.



Gráfica 28. PRA medida en la celda GTEM y en la cámara anecoica.

La gráfica 28 muestra la similitud que hay entre la medidas realizada en los dos entornos de medida. Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenido en la gráfica 28 se puede concluir que la celda GTEM junto con el procedimiento de medida propuesto en este proyecto es un entorno de medida donde se obtienen medidas de emisiones espurias radidas similares a las obtenidas en una cámara anecoica.

Con el objetivo de ver la diferencia existente entre las medidas obtenidas en los dos entornos de medida, la gráfica 29 muestra la diferencia que hay entre la medida realizada en la cámara anecoica y en la celda GTEM en cada frecuencia donde se han medido los armónicos del ESE.



Gráfica 29. Diferencia entre medidas de PRA en los dos entornos de medida.

La gráfica 29 muestra como, en la mayoría de los casos, el error cometido entre ambas medidas se encuentra entre 3 dB y -3 dB, aunque para algunas frecuencias este error es mayor.

4.5.1.4-Medida 2 de PRA: ESE en GTEM y en cámara anecoica

En este siguiente apartado se realiza otra comparación entre las medidas de PRA obtenidas en una cámara anecoica y la celda GTEM.

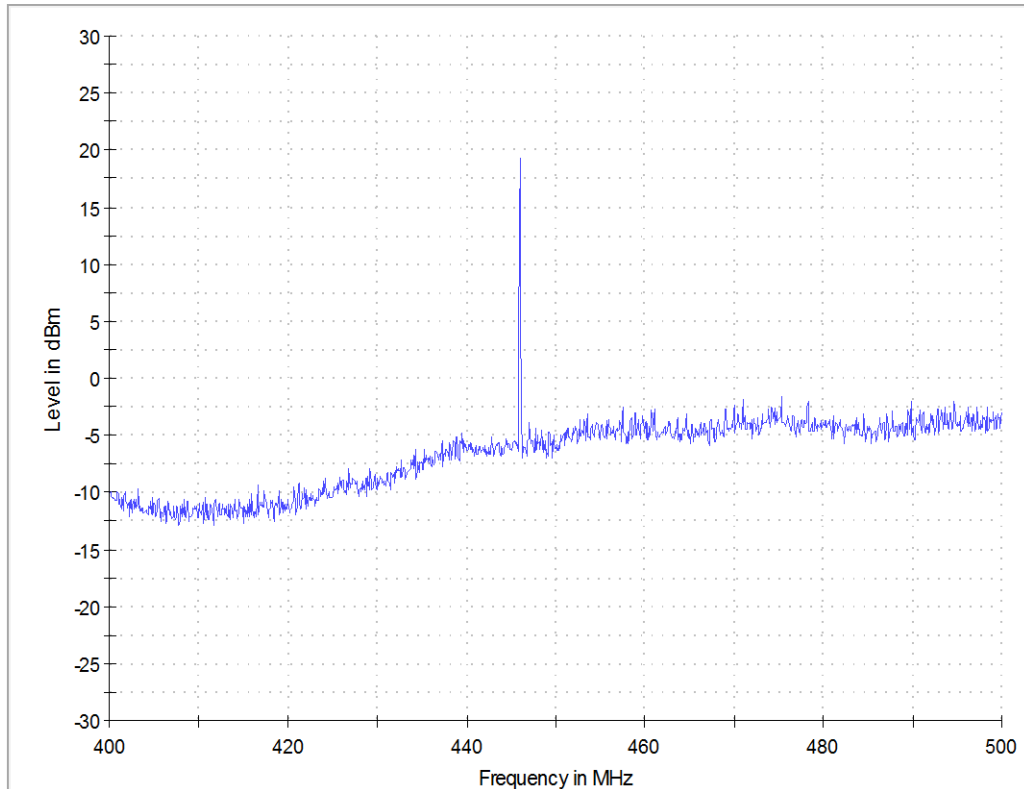
Como en el caso anterior se procede de igual manera, donde la figura 30 muestra el ESE medido para este caso, que se trata de un PMR que trabaja en una frecuencia de 446 MHz.



Figura 30. PMR 446 colocado sobre un soporte.

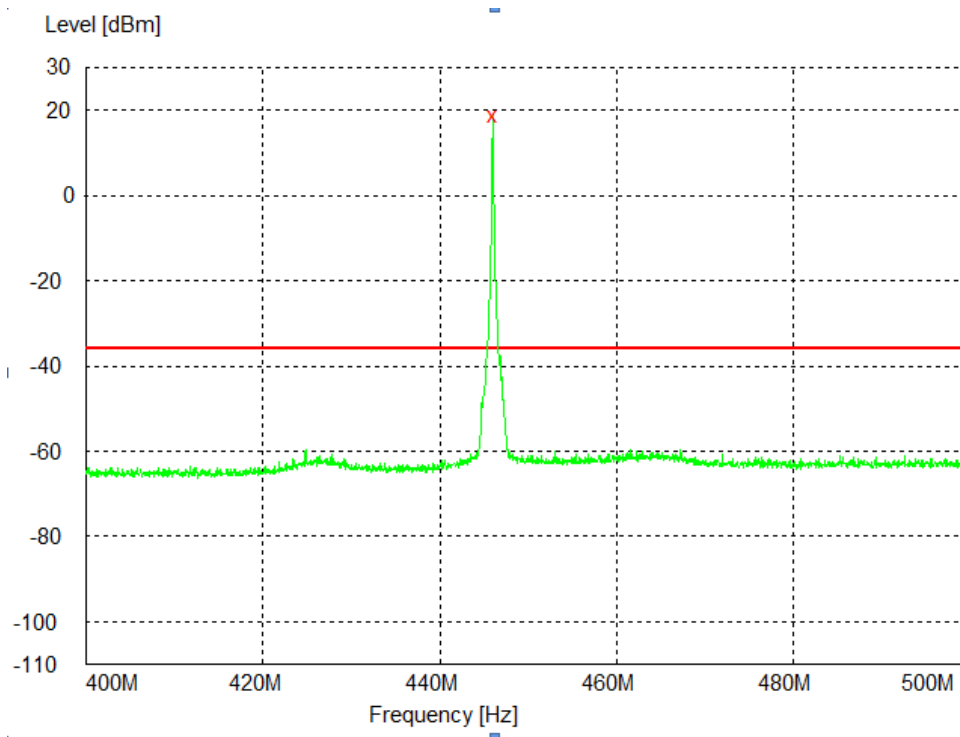
Para este ESE, se mide la PRA en la propia frecuencia de trabajo, ya que este ESE no presenta componentes espurias. Así que la comparación se hace con la potencia que radia el ESE en la frecuencia de trabajo del PMR medida en la cámara anecoica y en la celda GTEM.

La gráfica 30 muestra la medida de PRA en la celda GTEM, donde en la frecuencia de 446,00 MHz la potencia radiada aparente toma un valor de 19.341 dBm.



Gráfica 30. Medida de PRA del PMR en la celda GTEM.

Por otra parte, la gráfica 31 muestra la medida realizada al mismo ESE en una cámara anecoica donde a la frecuencia de 446.04 MHz la PRA toma un valor de 19.00 dBm.



Gráfica 31. Medida de PRA del PMR en una cámara anecoica.

A la vista de los resultados obtenidos en la gráficas 30 y 31, el valor de PRA medido en la cámara anecoica y en la celda GTEM son prácticamente iguales, por lo tanto, el procedimiento de medida de emisiones espurias radiadas utilizando la celda GTEM desde 30 MHz hasta 1 GHz parece que es un método aceptable para la medida de este parámetro y los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en una cámara anecoica.

Por otra parte la diferencia en los niveles de ruido es debida simplemente a la propia configuración de atenuador interno del receptor de medida, siendo lo importante aquí el valor de medida de PRA medido.

4.5.2-Rango 2: desde 1 GHz hasta 13 GHz. Propuesta inicial.

En este rango de frecuencias, el procedimiento para medir las emisiones espurias radiadas es similar al usado para frecuencias desde 30 MHz hasta 1 GHz con algunas diferencias, ya que en este caso el rango de 1 GHz hasta 13 GHz presenta diferentes características que se van a ir mostrando a lo largo de siguiente apartado, donde se indican las etapas que se han seguido hasta alcanzar las configuraciones de medidas finales para este rango de frecuencias.

En una primera aproximación, para la medida de emisiones espurias radiadas de un ESE desde 1 GHz hasta 13 GHz midiendo la PRA se propone la configuración de la figura 31.

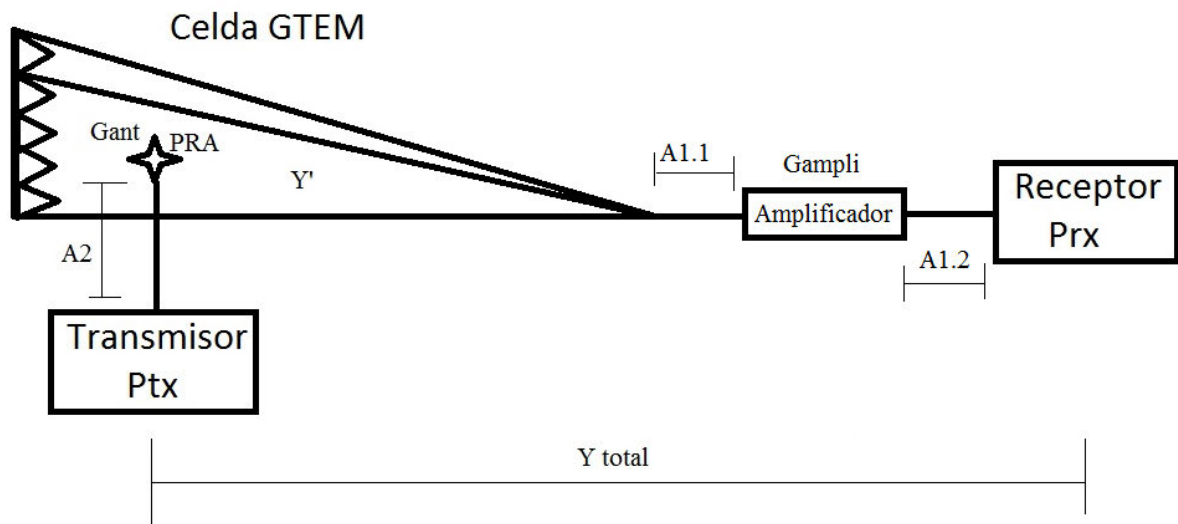


Figura 31. Configuración para la medida de PRA.

Donde:

P_{tx} = Potencia del transmisor.

P_{rx} = Potencia recibida en el receptor.

PRA = Potencia radiada aparente.

G_{ant} = Ganancia de la antena transmisora.

G_{ampli} = Ganancia del amplificador.

$A_{1.1}$ = Atenuación producida por los cables de conexión entre el puerto de la GTEM y amplificador.

$A_{1.2}$ = Atenuación producida por los cables de conexión entre la salida del amplificador y la entrada del receptor.

Y' = Atenuación introducida por la celda GTEM

Y_{total} = Atenuación total entre el transmisor y el receptor teniendo en cuenta todos los elementos intermedios.

El procedimiento propuesto está basado en el método de sustitución, y cuando se realice la medida de un ESE, se sustituirá la antena de la figura 31 y los cables A_2 , por el ESE, que será el elemento que radie.

La configuración de la figura 31 es similar a la de la figura 13, sin embargo, en la configuración de la figura 31 se ha introducido un amplificador con respecto a la configuración usada en el rango de 30 MHz a 1 GHz debido a que a frecuencias más altas como son las frecuencias desde 1 GHz hasta 13 GHz la atenuación que sufre la señal desde el transmisor hasta el receptor es muy grande, y en ausencia de amplificador añadido, la señal no llega con la suficiente potencia para poder ser medida por el receptor. El amplificador se añade como un elemento intermedio entre la celda GTEM y el receptor:

- Amplificador: Es el elemento encargado de amplificar la señal que sale desde el puerto de la celda GTEM para, a continuación, entregar la señal al receptor. En este caso el amplificador tiene una ganancia aproximada de 40 dB en todo el margen de frecuencias y lógicamente tiene una sensibilidad muy superior a nuestro equipo de medida, razón por la que podremos medir niveles de señal mucho más bajos.

En este rango de frecuencias no se utiliza el receptor de medida utilizado en frecuencias por debajo de 1 GHz debido a que a frecuencias elevadas la sensibilidad del receptor es peor.

En la configuración de la figura 31 se añaden elementos de conexión como los cables necesarios para conectar el amplificador como un elemento en serie.

Para el rango de frecuencias desde 1 GHz a 13 GHz se utilizan diferentes elementos de medida que permiten alcanzar estas frecuencias.

En las figuras 32, 33, 34, 35 y 36 se ilustra el transmisor, el receptor (se utiliza un medidor de potencia junto con su monitor para obtener la medida), el amplificador y la antena de sustitución, utilizados para la configuración de la figura 31. El generador trabaja en el rango de frecuencias desde 10 MHz hasta 20 GHz, el medidor de potencia desde 15 MHz hasta 18 GHz, el amplificador desde 1 GHz hasta 18 GHz y la antena trabaja en el rango de 1 GHz a 18 GHz, aunque como se ve más adelante esta antena no trabaja bien en el rango desde 1 GHz hasta aproximadamente 4 GHz). Una posible solución para este rango de frecuencias desde 1 GHz hasta 4 GHz sería utilizar otra antena que trabajase bien en este rango de frecuencias.

4.- Descripción de la solución propuesta

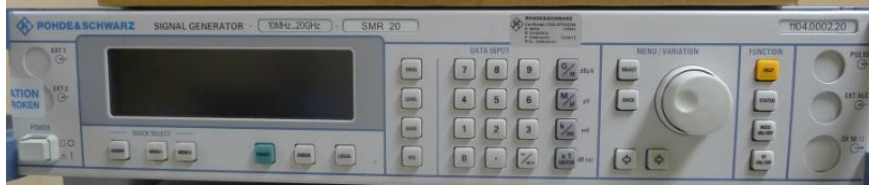


Figura 32. Transmisor utilizado en la configuración de la figura 31.



Figura 33. Medidor de potencia utilizado en la configuración de la figura 31.



Figura 34. Monitor del medidor de potencia.



Figura 35. Amplificador utilizado en la configuración de la figura 31.



Figura 36. Antena bicónica utilizada en la configuración de la figura 31.

A continuación, se presentan las ecuaciones que modelan la configuración de la figura 31, y que proporcionan el cálculo de la PRA.

$$PRA = P_{rx} + A_{1,2} - G_{ampli} + A_{1,1} + Y' \quad (14)$$

La ecuación (14) calcula la PRA en función de la potencia recibida en el receptor y los elementos de atenuación y amplificación entre el receptor y la antena. A partir de la potencia recibida si se suma la atenuación $A_{1,1}$, $A_{1,2}$ y la atenuación Y' y se resta la ganancia G_{ampli} , se obtiene la PRA.

La ecuación (15) modela la atenuación total, Y_{total} , que hay entre el generador y el receptor. Como se observa en la ecuación (15) al tratarse de una atenuación total, los elementos atenuadores se colocan como sumandos y los elementos G_{ant} y G_{ampli} , que son elementos de ganancia, se colocan restando.

$$Y_{total} = A_2 - G_{ant} + Y' + A_{1,1} - G_{ampli} + A_{1,2} \quad (15)$$

Si se reescribe la ecuación (15) se obtiene la ecuación (16)

$$Y' = Y_{total} - A_2 - A_{1,1} - A_{1,2} + G_{ant} + G_{ampli} \quad (16)$$

Introduciendo la ecuación (16) en la ecuación (14) se obtiene la ecuación (17):

$$PRA = P_{rx} + Y_{total} - A_2 + G_{ant} \quad (17)$$

Donde las unidades de cada componente de la ecuación son:

$$[PRA] = \text{dBm}$$

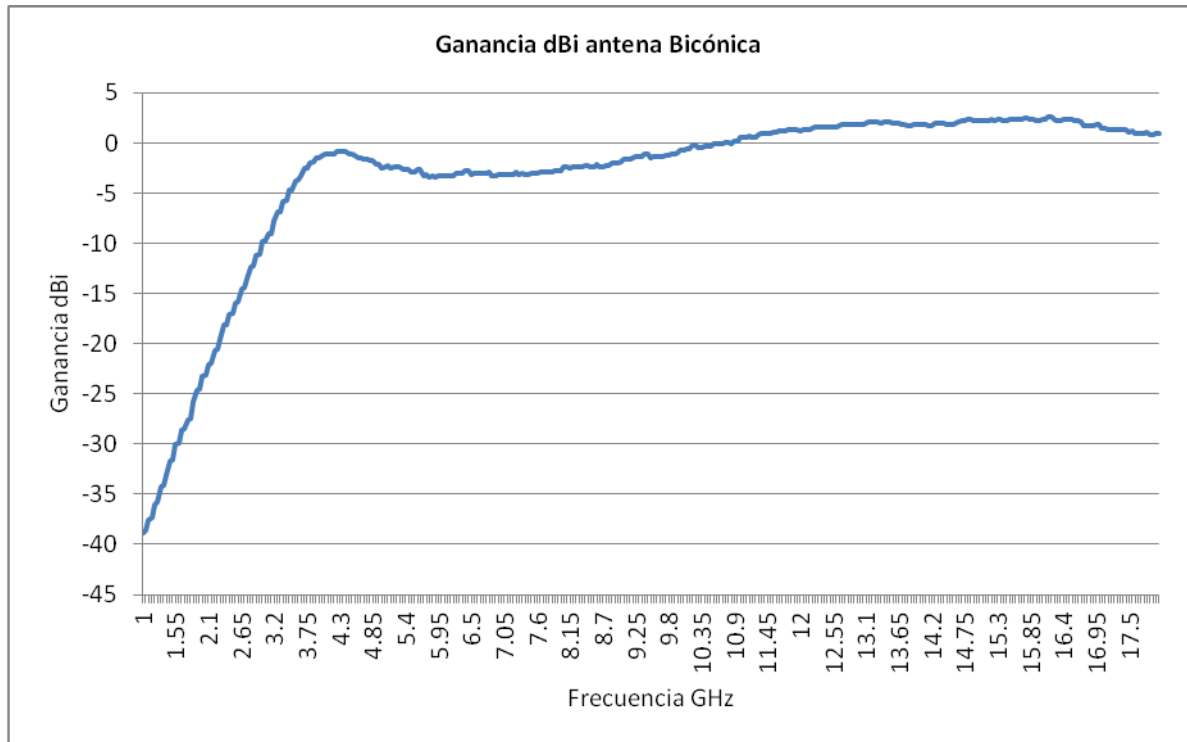
$$[Y_{total}] = [A_2] = [G_{ant}] = \text{dB}$$

La ecuación (17) es igual a la ecuación (5) así que a partir de aquí el procedimiento será el mismo que el seguido en el rango de frecuencias desde 30 MHz hasta 1 GHz pero en este caso para el rango de 1 GHz hasta 13 GHz. Siguiendo las mismas consideraciones que se indicaron allí, se obtiene como ecuación resultante la ecuación (8) que se repite a continuación por comodidad.

$$PRA \text{ (dBm)} = P_{rx} \text{ (dB}\mu\text{V)} + Y \text{ (dB)} - A_2 \text{ (dB)} \quad (8)$$

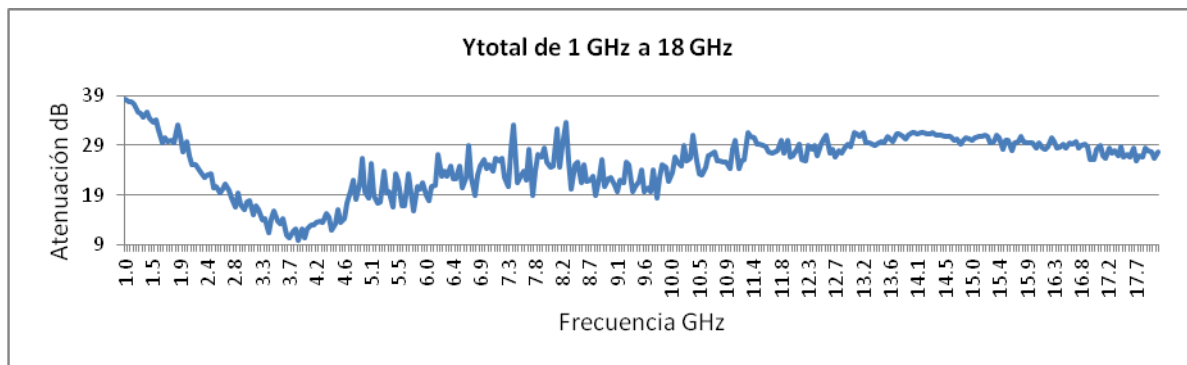
A continuación se realiza la normalización, las calibraciones de los cables A_2 , se obtiene la ganancia de la antena, y los valores de las variables Y_{total} e Y .

La gráfica 32 muestra la ganancia obtenida a partir de los datos de las hojas de calibración de la antena. Como indica la hoja de datos de la antena biconica utilizada, la antena no presenta un buen comportamiento desde 1GHz hasta 3 GHz, y como se comprueba en la gráfica 32 desde 1 GHz hasta aproximadamente los 4 GHz el comportamiento de la antena no es bueno.



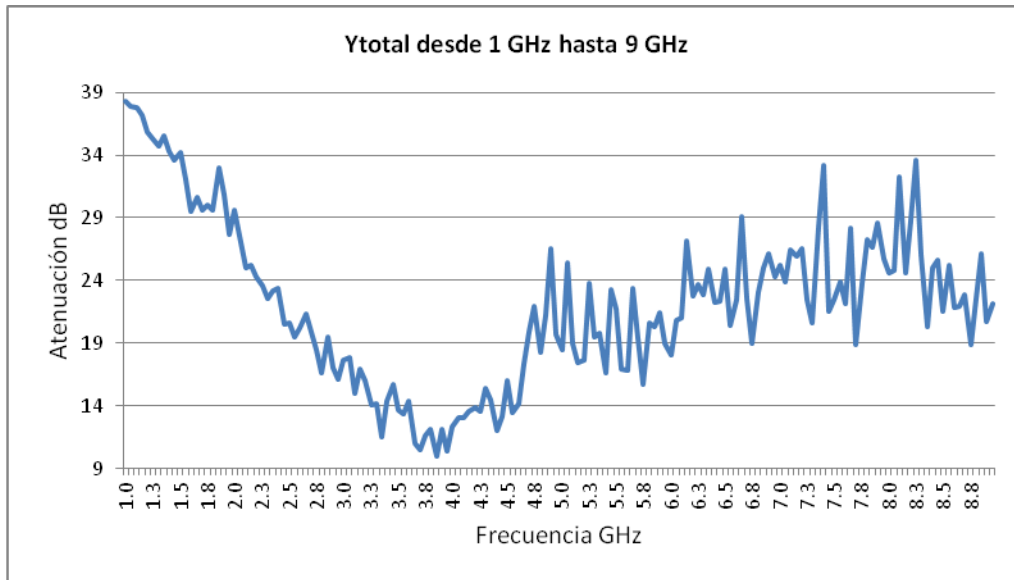
Gráfica 32. Ganancia de la antena bicónica.

La gráfica 33 muestra la atenuación total, Y_{total} , entre el generador, que introduce una potencia de 0 dBm, y el receptor teniendo en cuenta los elementos intermedios tales como la celda GTEM, los cables y el amplificador. Para la medida de la variable Y_{total} se ha utilizado una potencia de transmisión de 0 dBm.

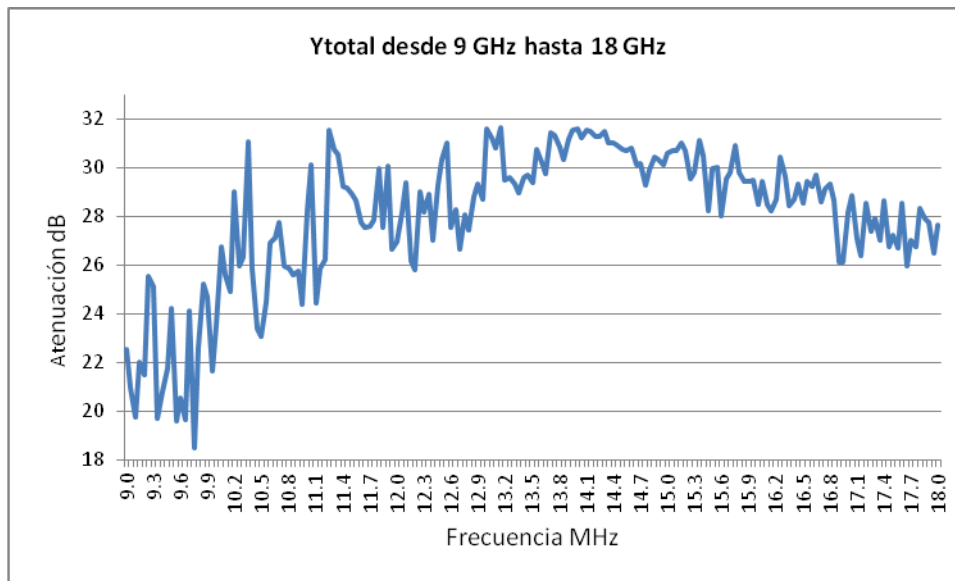


Gráfica 33. Atenuación Y_{total} .

Con el objetivo de visualizar mejor la gráfica 33, las gráfica 34 y 35 muestran en dos subrangos la variable Y_{total} .



Gráfica 34. Y_{total} subrango 1 GHz - 9 GHz.



Gráfica 35. Y_{total} subrango 9 GHz – 18 GHz.

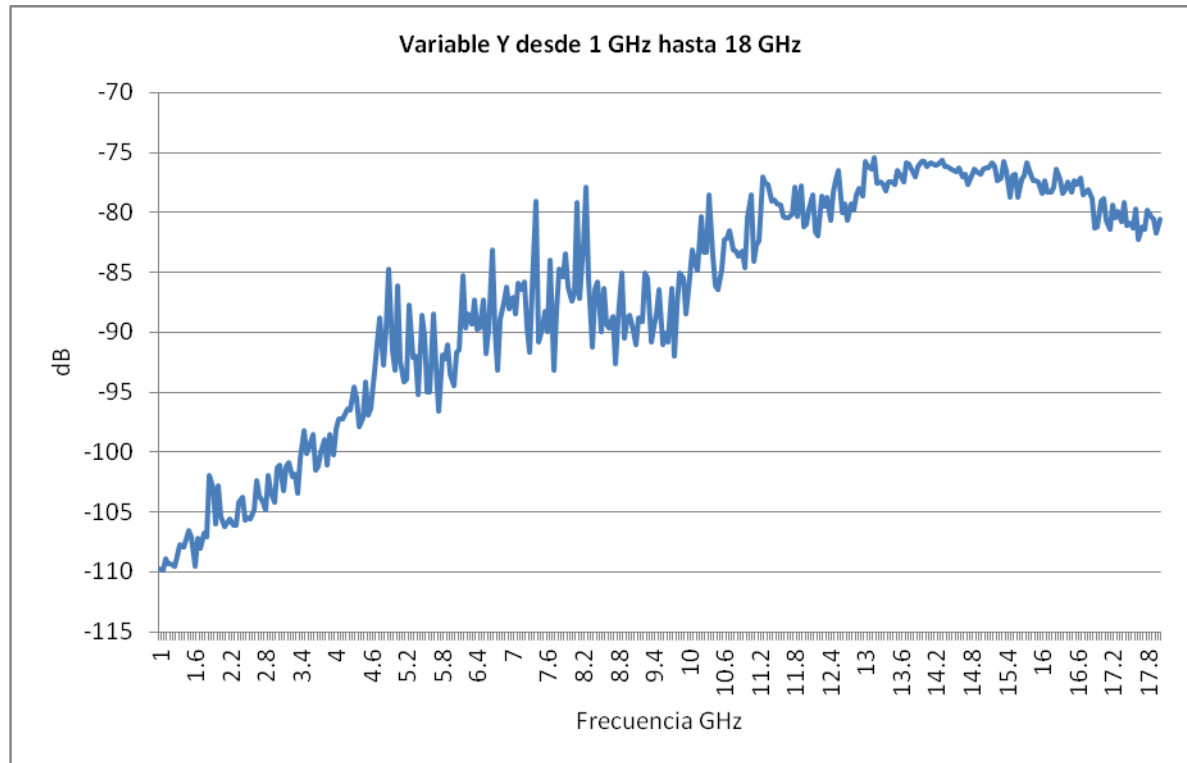
Como muestra la gráfica 34 el comportamiento de las medidas de la variable Y_{total} , que representa una atenuación, es decreciente entre las frecuencias de 1 GHz y 4 GHz, esto es debido al que la antena biconica utilizada no tiene un buen comportamiento en ese rango de frecuencias.

La gráfica 34 (a partir de los 4 GHz) y la gráfica 35 muestran el comportamiento creciente de las medidas de la variable Y_{total} , con un rizado destacable de hasta 10 dB que disminuye a partir de los 13 GHz.

A altas frecuencias, el comportamiento de la GTEM es mucho peor, entre otras cosas porque aparecen modos superiores. También se puede ver en las gráficas 5 y 6, donde se analiza en campo electrico en el rango de frecuencias desde 6 GHz hasta 13 GHz, como el comportamiento del campo eléctrico varía con respecto a las bajas frecuencias y la GTEM presenta un rizado muy grande.

Este rizado se analizará mas detenidamente a lo largo del proyecto.

Una vez obtenidas las tablas necesarias para la ecuación (17), se realizan las operaciones que se muestran en la ecuación (9) y se obtiene la tabla del elemento Y. En la gráfica 36 se pueden ver los valores que toma la variable Y en función de la frecuencia. La gráfica 36 muestra un gran rizado también debido a que contiene el rizado de la variable Y total. También se ve en la gráfica 36 como en el rango desde 1 GHz hasta 4 GHz el comportamiento es muy malo, esto es debido a que la antena utilizada no trabaja bien en este rango.



Gráfica 36. Variable Y desde 1 GHz hasta 18 GHz.

La tabla de valores Y junto con las correspondientes tablas de calibraciones de los elementos que componen el parámetro A_2 se introducen en el software EMC 32, que será el encargado de realizar la operación de la ecuación (8).

En el EMC 32 se configuran los elementos que hacen la función de recepción, atenuación y transducción, para introducir en ellos las tablas correspondientes. En este caso la tabla Y se introduce en el elemento transductor, y la tabla A_2 en el elemento atenuador.

El EMC 32, realiza la operación de sumar las tablas que contiene, en nuestro caso la tabla de transducción Y junto con la tabla de atenuaciones A_2 . Como la atenuación del parámetro A_2 , siguiendo la ecuación (8), debe ser restada, los valores de A_2 se deben introducir multiplicados por un signo negativo.

El software va obteniendo los valores, P_{rx} , que recibe del receptor y les aplica la ecuación (8) para obtener y mostrar por pantalla la PRA obtenida en cada frecuencia.

4.5.2.1-Análisis del rizado

En este apartado, con el objetivo de analizar el rizado se realizan una serie de pruebas para ver, por una parte, cuáles son los elementos que introducen el rizado, y por otra parte, ver cómo podría mejorarse, y suavizar el rizado.

En concreto en este apartado se analiza el rizado que aparece en la medida realizada entre el transmisor y el receptor a frecuencias por encima de 1 GHz.

Teniendo en cuenta la configuración de la figura 31, los elementos que con más probabilidad pueden producir el rizado son la antena utilizada y la propia celda GTEM. Como se analiza en el apartado de verificaciones de esta memoria, la celda GTEM introduce rizado, por lo que parte del rizado que aparece en las medidas de la variable Y_{total} es debido a la celda GTEM, sin embargo, la antena de sustitución también puede ser la causante del rizado en las medidas.

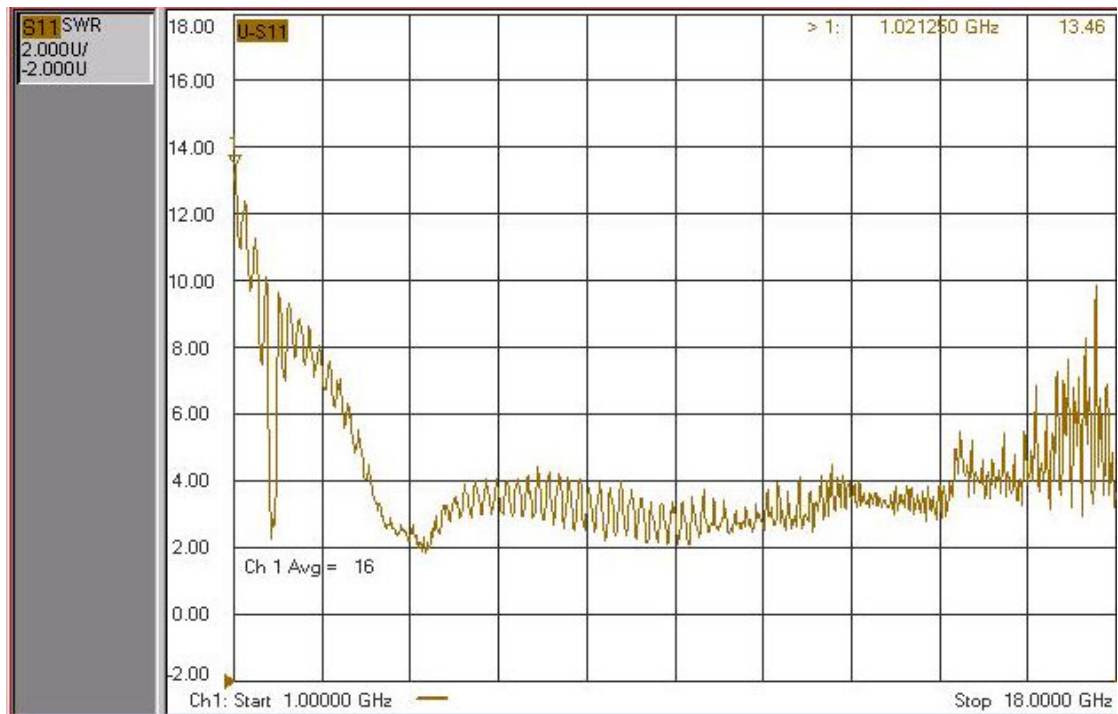
Como primer análisis se analiza la antena utilizada como antena de sustitución, la antena bicónica, para comprobar si dicha antena introduce rizado. Utilizando el analizador de redes que aparece en la figura 37 se mide la ROE que aparece representada en la gráfica 38.

Este primer análisis se enfoca como un análisis de prueba con el objetivo de suavizar el rizado, sin embargo, las siguientes pruebas colocando un atenuador en la antena no solucionan el problema del rizado. Se indican a continuación las medidas hechas como una hipótesis de partida propuesta aunque no resultó ser una solución.



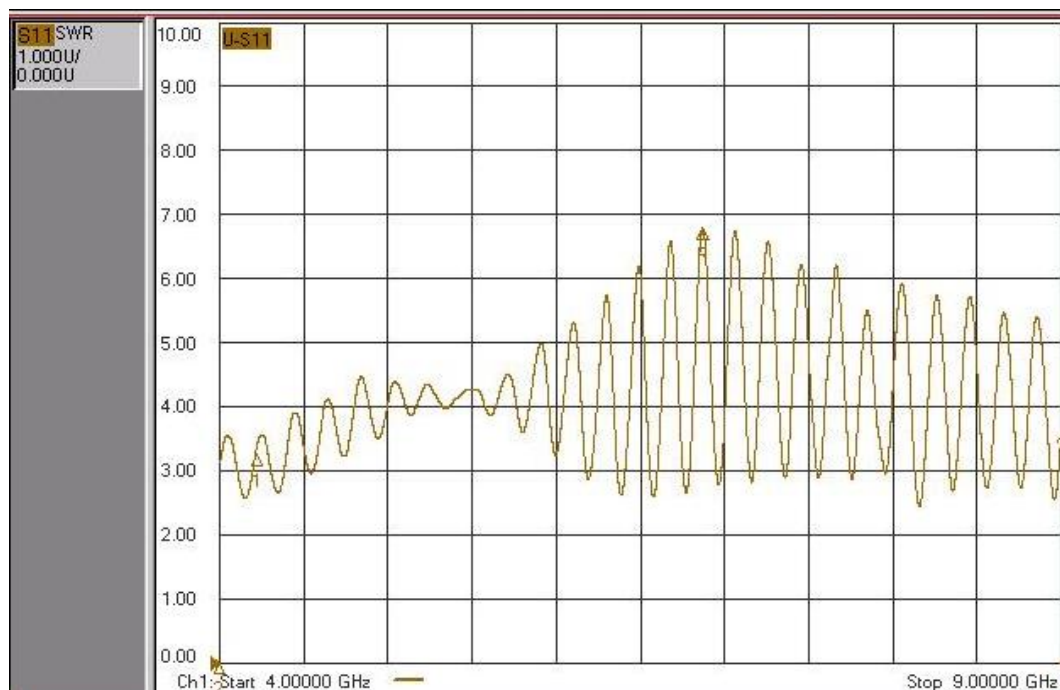
Figura 37. Analizador de redes.

4.- Descripción de la solución propuesta



Como se ve en la gráfica 38, la ROE es muy mala desde frecuencias de 1GHz hasta frecuencias cercanas a 4 GHz, como ya se sabía la antena no trabaja bien en este rango de frecuencias.

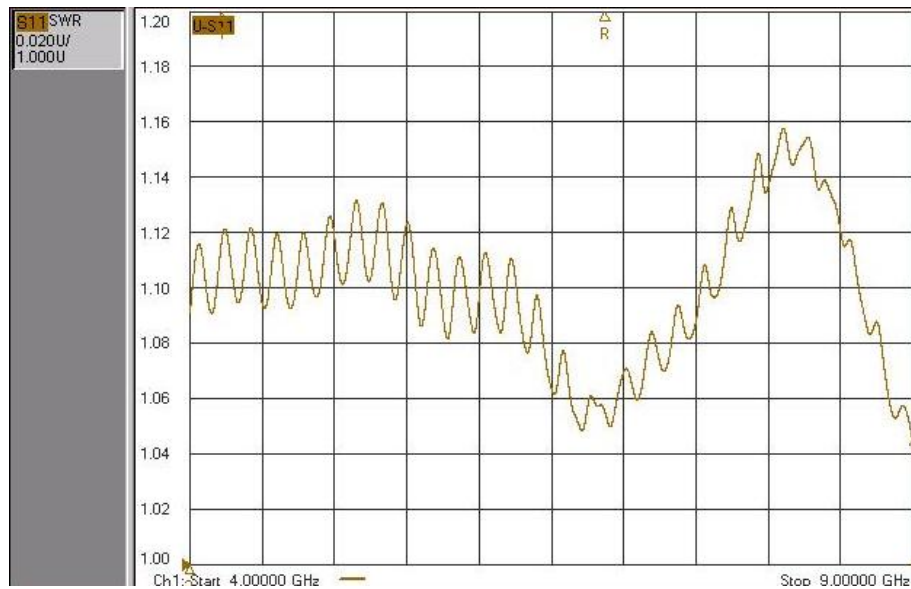
Para el resto del rango, si se centra el análisis en el rizado, se observa que la antena tiene un rizado. Con el objetivo de analizar este rizado se realiza una segunda medida con el analizador de redes en un rango de frecuencias menor. Esta medida se ilustra en la gráfica 39 donde se ha medido la ROE en el rango desde 4 GHz hasta 9 GHz.



Como se observa con la ROE, la antena bicónica presenta un rizado de hasta aproximadamente 3.5 dB, que influye en la variable Y_{total} medida, produciendo un rizado en esta variable.

Con el objetivo de minimizar este rizado se coloca un atenuador de 20 dB en el puerto de entrada de la antena, ya que los atenuadores ayudan a disminuir el rizado.

La gráfica 40 muestra la ROE de la antena cuando tiene el atenuador de 20 dB. Como muestra la gráfica 40 al introducir el atenuador de 20 dB el rizado ha disminuido considerablemente a valores máximos de 1.13 dB.

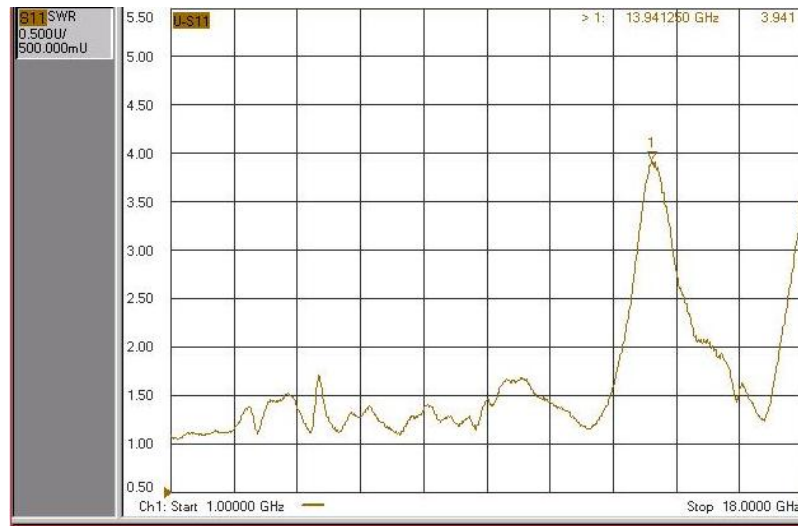


Gráfica 40. ROE de la antena bicónica con atenuador de 20 dB.

Por otra parte, como segundo análisis de la causa del rizado presente en la variable Y_{total} , se analiza la celda GTEM.

Con el uso del analizador de redes se mide el parámetro de la ROE del puerto de la celda GTEM, obteniendo los resultados que aparecen en la gráfica 41, donde el valor de la ROE es un valor cercano a 1, por lo tanto, en el puerto de la celda GTEM no se producen reflexiones, que lleven a producir un rizado en la variable Y_{total} .

4.- Descripción de la solución propuesta



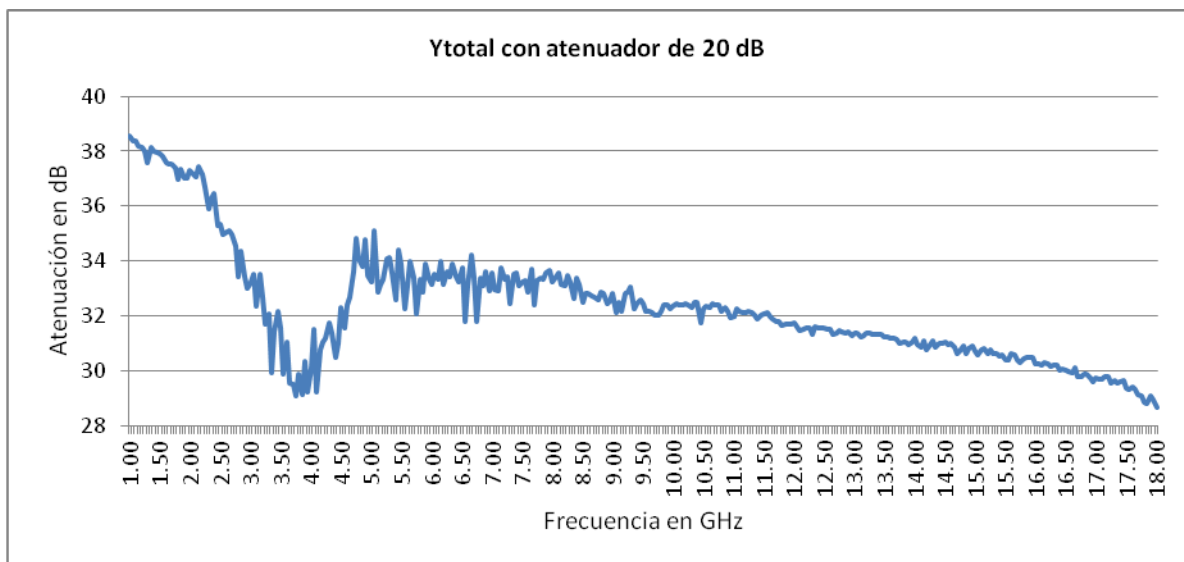
Gráfica 41. ROE del puerto de la celda GTEM.

A partir de resultado obtenido en la gráfica 40, donde el rizado disminuye al colocar el atenuador en el puerto de la antena se propone la configuración propuesta en la figura 31 añadiendo un atenuador de 20 dB como el que aparece en la figura 39 que trabaja en una banda desde 0 Hz hasta 18 GHz.



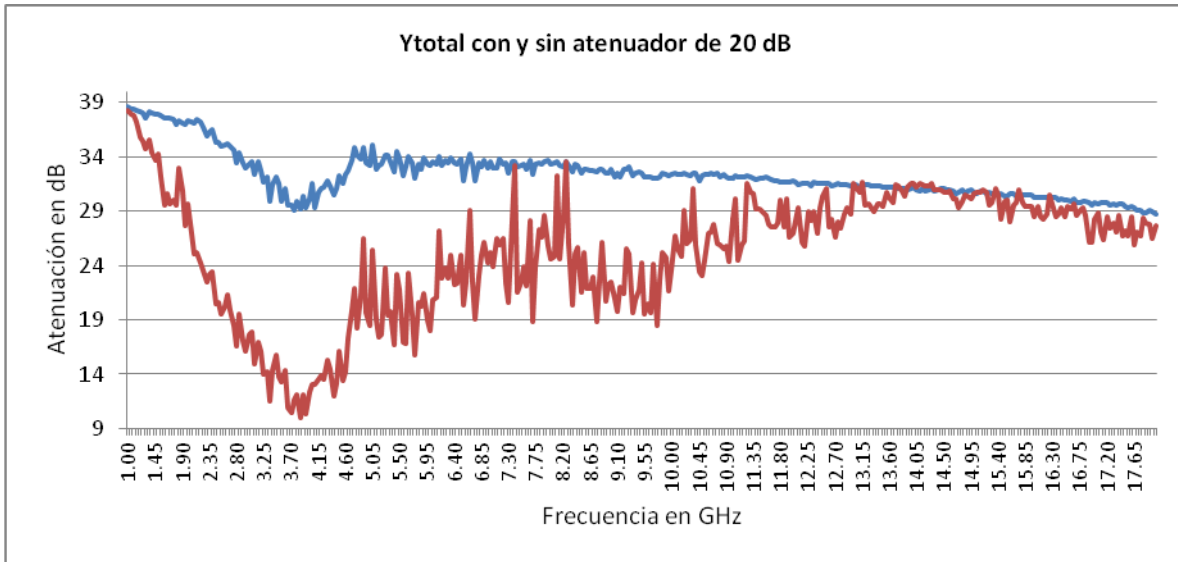
Figura 39. Atenuador de 20 dB.

Con la configuración del atenuador de 20 dB, se mide nuevamente la variable Y_{total} entre el transmisor y el receptor con una potencia de transmisión de 0 dBm. Obteniendo los resultados que aparecen en la gráfica 41.



Gráfica 41. Y_{total} con atenuador de 20 dB.

A primera vista, el rizado ha disminuido de forma considerable, ya que ahora se tiene un rizado de alrededor de 2 dB como valor máximo y no de 10 dB. Sin embargo, si se compara la medida de la Y_{total} con el atenuador y sin él, se observa que la diferencia de 20 dB debida al atenuador que debería existir entre ambas medidas no se cumple, como se comprueba en la gráfica 42.



Gráfica 42. Comparación Y_{total} con y sin atenuador.

De los resultados obtenidos en la gráfica 42, y tras comprobar con el analizador de redes que el atenuador se encuentra en perfectas condiciones y atenúa 20 dB. Se comprueba que con una potencia de transmisión de 0 dBm y el atenuador de 20 dB la atenuación que sufre la señal es muy grande y por lo tanto la señal no llega al receptor y no puede ser medida, provocando esto que la medida de Y_{total} no se realice de manera adecuada y no se manifiesten los 20 dB de diferencia entre ambas medidas de atenuación de la Y_{total} .

Por lo tanto la configuración propuesta con el atenuador en la antena no es válida.

Para continuar, y con el objetivo de no tardar mucho tiempo en realizar las medidas, a partir de aquí se realizarán las medidas en el rango inicial desde 1 GHz hasta 13 GHz, ya que los equipos que se van a utilizar para medir las emisiones espurias radiadas se analizan hasta 12.75 GHz. En los análisis anteriores se han analizado frecuencias hasta 18 GHz para ver el comportamiento a frecuencias más altas aprovechando que los equipos de medida que se han utilizado permiten trabajar hasta frecuencias de 18 GHz.

En un siguiente análisis, se utiliza la configuración inicial de la figura 31, que se repite a continuación por comodidad, utilizando una potencia de 15 dBm para tener una señal de transmisión con una potencia suficientemente alta para que tras sufrir la alta atenuación entre el transmisor y el receptor la señal llegue con suficiente potencia al receptor para poder ser medida.

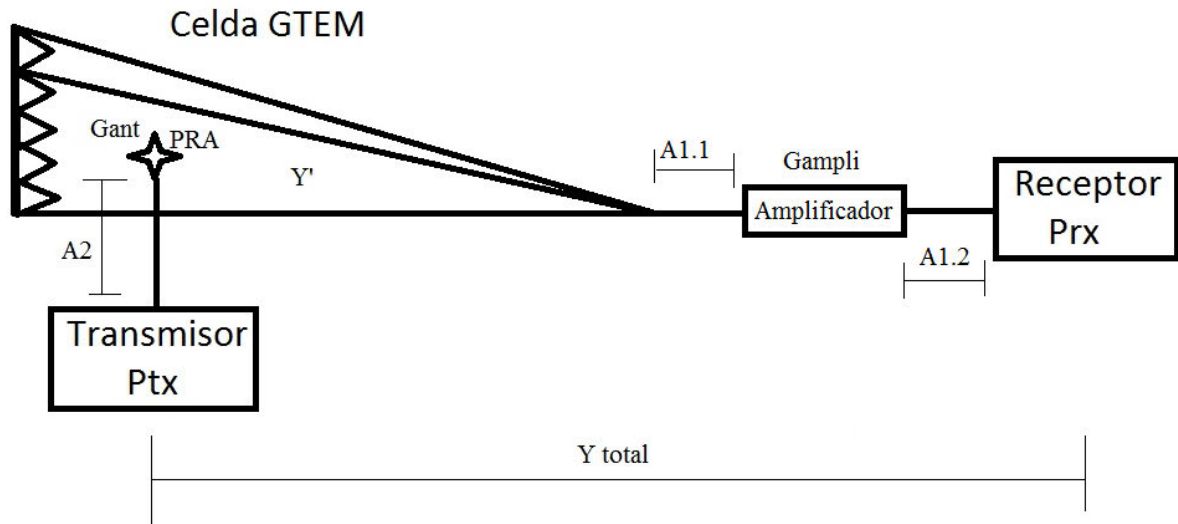
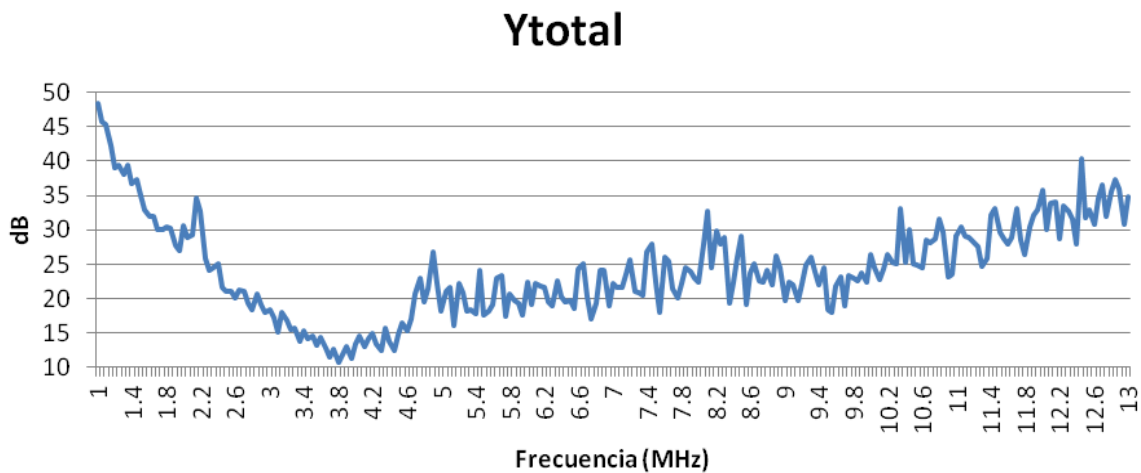


Figura 31. Configuración para la medida de PRA.

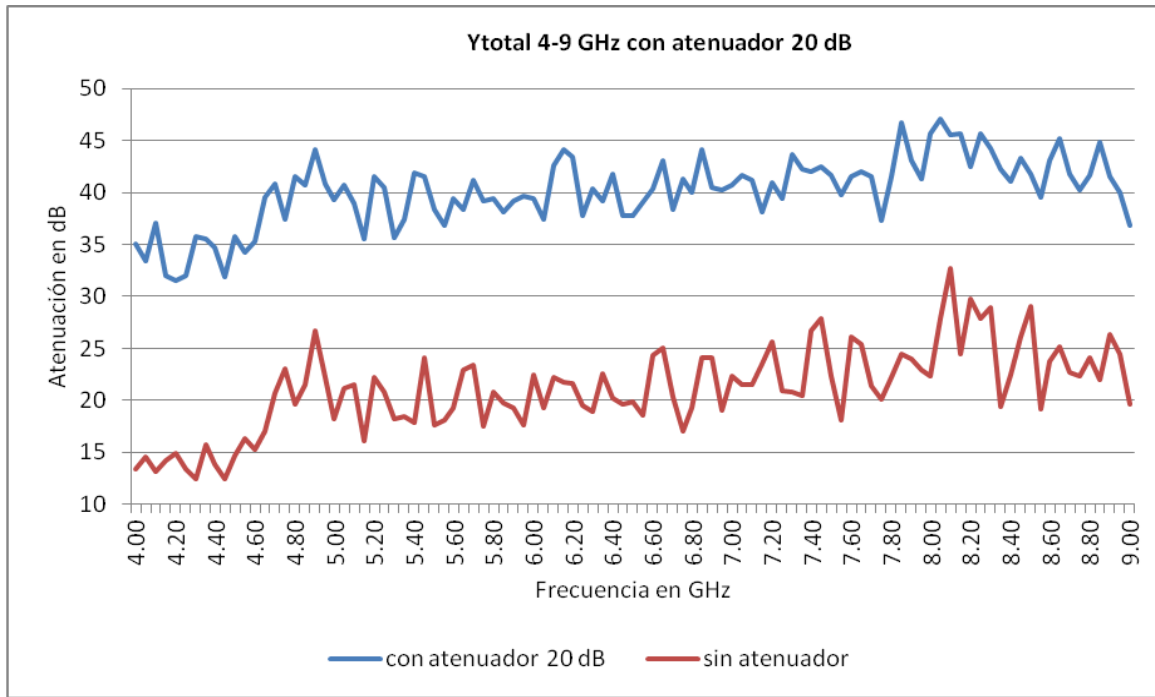
La gráfica 43, muestra la atenuación de la figura 31 entre el transmisor con una potencia de 15 dBm y el receptor. Como se puede ver, existe rizado, como ocurre en la gráfica 33, donde se utiliza la misma configuración con una potencia de transmisión menor. Para las siguientes medidas con el objetivo de seguir intentando evitar el rizado que aparece, se divide el rango de 1 GHz- 13 GHz, en tres subrangos de 1 GHz- 4 GHz, otro de 4 GHz- 9 GHz y 9 GHz 13 GHz ya que cada uno de estos subrangos presenta características diferentes.



Gráfica 43. Atenuación total desde 1 GHz -13 GHz.

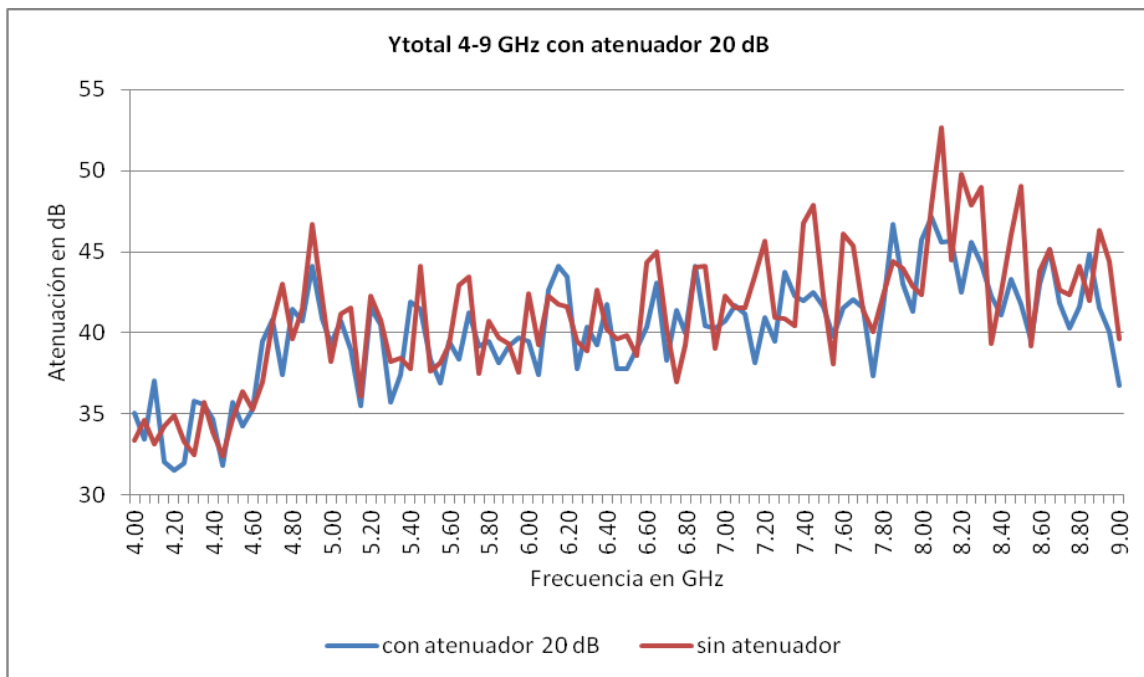
En el primer subrango a la vista de los resultados obtenidos en la gráfica 43, el rizado de forma general no es muy grande, así que en este tramo no se hace ninguna modificación.

En el segundo subrango, desde 4 GHz hasta 9 GHz el rizado es grande, por ello para intentar disminuirlo se procede a colocar un atenuador de 20 dB en el puerto de entrada de la antena biconica de sustitución y a realizar la medida de la variable Y_{total} con una potencia de transmisión de 15 dBm, para que la señal transmitida tenga una potencia suficiente para ser medida por el receptor. La gráfica 44 muestra la medida de atenuación Y_{total} entre el transmisor y el receptor utilizando el atenuador de 20 dB.



Gráfica 44. Comparación Y_{total} con y sin atenuador de 20 dB.

Como se observa en la gráfica 44, se comprueba que la diferencia entre ambas medidas es de 20 dB, que es consecuencia del atenuador introducido, con esto se puede concluir que la medida realizada es válida ya que la señal de transmisión tiene la suficiente potencia para llegar a ser medida por el receptor después de sufrir la atenuación entre el transmisor y el receptor. Sin embargo, no se cumple el objetivo buscado de disminuir el rizado, ya que si se superponen ambas medidas como se observa en la gráfica 45, el rizado es similar añadiendo u omitiendo el atenuador de 20 dB, así que con la introducción del atenuador no se consigue minimizar el rizado.



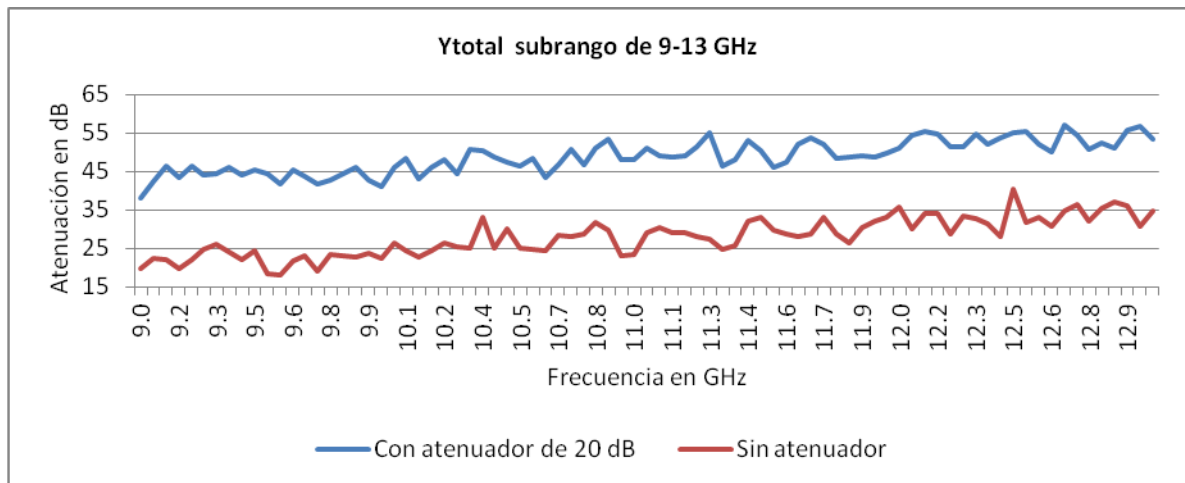
Gráfica 45. Rizado con y sin atenuador.

El último subrango, desde 9 GHz hasta 13 GHz, también presenta un rizado destcable, para ello siguiendo el objetivo de minimizar en esta banda se introduce nuevamente el atenuador de 20 dB en la antena. Además debido a que este rango de frecuencias presenta una atenuación muy alta se usará un amplificador justo después del transmisor como el que se muestra en la figura 40, para proporcionar la potencia suficiente, dicho amplificador trabaja en un rango de 6 GHz hasta 18 GHz y proporciona una ganancia aproximada de 42 dB. El amplificador se tiene en cuenta en la normalización, por lo que no se tiene en cuenta su ganancia en la medida de la variable Y_{total} .



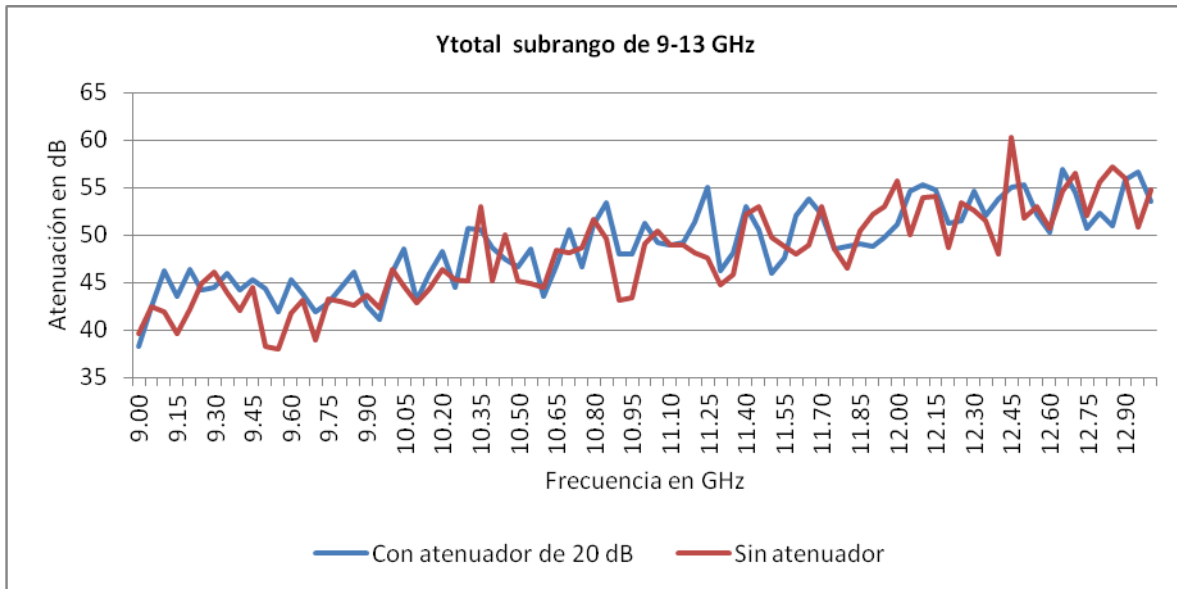
Figura 40. Amplificador usado en la normalización.

La gráfica 46 muestra los valores de medida de la variable Y_{total} obtenidos con una potencia desde el transmisor de -10 dBm y la diferencia existente de los 20 dB introducidos por el atenuador de 20 dB, que indican que la señal transmitida es medida por el receptor.



Gráfica 46. Y_{total} con y sin atenuador.

La gráfica 47 muestra que como en el caso del subrango desde 4 GHz hasta 9 GHz, ahora la presencia de atenuador tampoco disminuye en rizado, ya que si se superponen ambas medidas, con y sin atenuador, el rizado es similar.



Gráfica 47. Comparación de rizado con y sin atenuador.

Ante los resultados obtenidos, se deduce que el rizado introducido en la medida de la Y_{total} es causado por una parte por el rizado que presenta la antena bicónica de sustitución, y por otra parte el rizado que introduce la celda GTEM. Y por lo tanto las pruebas con el atenuador para intentar suavizar el rizado no han resultado efectivas, por ello no se utiliza en las siguientes configuraciones.

Para seguir con el análisis del rizado, se repite la configuración de la figura 31, con una potencia de 15 dBm, pero en este caso utilizando como antena de sustitución una antena de bocina como la de la figura 37, (que cubre el rango de medida desde 1 GHz hasta 13 GHz) con el objetivo de ver si esta nueva antena introduce menos rizado que la antena bicónica y por lo tanto el rizado total que se obtiene en la atenuación Y_{total} es menor.

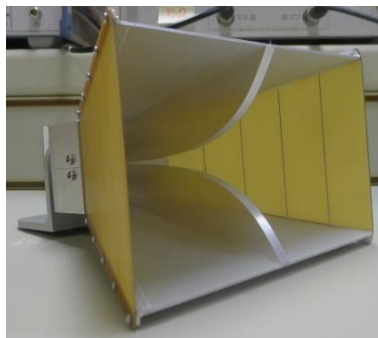
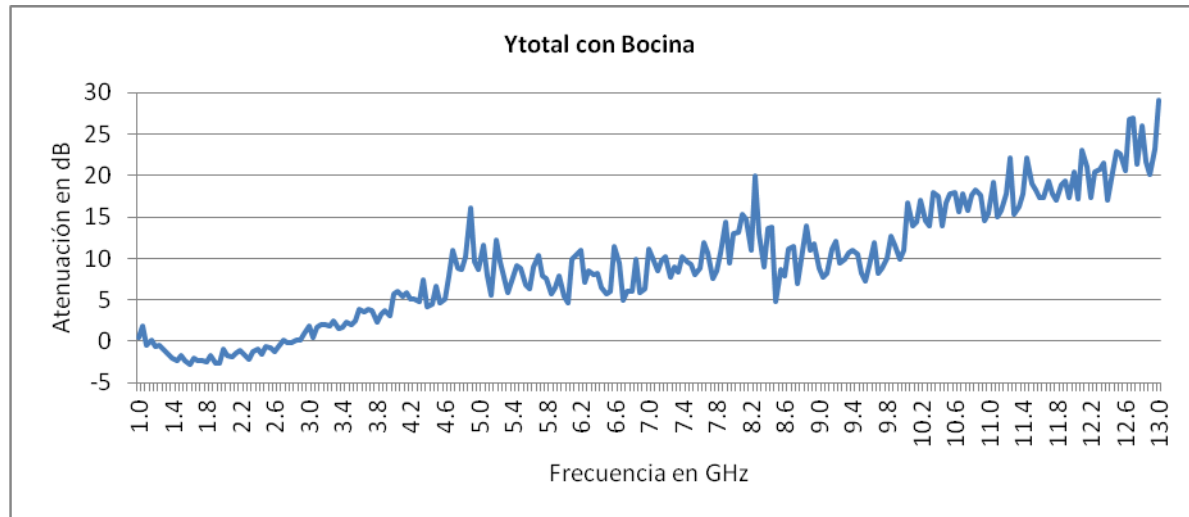


Figura 37. Antena de bocina.

La gráfica 48 muestra la atenuación Y_{total} usando como antena de sustitución la antena de bocina. En este caso como se comprueba en la gráfica 48 el rizado sigue siendo un rizado total tan grande como el obtenido con la antena bicónica de sustitución con valores máximos de hasta 10 dB.



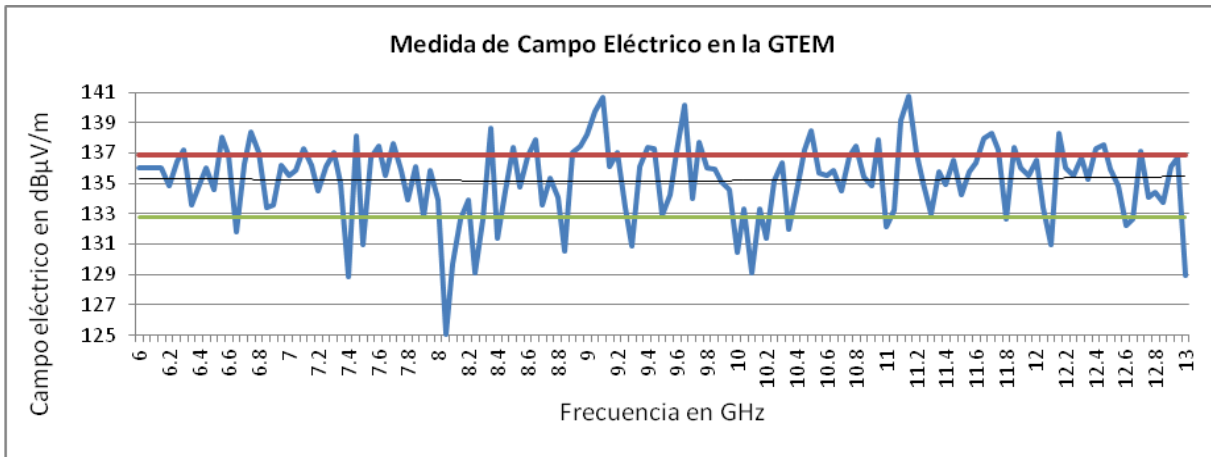
Gráfica 48. Medida de atenuación Y_{total} con antena de bocina.

Por lo tanto, el rizado introducido en la variable de atenuación Y_{total} , es debido principalmente al rizado producido por la propia celda GTEM siendo independiente de la antena de sustitución que se utilice.

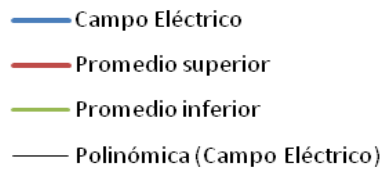
Con el objetivo de comprobar que el rizado que introduce la propia GTEM es igual al rizado que presenta la variable Y_{total} , se realiza lo siguiente:

- Primero, a partir de una de las medidas obtenidas en el apartado de verificaciones de la celda GTEM de esta memoria, y después de pasar de las unidades de V/m a unidades de dB μ V/m (para facilitar la comparación posterior) se obtiene el rizado medio presente en la medida. Por ejemplo, utilizando la medida de campo eléctrico obtenida al colocar la sonda en el punto $Z=2$ m, $Y=22$ cm y $X=0$ m se obtiene la gráfica 49, donde para obtener una estimación del rizado medio primero se ha establecido una media inicial de los valores, para después hacer una media de sus valores superiores y otra media de sus valores inferiores y de esta manera, obteniendo la diferencia de estas dos últimas medias se obtiene el rizado medio de esta medida. La gráfica 49 muestra estos resultados, además se han obtenido las desviaciones entre los valores usados para la media inferior y superior donde los resultados han sido de 1.23 para los valores superiores y 2.01 para los valores inferiores.

A partir de la diferencia entre las dos medias calculadas se obtiene que el rizado medio es de 4.1 dB.

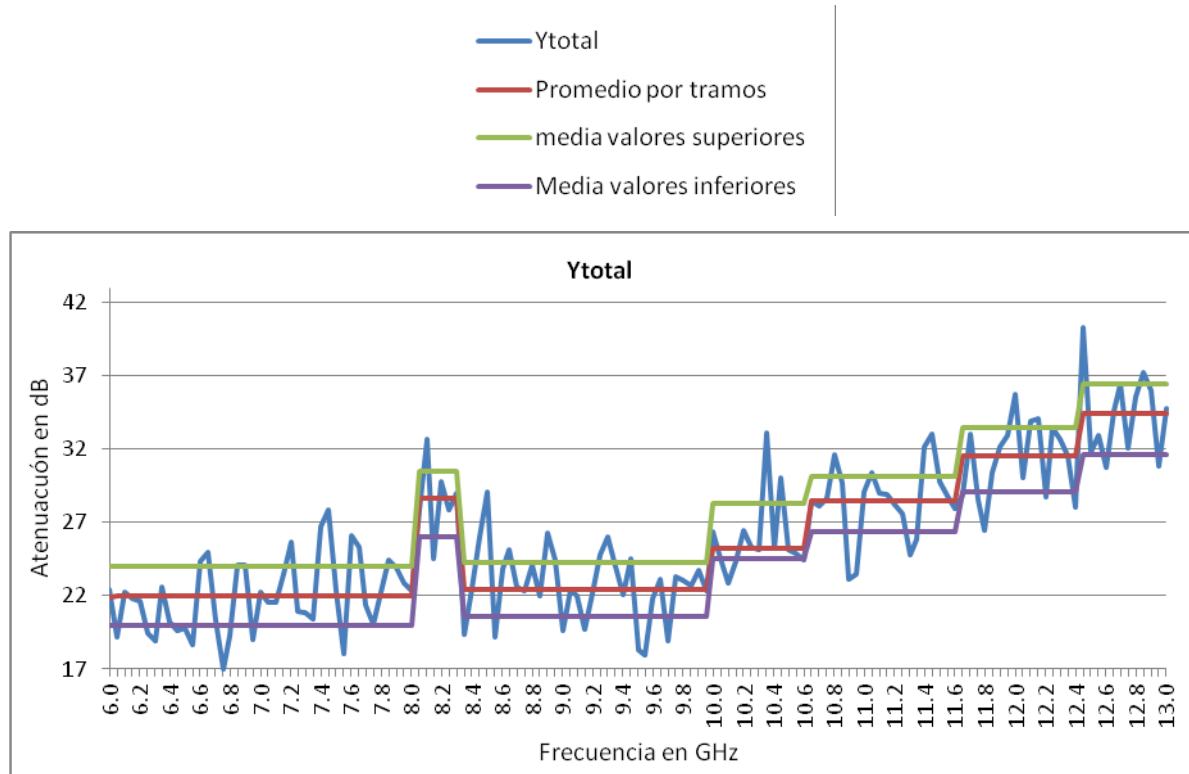


Gráfica 49. Medida promedio del rizado.



- En segundo lugar se realiza el mismo análisis del rizado de la variable Y_{total} obtenida a partir de la figura 31, usando la antena bicónica como antena de sustitución y una potencia de transmisión de 15 dBm. Debido a que la variable Y_{total} de la gráfica 50, presenta variaciones se realiza la diferencia de las medias superiores e inferiores de forma independiente para cada tramo diferenciado con el objetivo de obtener un rizado medio lo más aproximado al real en toda la banda. La gráfica 50 representa las medias inferiores y superiores utilizadas en cada caso. También se han calculado las desviaciones de los datos obteniéndose para los tramos superiores, con desviaciones entre 1.1 hasta 1.9 y en los tramos inferiores, con desviaciones desde 0.8 hasta 2.1 dB.

A partir de los datos representados en la gráfica 50 se obtiene la diferencia entre las parejas de medias obteniendo un rizado medio de entre 3.69 dB hasta 4.76 dB.



Gráfica 50. Medida promedio del rizado de Y_{total} .

De estos dos últimos análisis se deduce que el rizado que presenta la variable de atenuación Y_{total} viene dada por el rizado de la celda GTEM, ya que en ambos casos el promedio del rizado medido es de aproximadamente 4 dB de rizado.

Del análisis de este apartado referente al rizado se obtienen varias conclusiones, la primera de ellas es, que la celda GTEM presenta un rizado en frecuencias altas muy elevado que no es posible suavizar con el uso de un atenuador. En segundo lugar y para analizar el efecto del rizado de la antena en la medida de atenuación total, Y_{total} , se utiliza una bocina como antena de sustitución, y resulta que existe el mismo rizado que en el caso de la utilización de la antena bicónica, y finalmente se concluye que el rizado medio introducido por la celda GTEM es el rizado medio obtenido en la medida de Y_{total} , por lo tanto el rizado de la variable Y_{total} es debido directamente al rizado que presenta la celda GTEM.

4.5.2.2-Medida de PRA: Antena de bocina

De la misma forma que se utilizan los dipolos y la antena bicónica para realizar las comprobaciones para verificar la medida de PRA obtenida con la celda GTEM en el rango de frecuencia de 30 MHz a 1 GHz, en este apartado se utiliza como elemento de transmisión una antena de bocina, como la que aparece en la figura 37, para comparar la PRA de la bocina, obtenida directamente de la suma de la potencia inyectada en la entrada de la antena y su ganancia, como indica la ecuación (10), que se repite a continuación, con la PRA obtenida utilizando el procedimiento propuesto con la celda GTEM y el software EMC 32.

$$PRA (dBm) = P_{i2} (dBm) + G_{dipolo} (dB_d) \quad (10)$$

Donde:

P_{12} = Potencia introducida directamente al dipolo.

G_{dipolo} = Ganancia del dipolo.

Para obtener en diferentes frecuencias la medida de la PRA de la antena de bocina se utiliza la misma configuración que la figura 18 utilizada para los dipolos, modificando el dipolo por la antena de bocina.

Una vez obtenida la potencia que se inyecta a la antena, se obtiene la ganancia de la antena para cada frecuencia a partir del factor de antena de su hoja de datos. Para la obtención de la ganancia de la antena a partir de su factor de antena, se utilizan de nuevo las ecuaciones (11) y (12), que se repiten a continuación por comodidad.

$$G_{\text{dipolo}} (dB_i) = 20 * \log (F_{MHz}) - AF (dB/m) - 29.79 \quad (11)$$

$$G_{\text{dipolo}} (dB_d) = G (dB_i) - 2,15 (dB) \quad (12)$$

Donde:

G_{dipolo} = Ganancia del dipolo.

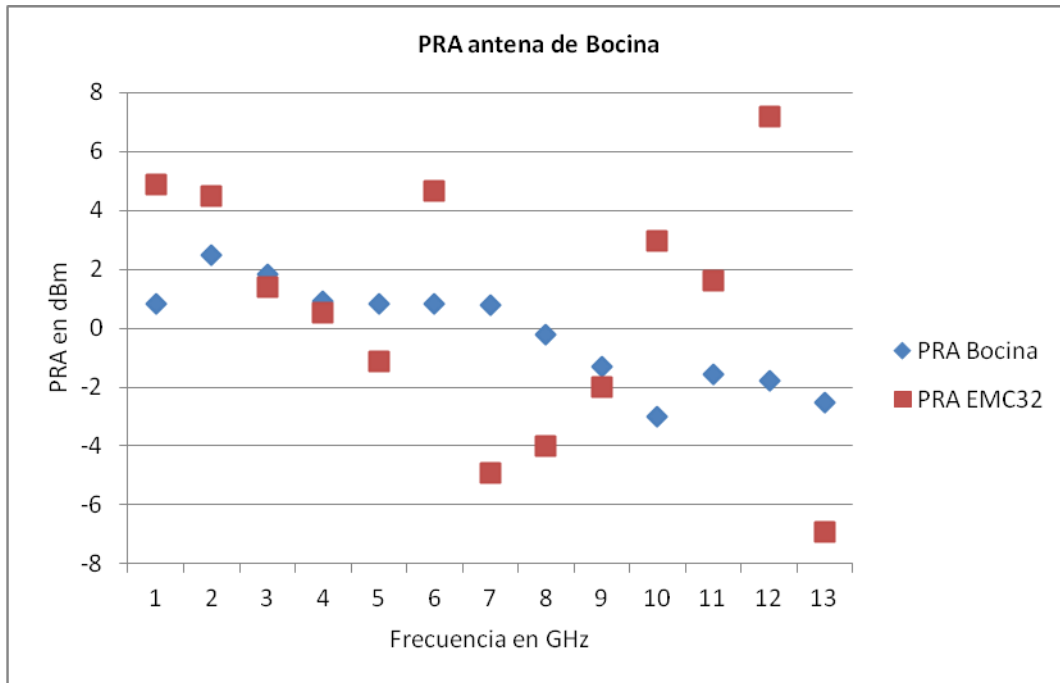
F_{MHz} = Frecuencia de trabajo del dipolo.

AF = factor de antena del dipolo.

Con los datos resultantes de la ecuación (10) se obtiene la PRA de la bocina, que se trata de la PRA real de la antena de bocina.

A continuación, utilizando la configuración de la figura 31 y el software EMC32 se realiza la medida de la PRA de la misma antena de bocina, a las mismas frecuencias y potencias de entrada de la bocina que las utilizadas en las medidas de la PRA sin utilizar la celda GTEM.

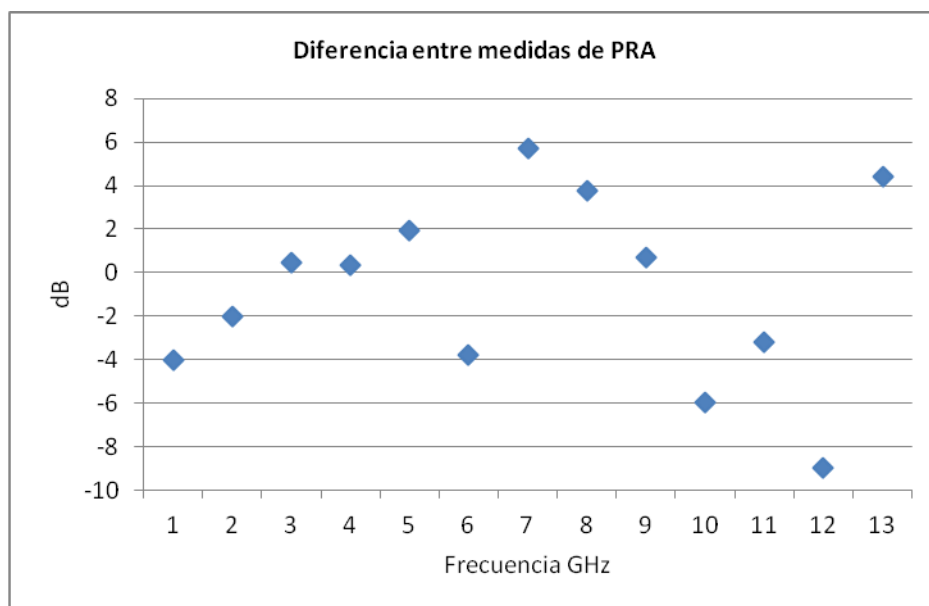
La gráfica 51 muestra las medidas de PRA de la bocina utilizada utilizando la celda GTEM y no utilizándola.



Gráfica 51. Comparación de PRA de una antena de bocina.

Como se observa en la gráfica 51 existen diferencias entre las medidas de la PRA de la bocina que siguen un comportamiento con menos oscilaciones que las medidas obtenidas utilizando la celda GTEM y el EMC 32, donde las medidas de PRA presentan un comportamiento más oscilante. Ambas medidas para algunas frecuencias se aproximan, pero para otras frecuencias presentan una diferencia de potencia apreciable.

La gráfica 52 muestra las diferencias entre las dos medidas de potencia, donde se puede ver que aparecen desde diferencias pequeñas del orden de 0.36 dB, hasta la diferencia más grande que alcanza los 8.82 dB.



Gráfica 52. Diferencias entre medidas de PRA de la bocina.

Estas diferencias de potencia representan el error cometido entre ambas medidas. Este error que para algunas frecuencias como para 12 GHz es muy alto, del orden de los 9 dB, puede ser

el resultado del rizado que se obtuvo en la medida de la Y_{total} , ya que el rizado era en algunos casos muy elevado de hasta 10 dB, por ello, si la medida de PRA obtenida coincide en frecuencia con el rizado, dicho valor de medida está desviado con respecto al que se obtendría si el rizado no fuera tan grande.

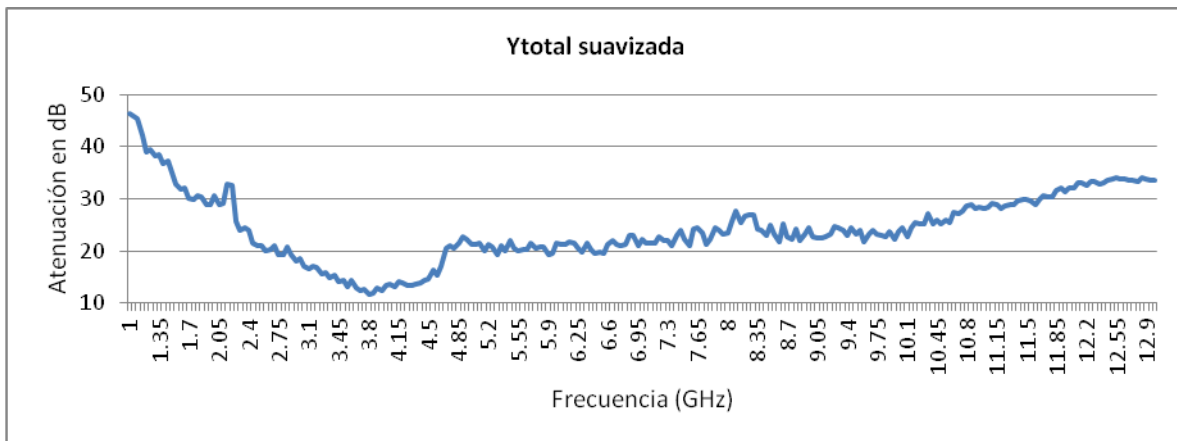
4.5.3-Rango 2: desde 1 GHz hasta 13 GHz. Propuesta final.

En este apartado se propone una configuración de medida igual que la propuesta en la figura 31 y siguiendo las mismas ecuaciones y mismas medidas que se han realizado hasta este apartado, con la salvedad de que el rizado presente en la variable Y_{total} se suaviza con el objetivo de que el procedimiento propuesto en este proyecto utilizando la celda GTEM proporcione unas medidas válidas de las medidas de emisiones espurias radiadas de un ESE.

Este suavizado se realiza a la variable de atenuación Y_{total} de manera aproximada, a partir de las conclusiones obtenidas en el apartado de verificaciones de la celda GTEM, donde tras la realización de la medida del nivel de campo en diferentes puntos de medida dentro de la celda GTEM se observa que los máximos de nivel de nivel de campo no siempre se presentan en la misma frecuencia, sino que varían en frecuencia en función de punto de medida.

Por esta razón, dado que el método de medida utilizado para obtener la variable Y_{total} , está basado en la sustitución en un único punto, los valores máximos de campo que se presentan a determinadas frecuencias varían de frecuencia si el punto de medida varía. Y dado que un ESE posee un volumen, es decir, no es un único punto, el suavizado de la variable Y_{total} se ve justificado para de esta manera obtener medidas válidas de PRA utilizando la GTEM y con un error menor que al utilizar la variable Y_{total} con un gran rizado.

La gráfica 53 muestra la nueva variable Y_{total} a la que se le ha aplicado ese suavizado en el rizado.

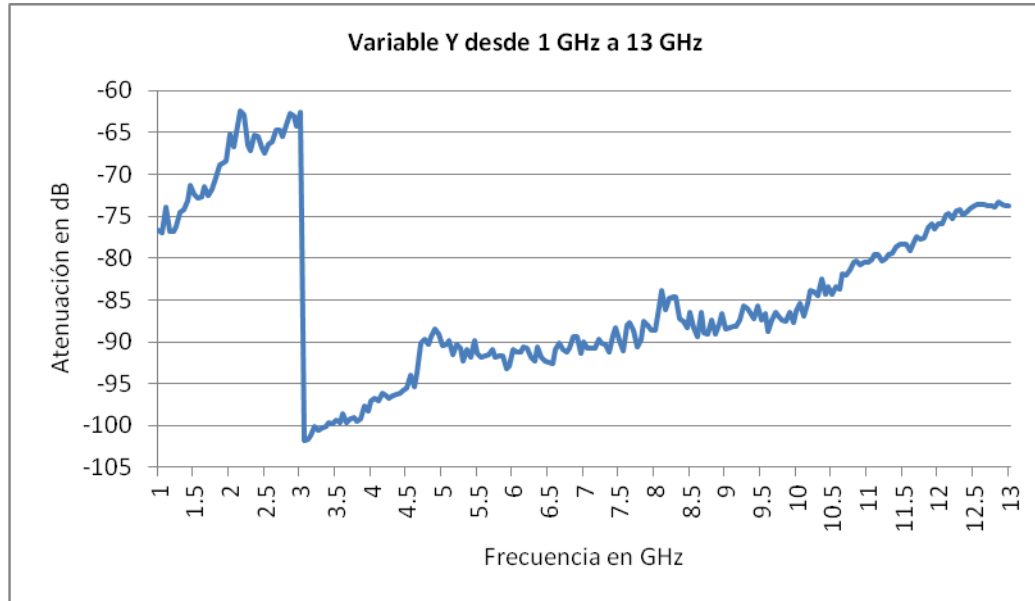


Gráfica 53. Y_{total} con rizado suavizado.

Además, tras realizar una medida de prueba de PRA, se comprueba que debido a la localización donde se encuentra ubicada la celda GTEM y su proximidad a una antena que proporciona señal wifi, y a una señal de telefonía en el rango de frecuencias de 2 GHz hasta 3 GHz se introducen en la GTEM dos señales, una señal de telefonía en 2.1 GHz y otra señal wifi en 2.3 GHz. Por ese motivo en el rango desde 1 GHz hasta 3 GHz se elimina el amplificador utilizado en la figura 31, y se mide la variable Y_{total} en ese rango de frecuencias.

La eliminación del amplificador en este rango de frecuencias se realiza para no amplificar las frecuencias en las que aparecen las señales interferentes de telefonía y wifi.

Tras añadir los nuevos valores en el rango de 1 GHz hasta 3 GHz en la variable Y_{total} , se obtiene la variable Y que se representa en la gráfica 54.



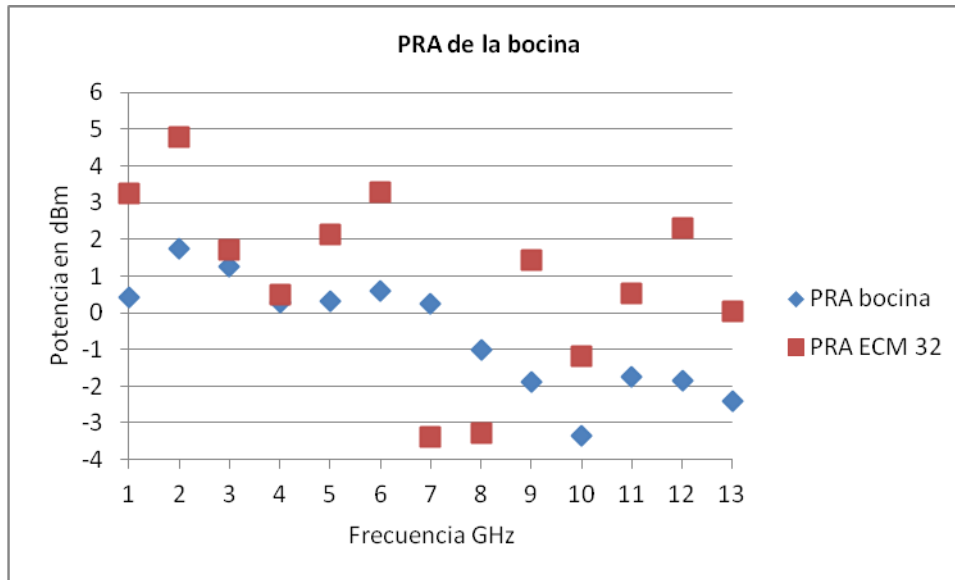
Gráfica 54. Variable Y suavizada final desde 1 GHz hasta 13 GHz.

Como se observa en la gráfica 54, el rizado es menor ya que ha sido suavizado en la variable Y_{total} que forma parte de la variable Y. Además se observa en 3 GHz la diferencia de atenuación ya que en el rango desde 1 GHz hasta 3 GHz no aparece la aportación del amplificador, por lo tanto la atenuación sufrida desde el transmisor hasta el receptor es mayor, y a partir de los 3 GHz, se observa que los valores de atenuación son menores debido al efecto del amplificador.

4.5.3.1-Medida de PRA: Antena de bocina

En este apartado se vuelve a medir la PRA de la antena de bocina pero esta vez utilizando la variable Y nueva que se ha obtenido tras suavizar el rizado y modificar el rango de 1 GHz a 3 GHz.

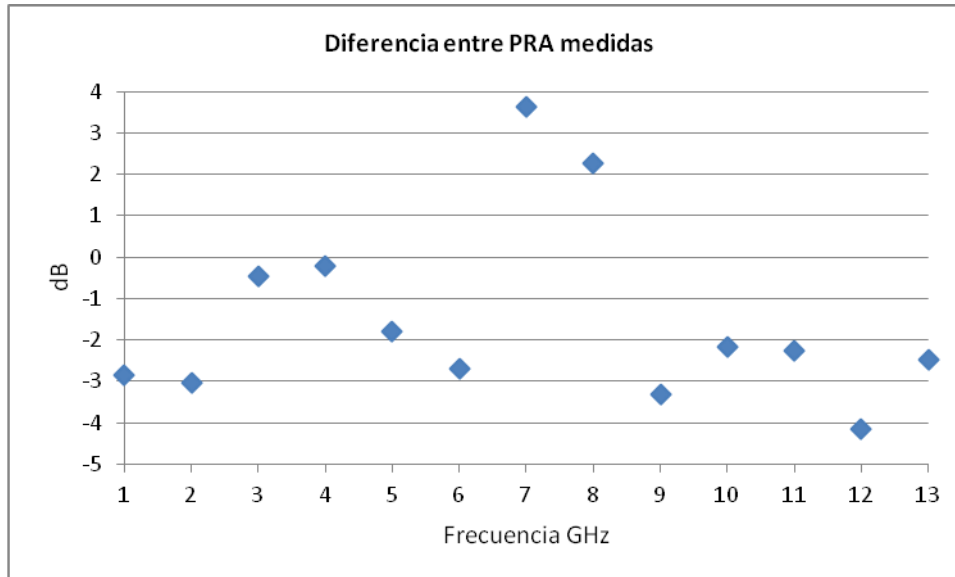
En primer lugar, se obtiene la PRA de la bocina sumando la ganancia de la bocina a la potencia que se le introduce a la antena en cada frecuencia y después de obtiene la PRA medida por el EMC 32 y utilizando la celda GTEM, para obtener las medidas que aparecen en la gráfica 55.



Gráfica 55. Medidas de PRA de la antena de bocina.

Como se ve en la gráfica los valores obtenidos mediante los dos métodos de medida son bastante más similares que en el caso anterior.

Con el objetivo de ver el error cometido entre las dos medidas la gráfica 56 muestra la diferencia entre medidas para cada frecuencia, que como puede apreciarse está en el intervalo ± 4 dB.



Gráfica 56. Diferencia en las medidas de PRA.

Como se observa en la gráfica 56 las diferencias de medida se encuentran generalmente en el intervalo ± 3 dB, con valores que van de los -0.2 dB hasta un valor de error máximo de -4.06 dB.

Comparando los errores obtenidos en las gráficas 56 y 52 se obtiene que el error cometido en la gráfica 56 es menor que el error cometido en la gráfica 52, donde se obtienen errores mayores, de hasta 8 dB de error cometido.

Por lo tanto, con el suavizado de la variable Y_{total} se obtienen medidas de emisiones espurias radiadas con un error menor.

5.- Presupuesto

El presupuesto que se presenta en este proyecto se reduce a los gastos materiales del software y el hardware utilizado en las medidas.

No se presenta el presupuesto real del trabajo realizado, que debería incluir el coste de las horas de trabajo, aproximadamente unas 350 horas, ni tampoco los medios utilizados. Aunque si se podría haber calculado el presupuesto de las horas de trabajo y también del PC utilizado en la redacción y cálculos del proyecto, no se ha podido hacer una estimación mínima de los equipos utilizados en la realización de las medidas. El problema principal es que este tipo de instrumentación no tiene preciso de alquiler, ya que no se utilizan para ello.

Por el motivo indicado anteriormente se ha decidido presentar como presupuesto el coste del equipamiento necesario, sin tener en cuenta el espacio necesario para su instalación, que será de varios metros cuadrados.

En la tabla 2 se muestra el presupuesto aproximado del equipamiento necesario para montar el banco de medida de emisiones espurias radiadas propuesto en este proyecto.

Tabla 2. Presupuesto del banco de medida

Elemento	Precio en €
Receptor	100.000
Software EMC 32	8.000
Amplificador	1.400
Ordenador	600
Cableado y conectores	10.000
Celda GTEM	375.000
Precio total aproximado	495.000

Por otra parte, teniendo en cuenta unas 360 horas de trabajo por parte del ingeniero que desarrolla este proyecto se estima un presupuesto por el total de horas trabajadas de 5.400 €.

6.- Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha propuesto el diseño de un procedimiento de medidas de emisiones espurias radiadas utilizando una celda GTEM, con el objetivo de comprobar la validez del uso de la celda GTEM como un entorno de medida alternativo a la cámara anecoica que se utiliza actualmente para este tipo de medidas y que conlleva un mayor gasto en tiempo y también una inversión en equipamiento mucho mayor que una celda GTEM.

Como propuesta de diseño se proponen diferentes configuraciones de medida, en función de los diferentes rangos de frecuencias que se analizan, con el objetivo de adaptarse a las características de la celda GTEM en cada rango de frecuencias.

Se propone utilizar el método de sustitución utilizando la celda GTEM, antenas de sustitución, elementos como amplificadores, receptores, cableado etc., para hacer un balance de potencias y obtener la medida de emisiones espurias radiadas a partir de la potencia radiada aparente medida con el método de sustitución.

Después de realizar comprobaciones y medidas de potencia radiada aparente, se obtienen las siguientes conclusiones:

La celda GTEM es un entorno de medida que puede ser utilizado para realizar medidas de emisiones espurias radiadas de un ESE, y proporcionar resultados similares a los que se obtienen en una cámara anecoica, como se ha comprobado en las medidas realizadas. De manera general las medidas realizadas en la celda GTEM se aproximan bastante a las medidas reales, aunque no en todas las frecuencias son exactamente iguales. Sin embargo el error cometido está acotado y es un error pequeño, para este tipo de medidas, que permite dar una muy buena aproximación de la medida real.

Las dimensiones del ESE que puede ser medido en la celda GTEM tienen unas restricciones que vienen dadas por las dimensiones de la celda GTEM y por el volumen de prueba en el que las medidas de potencia radiada aparente son válidas, ya que dentro de la celda GTEM, en la zona central existe una zona donde el campo eléctrico presenta un comportamiento bastante uniforme. Esta zona se encuentra (en altura) en el tercio intermedio entre el conductor interno y el conductor externo. Debido a la forma piramidal de la celda GTEM, en la parte de la base existe un volumen de prueba mayor, donde la altura del *septum* o conductor interno es de unos 52 cm y por lo tanto el ESE puede tener una altura máxima aproximada de 17 cm y 34 cm, ya que el tercio superior debe quedar libre, y aproximadamente el tercio inferior también ya que en las proximidades de las paredes interiores el campo eléctrico no es uniforme. Teniendo en cuenta que el tercio superior siempre debe quedar libre si se introduce un ESE cuya longitud a lo largo del eje Z sea mayor que en el resto de ejes, a lo largo de todo el eje Z la altura del ESE debe dejar libre el tercio superior de la celda entre el conductor interno y el conductor externo del suelo. En cuanto a la longitud a lo largo del eje X de la celda, y en función de las medidas realizadas en este proyecto se estiman unas dimensiones máximas de 28 cm a lo largo del eje X de la celda, para dejar un espacio entre las paredes laterales y el ESE.

Por otra parte, se han analizado dos rangos de frecuencias distintos debido a las diferentes características de cada rango, ya que para frecuencias mayores a 1 GHz, la atenuación introducida por la celda GTEM es notablemente mayor, además la celda GTEM introduce un rizado que es mayor a frecuencias superiores a 1 GHz y tras realizar el análisis espacial se

obtiene que los máximos de nivel de campo eléctrico no coinciden en frecuencia para distintos puntos de la celda GTEM, y por lo tanto al colocar un ESE, que posee un volumen, dentro de la celda GTEM, los máximos de nivel de campo no están en las mismas frecuencias.

En cuanto a los aspectos económicos, tecnológicos y ambientales, el diseño propuesto en este proyecto proporciona una alternativa viable a la cámara anecoica, ofreciendo una alternativa de menor coste, que disminuye el tiempo de medida, ya que las medidas de estas emisiones en la cámara anecoica necesitan mucho tiempo. En el aspecto tecnológico, representa una evolución tecnológica con el uso de nuevos medios tecnológicos para llevar a cabo las tareas de medición de equipos de telecomunicaciones. En el aspecto ambiental y social, el diseño propuesto en este proyecto abarca un aspecto importante, y es que contribuye a la realización de las medidas de los niveles de emisiones espurias radiadas, para controlar que los equipos puedan ser utilizados sin perturbar el entorno en el que trabajan.

Como conclusión final se puede decir que la celda GTEM puede utilizarse como un entorno de medida alternativo a la cámara anecoica para la medida de emisiones espurias radiadas a partir del diseño del procedimiento propuesto en este proyecto. Únicamente en aquellos casos en los que los valores obtenidos estuvieran cerca de los límites se deberían hacer las medidas en otros entornos.

7.- Bibliografía

- [1] IEC 61000-4-20:2010, *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-20: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de emisión y de inmunidad en las guías de onda electromagnéticas transversales (TEM)*.
- [2] *Model 5400 Series. Gigahertz Transverse Electromagnetic (GTEM!) Cell. Operation Manual*, ETS LINDGREN, 2013.
- [3] C. Icheln. (2001). *Methods for measuring RF radiation properties of small antennas*. [Online]. Disponible en: <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512256886/isbn9512256886.pdf>, consultado en abril de 2017.
- [4] O. Sánchez (2000). *Desarrollo de una celda electromagnética transversal*. [Online]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/15450/1/Desarrollo%20de%20una%20celda%20electromagn%C3%83%C2%A9tica%20transversal.pdf>, consultado en marzo de 2017.
- [5] C. Icheln. (1995). *THE CONSTRUCTION AND APPLICATION OF A GTEM CELL*. [Online]. Disponible en: https://www.mikrocontroller.net/attachment/89388/dip_icheln.pdf, consultado en mayo de 2017.
- [6] J. Marques, A.D. Vásquez, et al., (2010). *Diseño de una celda TEM para ensayos de pre-conformidad y pre-certificación de equipos eléctricos y electrónicos*. [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/276205950_Diseño_de_una_celda_TEM_para_ensayos_de_pre-conformidad_y_pre-certificación_de_equipos_eléctricos_y_electrónicos, consultado en marzo de 2017.
- [9] J.E. Castro. (2007). *Estudios de compatibilidad electromagnética de emisión de circuitos integrados sobre célula GTEM*. [Online]. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/50035/fichero/PROYECTO_JECASTRO.pdf, consultado en marzo de 2017.
- [11] C. Icheln. (1999). *Characterisation of RF radiation properties of small equipment*. [Online]. Disponible en: <http://www.temconsulting.com/committees/gtem/Contributions/Characteristics%20of%20RF%20Radiation%20-%20Icheln.pdf>, consultado en abril 2017.
- [12] R. de Leo, T. Rozzi. (1991). *Rigorous Analysis of the GTEM cell*. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 39, no. 3, march 1991 [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=75291>, consultado en abril de 2017.
- [13] A. Nothofer, M. Alexander. (2003). *The use of GTEM cells for EMC measurements*. <https://es.scribd.com/document/119745545/The-Use-of-GTEM-cells-for-EMC-Measurements>, consultado en marzo de 2017.

8.- Referencias

- [1] IEC 61000-4-20:2010, *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-20: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de emisión y de inmunidad en las guías de onda electromagnéticas transversales (TEM)*.
- [2] *Model 5400 Series. Gigahertz Transverse Electromagnetic (GTEM!) Cell. Operation Manual*, ETS LINDGREN, 2013.
- [3] C. IcheIn. (2001). *Methods for measuring RF radiation properties of small antennas*. [Online]. Disponible en: <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512256886/isbn9512256886.pdf>, consultado en abril de 2017.
- [7] S. Ghosh, A. Chakrabarty. (2007). *Prediction of Antenna Factor of Wire Antenna in the GHz Transverse Electromagnetic Cells*. [Online]. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03772063.2007.10876118>, consultado en abril de 2017.
- [8] S. Ghosh, A. Chakrabarty. (2006). *Performance analysis of EMI sensor in different test sites with different wave impedances*. [Online]. Disponible en: <http://www.jpier.org/PIER/pier62/08.0603011.Ghosh.C.pdf>, consultado en mayo de 2017.
- [10] M.L. Crawford. (1974). *Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cell*. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol. emc-16, no. 4, november 1974. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4090850>, consultado en abril de 2017.
- [13] A. Nothofer, M. Alexander. (2003). *The use of GTEM cells for EMC measurements*. <https://es.scribd.com/document/119745545/The-Use-of-GTEM-cells-for-EMC-Measurements>, consultado en marzo de 2017.
- [14] X. Qianzhong, Zhangkunshu, C. Zhiyu. (2003). *Test of Correlation between GTEM Cell and Open Area Test Site Emission Measurements*. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM' 2003 Nov. 47, 2003Hanwhou. China. [Online] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1282398>, consultado en mayo de 2017.
- [15] A. Lee. (1996). *An algorithm for an advanced GTEM to ground plane correlation of radiated emission test*. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=561201>, consultado en mayo de 2017.
- [16] S. Kim, J.Nam, H. Jeon, S. Lee. (1998). *A Correlation Between The Results of the Radiated Emissions Measurements in GTEM and OATS*. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=750363>, consultado en marzo de 2017.
- [17] S. Clay. (1998). *Improving the Correlation between OATS, RF Anechoic Room and GTEM Radiated Emissions Measurements for Directional Radiators at Frequencies between approximately 150 MHz and 10 GHz*. [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=750366>, consultado en marzo de 2017.

I.- Anexo 1. Antena bicónica

SCHWARZBECK MESS - ELEKTRONIK

An der Klinge 29 D-69250 Schönaue Tel.: 06228/1001 Fax.: (49)6228/1003

Kalibrierschein / Calibration Certificate DS0801099114209

Gegenstand der Kalibrierung:
Equipment under Calibration: UBAA 9114 4:1 Balun with
BBUK 9139 Biconical Elements
30-1000 MHz

Hersteller:
Manufacturer: SCHWARZBECK MESS-ELEKTRONIK

Serien-Nr.:
Serial Number: 9114-209

Auftraggeber:
Customer: ROHDE & SCHWARZ Espana S.A.
Spain

Kalibrierverfahren:
Calibration Method: SB AC BA

Messunsicherheit:
Measurement Uncertainty: ± 1.0 dB (Antenna factor and gain data)

Datum der Kalibrierung:
Date of calibration: 9th January 2008

Ausstellungsdatum:
Date of issue: 9th January 2008



Bearbeiter:
Operator:

Dipl.-Ing. Dieter Schwarzbeck
Dieter Schwarzbeck
Daten innerhalb der Spezifikation
Data compliant to specification

Ergebnis der Kalibrierung:
Calibration Results:

Mit diesem Kalibrierschein wird bestätigt, daß der Kalibriergegenstand nach festgelegten Verfahren geprüft und kalibriert wurde. Soweit nicht anders angegeben, liegen die Messwerte mit einer Wahrscheinlichkeit von 95.5% ($k=2$) innerhalb des angegebenen Messunsicherheitsbereichs.

This calibration certificate confirms that the referenced equipment under calibration was measured according to well defined procedures. Unless stated elsewhere, the measurement results are within the specified measurement uncertainty, assuming a confidence interval of 95.5% probability ($k=2$).

Zur Kalibrierung wurden Messmittel oder Normale verwendet, die entweder direkt oder indirekt durch Ableitung physikalischer Grundgrößen unter Berücksichtigung des internationalen Einheitensystems (SI) auf nationale und internationale Normale rückführbar sind. Falls keine nationalen oder internationalen Normale existieren, erfolgte die Rückführung auf Schwarzbeck-Werksnormale.

The test equipment used for calibration purposes is either directly or indirectly traceable to national or international standards, applying worldwide approved techniques and the International System of Units (SI). In cases where no national or international standards exist, the traceability was based on Schwarzbeck laboratory standards.

Die angewandten Verfahren und Methoden bei Kalibrierung und Qualitätssicherung entsprechen den Vorgaben in EN ISO/IEC 17025 bzw. DIN EN ISO 9001.

The procedures and methods applied for calibration and quality management are in accordance with EN ISO/IEC 17025 and DIN EN ISO 9001.

SCHWARZBECK MESS - ELEKTRONIK

An der Klinge 29 D-69250 Schönaue Tel.: 06228/1001 Fax.: (49)6228/1003

Kalibrierschein / Calibration Certificate DS0801099114209

Messmittel:
Measurement Equipment:

Hersteller:
Manufacturer:

Kalibrierung:
Calibrated:

Kalibrierschein Nr.:
Cal. Certificate No.:

Netzwerkanalysator ZVRE

Rohde & Schwarz

2006-04-27

0148 DKD-K-16101 06-04

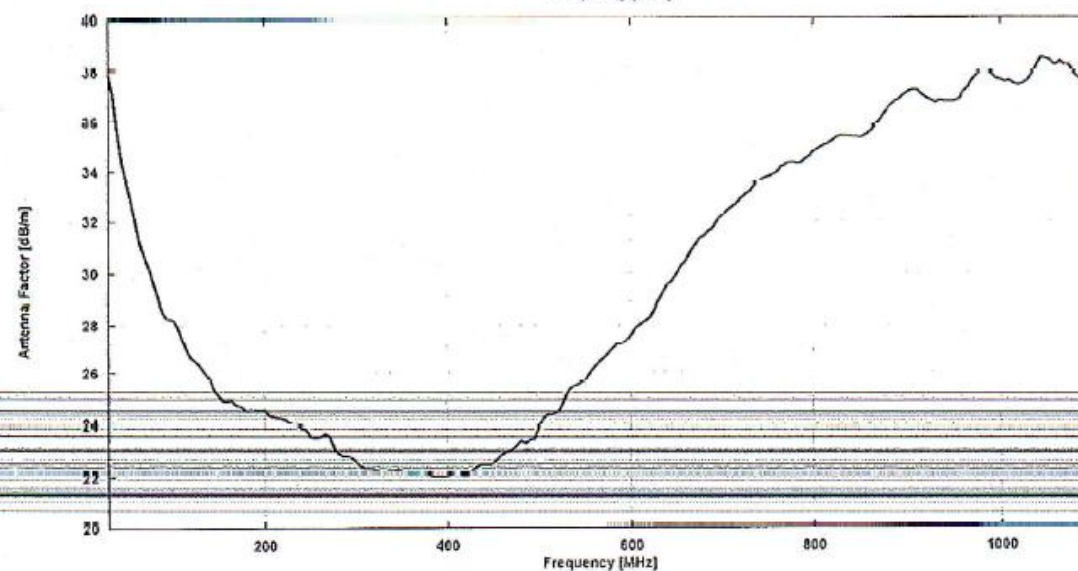
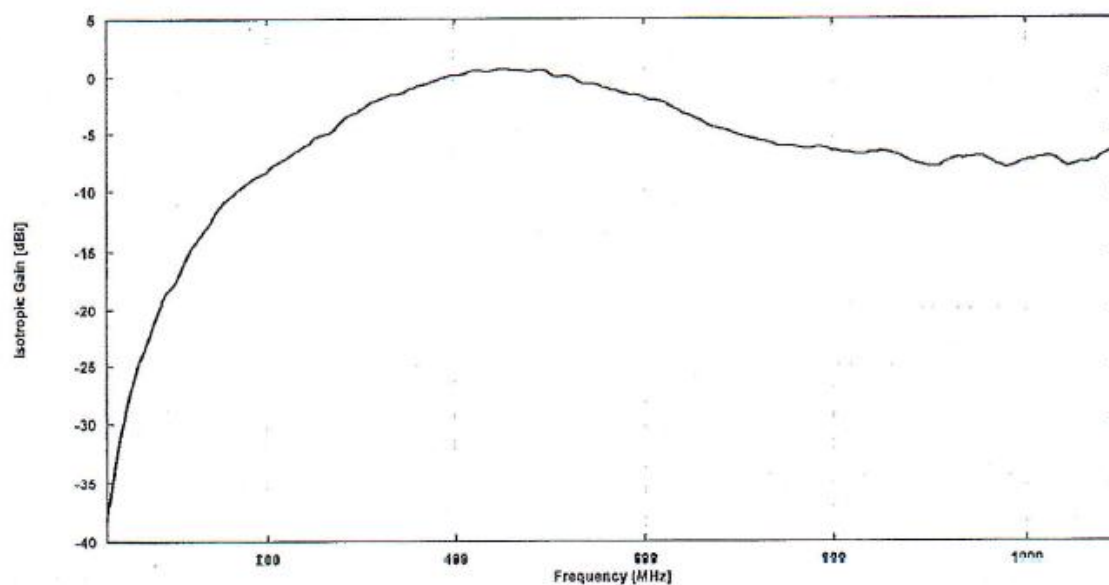
Umgebungsbedingungen:
Environmental Conditions:

Temperatur:
Temperature:
Relative Luftfeuchte:
Relative Humidity:

23° +/- 3° C

20% - 60%

Calibration Distance: 3 m



SCHWARZBECK MESS - ELEKTRONIK

An der Klinge 29 D-69250 Schönau Tel.: 06228/1001 Fax.: (49)6228/1003

Kalibrierschein / Calibration Certificate DS0801099114209

Frequency	Isotropic gain	Antenna factor
[MHz]	[dBi]	[dB/m]
30.00	-38.14	37.90
35.00	-35.94	37.04
40.00	-33.31	35.57
45.00	-31.12	34.40
50.00	-29.41	33.61
55.00	-27.84	32.87
60.00	-26.26	32.04
65.00	-24.73	31.21
70.00	-23.43	30.55
75.00	-22.42	30.14
80.00	-21.26	29.54
85.00	-20.12	28.93
90.00	-19.15	28.45
95.00	-18.49	28.26
100.00	-17.98	28.20
105.00	-17.28	27.92
110.00	-16.38	27.43
115.00	-15.50	26.93
120.00	-14.80	26.60
125.00	-14.30	26.46
130.00	-13.81	26.31
135.00	-13.21	26.04
140.00	-12.59	25.73
145.00	-11.86	25.31
150.00	-11.33	25.07
155.00	-10.84	24.87
160.00	-10.57	24.87
165.00	-10.27	24.84
170.00	-9.88	24.71
175.00	-9.55	24.63
180.00	-9.16	24.49
185.00	-8.92	24.48
190.00	-8.72	24.52
195.00	-8.50	24.52
200.00	-8.27	24.51
205.00	-7.85	24.31
210.00	-7.58	24.24
215.00	-7.32	24.19
220.00	-7.10	24.17
225.00	-6.83	24.09
230.00	-6.53	23.98
235.00	-6.34	23.98
240.00	-6.05	23.87
245.00	-5.80	23.80
250.00	-5.37	23.55
255.00	-5.17	23.52
260.00	-5.05	23.57
265.00	-4.98	23.66
270.00	-4.69	23.54
275.00	-4.18	23.19
280.00	-3.75	22.91
285.00	-3.48	22.80
290.00	-3.34	22.81
295.00	-3.11	22.73

Frequency	Isotropic gain	Antenna factor
[MHz]	[dBi]	[dB/m]
300.00	-2.79	22.55
305.00	-2.49	22.40
310.00	-2.27	22.32
315.00	-2.16	22.35
320.00	-1.96	22.28
325.00	-1.77	22.23
330.00	-1.56	22.15
335.00	-1.52	22.24
340.00	-1.40	22.25
345.00	-1.33	22.31
350.00	-1.08	22.18
355.00	-0.95	22.17
360.00	-0.77	22.12
365.00	-0.66	22.13
370.00	-0.57	22.15
375.00	-0.41	22.11
380.00	-0.25	22.07
385.00	-0.05	21.98
390.00	0.05	21.99
395.00	0.19	21.96
400.00	0.23	22.03
405.00	0.25	22.12
410.00	0.33	22.15
415.00	0.49	22.09
420.00	0.63	22.05
425.00	0.60	22.19
430.00	0.55	22.34
435.00	0.53	22.46
440.00	0.63	22.46
445.00	0.71	22.48
450.00	0.72	22.56
455.00	0.66	22.72
460.00	0.62	22.86
465.00	0.61	22.96
470.00	0.61	23.05
475.00	0.56	23.19
480.00	0.48	23.36
485.00	0.63	23.30
490.00	0.62	23.40
495.00	0.64	23.47
500.00	0.30	23.90
505.00	0.11	24.18
510.00	0.02	24.35
515.00	0.11	24.35
520.00	0.11	24.43
525.00	-0.08	24.70
530.00	-0.41	25.12
535.00	-0.59	25.38
540.00	-0.59	25.46
545.00	-0.59	25.54
550.00	-0.67	25.70
555.00	-0.89	26.00
560.00	-1.01	26.19
565.00	-1.16	26.42

SCHWARZBECK MESS - ELEKTRONIK

An der Klinge 29 D-69250 Schönau Tel.: 06228/1001 Fax.: (49)6228/1003

Kalibrierschein / Calibration Certificate DS08010⁰⁰114209

Frequency	Isotropic gain	Antenna factor
[MHz]	[dBi]	[dB/m]
570.00	-1.20	26.54
575.00	-1.38	26.79
580.00	-1.48	26.97
585.00	-1.59	27.15
590.00	-1.57	27.21
595.00	-1.66	27.37
600.00	-1.80	27.58
605.00	-1.99	27.85
610.00	-2.08	28.01
615.00	-2.12	28.12
620.00	-2.22	28.29
625.00	-2.37	28.51
630.00	-2.74	28.95
635.00	-2.97	29.25
640.00	-3.24	29.58
645.00	-3.30	29.71
650.00	-3.47	29.95
655.00	-3.70	30.24
660.00	-3.91	30.52
665.00	-4.18	30.86
670.00	-4.33	31.07
675.00	-4.52	31.33
680.00	-4.54	31.41
685.00	-4.67	31.60
690.00	-4.72	31.72
695.00	-4.99	32.05
700.00	-5.14	32.26
705.00	-5.29	32.47
710.00	-5.36	32.61
715.00	-5.43	32.74
720.00	-5.57	32.94
725.00	-5.66	33.09
730.00	-5.77	33.26
735.00	-5.89	33.44
740.00	-6.00	33.60
745.00	-6.07	33.73
750.00	-6.07	33.79
755.00	-6.08	33.86
760.00	-6.11	33.95
765.00	-6.29	34.18
770.00	-6.37	34.32
775.00	-6.36	34.37
780.00	-6.25	34.31
785.00	-6.18	34.30
790.00	-6.29	34.46
795.00	-6.32	34.55
800.00	-6.49	34.77
805.00	-6.52	34.86
810.00	-6.61	35.00
815.00	-6.64	35.08
820.00	-6.71	35.21
825.00	-6.80	35.35
830.00	-6.83	35.43
835.00	-6.80	35.45
840.00	-6.67	35.38

Frequency	Isotropic gain	Antenna factor
[MHz]	[dBi]	[dB/m]
845.00	-6.62	35.38
850.00	-6.55	35.36
855.00	-6.63	35.49
860.00	-6.72	35.63
865.00	-6.87	35.83
870.00	-7.05	36.06
875.00	-7.25	36.31
880.00	-7.44	36.55
885.00	-7.65	36.81
890.00	-7.69	36.90
895.00	-7.81	37.07
900.00	-7.89	37.19
905.00	-7.91	37.26
910.00	-7.89	37.29
915.00	-7.64	37.09
920.00	-7.45	36.95
925.00	-7.28	36.82
930.00	-7.16	36.75
935.00	-7.19	36.83
940.00	-7.12	36.80
945.00	-7.07	36.80
950.00	-7.03	36.80
955.00	-7.04	36.86
960.00	-7.26	37.13
965.00	-7.45	37.36
970.00	-7.70	37.66
975.00	-7.85	37.85
980.00	-7.97	38.01
985.00	-7.92	38.01
990.00	-7.78	37.91
995.00	-7.54	37.72
1000.00	-7.42	37.64
1005.00	-7.31	37.57
1010.00	-7.29	37.60
1015.00	-7.14	37.49
1020.00	-7.07	37.46
1025.00	-7.03	37.46
1030.00	-7.15	37.63
1035.00	-7.38	37.90
1040.00	-7.69	38.25
1045.00	-7.94	38.54
1050.00	-7.85	38.49
1055.00	-7.71	38.40
1060.00	-7.50	38.23
1065.00	-7.58	38.35
1070.00	-7.44	38.25
1075.00	-7.38	38.23
1080.00	-7.01	37.90
1085.00	-6.82	37.75
1090.00	-6.64	37.61
1095.00	-6.63	37.64
1100.00	-6.66	37.71

II.- Anexo 2. Celda GTEM

Physical Specifications

	Model 5402	Model 5405	Model 5407	Model 5411
Outer Cell Dimension (LxWxH):	L: 1.4 m (4.7 ft) W: 0.75 m (2.5 ft) H: 0.5 m (1.7 ft)	With base: L: 3.0 m (9.8 ft.) W: 1.6 m (5.2 ft) H: 1.7 m (5.6 ft) Without base: L: 3.0 m (9.8 ft.) W: 1.6 m (5.2 ft) H: 1.1 m (3.7 ft)	With base: L: 4.0 m (13.1 ft) W: 2.2 m (7.1 ft) H: 2.1 m (6.8 ft) Without base: L: 4.0 m (13.1 ft) W: 2.2 m (7.1 ft) H: 1.4 m (4.6 ft)	With base: L: 5.4 m (17.7 ft) W: 2.8 m (9.2 ft) H: 2.3 (7.5 ft)
Approx Cell Weight:	40 kg (88 lb)	250 kg (550 lb)	500 kg (1100 lb)	900 kg (2000 lb)
Door Dimension (WxH):	W: 160 mm (6.3 in) H: 230 mm (3.9 in)	W: 460 mm (18.1 in) H: 385 mm (15.2 in)	W: 686 mm (27.0 in) H: 747 mm (29.4 in)	W: 686 mm (27.0 in) H: 925 mm (36.4 in)
Max Septum Height:	250 mm (9.8 in)	500 mm (19.7 in)	750 mm (29.5 in)	1100 mm (43.3 in)
Highest Accuracy Transverse Test Surface in Center of Cell (WxH):	W: 76.2 mm (3 in) H: 76.2 mm (3 in)	W: 300 mm (11.1 in) H: 300 mm (11.1 in)	W: 400 mm (15.8 in) H: 400 mm (15.8 in)	W: 550 mm (21.5 in) H: 366 mm (14.3 in)
Distributed Load Rating:	N/A	250 kg (550 lb)	430 kg (950 lb)	750 kg (1650 lb)

Electrical Specifications



Characteristic frequency: Resistor absorber crossover frequency.

	Model 5402	Model 5405	Model 5407	Model 5411
Frequency Range:	RE TESTS ¹ 9 kHz–5 GHz	RE TESTS ¹ 9 kHz–5 GHz	RE TESTS ¹ 9 kHz–5 GHz	RE TESTS ¹ 9 kHz–5 GHz
	RI TESTS DC – 20 GHz	RI TESTS ² DC – 20 GHz	RI TESTS ² DC – 20 GHz	RI TESTS ² DC – 20 GHz
VSWR (Typical):	Characteristic frequency: ≤1.75:1	Characteristic frequency: ≤1.75:1	Characteristic frequency: ≤1.75:1	Characteristic frequency: ≤1.75:1
	All other frequencies: ≤1.50:1	All other frequencies: ≤1.50:1	All other frequencies: ≤1.50:1	All other frequencies: ≤1.50:1
Maximum CW Input Power:	100 W	250 W 400 W with optional blower	200 W 500 W with optional blower	1000 W
Input Impedance:	50 Ω	50 Ω	50 Ω	50 Ω
Feed Connector Type:	CW 7/16 DIN plug to N jack adaptor	CW 7/16 DIN plug to N jack adaptor	CW 7/16 DIN plug to N jack adaptor	CW 7/16 DIN plug to N jack adaptor
Shielding Effectiveness:	From internal E-fields: 80 dB minimum 10 kHz–1 GHz	From internal E-fields: 80 dB minimum 10 kHz–1 GHz	From internal E-fields: 80 dB minimum 10 kHz–1 GHz	From internal E-fields: 80 dB minimum 10 kHz–1 GHz

¹ Frequency range where OATS correlation demonstrated² Low VSWR to $f \geq 20$ GHz; performance dependent on field uniformity tolerance