

Caracterización y validación de una celda para modos de ondas electromagnéticas transversales en Gigahertz

Alejandro Reckziegel¹, Dr. Diego H. Stalder², Dr. Hyun Ho Shin³, Dr. Juan Carlos Cabral³, Ing. Blas Vega³

¹Alumno, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

²Orientador, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

³Orientador, Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

Palabras clave:

- GTEM
- Simulación
- Compatibilidad Electromagnética
- Caracterización

Resumen

Las Celdas Electromagnéticas Transversales de Gigahertz (GTEM) son instrumentos utilizados en el campo de la electrónica para realizar pruebas de compatibilidad electromagnética, necesarias para verificar que los equipos electrónicos son inmunes a perturbaciones externas y no producen señales que perturben a otros equipos. En el Laboratorio de Mecánica y Energía de FIUNA se construyó una celda GTEM. En este trabajo se calcula la impedancia característica de la celda mediante simulaciones con el software comercial COMSOL Multiphysics y el software de código abierto Fenics, a partir de una simulación 2D. También se realiza una simulación en 3D para obtener la respuesta en frecuencia teórica y la pérdida de retorno. Finalmente se realizaron comparaciones experimentales con mediciones reales para definir los ajustes necesarios para tener una simulación más precisa y lograr una buena respuesta en frecuencia de la celda.

Keywords

- GTEM
- Simulation
- Electromagnetic Compatibility
- Characterization

Abstract

Giga-hertz Transverse Electromagnetic (GTEM) Cells are instruments used in the field of electronics for the purpose of performing electromagnetic compatibility tests, which are necessary in order to verify that electronic equipment is immune to external disturbances and does not produce signals that disturb other equipment. A GTEM cell was built in the Laboratotio de Mecanica y Energia at FIUNA. In this work the characteristic impedance of the cell will be validated with the COMSOL Multiphysics commercial software package and the open source Fenics software through 2D simulation. Then the S_{11} and VSWR of the cell will also be validated by 3D simulation, and the results will then be compared to real measurements.

1. Introducción

La compatibilidad electromagnética (EMC, del inglés Electromagnetic Compatibility) es la capacidad de un equipo o sistema electrónico de no causar interferencias electromagnéticas a otros equipos (EMI, del inglés Electromagnetic interference) y al mismo tiempo no ser susceptible a las emisiones electromagnéticas que puedan causarle otros sistemas (EMS, del inglés Electromagnetic susceptibility)[1].

En el mercado internacional pasar por pruebas EMC es un requisito necesario para productos desde relojes digitales a satélites. Estas pruebas son

de alto costo debido a que las mismas deben realizarse en instalaciones aisladas de toda interferencia electromagnética externa al equipo. Para realizar estas pruebas entre las opciones disponibles están los OATS (Open Air Testing Site, Sitios de prueba abierta), las cámaras anecoicas y las celdas GTEM (Gigahertz Transverse ElectroMagnetic, Ondas Electromagnéticas transversales en Gigahertz)[2].

La celda es una línea de transmisión expandida operada en el modo TEM y terminada con un material capaz de absorber ondas electromagnéticas. Este sistema de ensayo implica una inversión más moderada que los ensayos en cámara, siempre y cuando el

recinto se ajuste a los requisitos de la celda. El GTEM permitirá realizar pruebas de compatibilidad electromagnética. Estas pruebas son de suma importancia para promover el desarrollo tecnológico local, ya que permitiría a los equipos electrónicos fabricados en el país cumplir estándares internacionales y conquistar nuevos mercados.

Durante la pandemia de COVID-19 se ha iniciado la construcción de una celda GTEM para realizar ensayos de pre-compatibilidad electromagnética de los prototipos de ventiladores mecánicos desarrollados en el país. Sin embargo, como es un diseño nuevo la uniformidad del campo electromagnético generado debe ser evaluado de tal forma a verificar si cumple con los requisitos establecidos en las normas internacionales.

En este trabajo se calcula la impedancia característica de una celda GTEM, valor dependiente de sus dimensiones[3], por el método de elementos finitos utilizando dos herramientas computacionales, el paquete de software COMSOL Multiphysics y el software Fenics de código abierto. Luego se evalúan las características de la celda y la uniformidad de campo por medio de simulaciones en 3D de la misma. El resultado del Trabajo Final de Grado será de gran utilidad para futuros estudiantes e ingenieros paraguayos que busquen certificar el funcionamiento correcto de productos.

2. Trabajos relacionados

2.1. Characterization of an Open GTEM Cell with the COMSOL Multiphysics Software

En este trabajo, parte de la conferencia COMSOL 2018 en Lausana, Suiza se analiza el comportamiento electromagnético de una celda GTEM abierta existente a diferentes frecuencias de funcionamiento con la ayuda de COMSOL Multiphysics. Se identifica la región interna de la celda donde el campo es más puramente TEM. Además, los valores experimentales obtenidos con el GTEM real se han comparado con los resultados simulados [4]

2.2. The construction and application of a GTEM cell

En este trabajo se describen la teoría, el diseño y la construcción de una celda GTEM de 2,2 m de longitud. Se presta especial atención al diseño del ápice y la sección de terminación. Como aplicación se evalúa el diagrama de radiación de una pequeña antena mediante la celda GTEM y se comparan los resultados con los obtenidos en una sala anecoica[3].

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Caracterizar una celda para modos de ondas electromagnéticas transversales en Gigahertz (GTEM) mediante simulaciones numéricas y mediciones experimentales.

3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo computacional de la celda GTEM para estudiar su distribución de carga y la respuesta en frecuencia.
- Simular la distribución de carga de un corte transversal del interior del GTEM para estimar su impedancia a partir de sus parámetros estructurales.
- Utilizando un software de modelado electromagnético, realizar simulaciones 3D para predecir posibles armónicos y reflexiones.
- Comparar los resultados obtenidos con mediciones reales de respuesta en frecuencia e impedancia.

4. Marco Teórico

4.1. Compatibilidad Electromagnética

La compatibilidad electromagnética (CEM) es la capacidad de los equipos y sistemas electrónicos y eléctricos para funcionar como se espera en el entorno electromagnético (EM) previsto, esta es una medida importante en los dispositivos electrónicos. La CEM esta compuesta por 2 fenómenos: la interferencia y la susceptibilidad electromagnéticas[1].

- La interferencia electromagnética (EMI) es la perturbación producida por los equipos en un determinado entorno.
- La susceptibilidad electromagnética (EMS) es la capacidad de un equipo de soportar las perturbaciones electromagnéticas producidas en su entorno.

4.2. Instalaciones para pruebas de compatibilidad electromagnética

Las pruebas de compatibilidad electromagnética son de alto costo debido a que la misma debe realizarse en instalaciones aisladas de toda interferencia electromagnética externa al equipo. Para realizar estas pruebas entre las opciones de instalaciones disponibles están los sitios de prueba al aire libre (Open Air Testing Site, OATS), las cámaras anecoicas y las celdas GTEM, por sus siglas en inglés Gigahertz Transverse ElectroMagnetic.

4.2.1. Celda GTEM

El principio de funcionamiento de la celda GTEM se basa en la generación de un campo electromagnético uniforme dentro de un entorno protegido de interferencias externas, se logra esto al expandir una línea de transmisión operada en el modo TEM. Introducida en 1987 como una combinación de cámara anecoica y celda TEM, supero algunas limitaciones de ambos métodos de prueba de compatibilidad electromagnética. La celda esta compuesta por un carcasa externa conectada a tierra, un conductor central terminado en una carga resistiva y una arreglo de pirámides de espuma de poliuretano dopado con ferrita en la parte posterior.

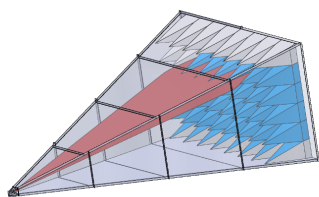


Figura 1: Vista isométrica de la celda GTEM. **Fuente:** Laboratorio de Mecánica y Energía.

El modo de propagación dentro de la celda es TEM, pero debido a la pequeña abertura en la entrada de la celda las ondas son ligeramente esféricas, en el volumen principal, donde esta ubicado el dispositivo a probar, las ondas cambian a ondas planas, en general la intensidad del campo es constante en esta región, a menos que el dispositivo altere el campo, con posibles componentes conductivos o dieléctricos que luego se pueden medir. Gracias al arreglo de espuma absorbente y la carga resistiva colocados en la parte posterior de la celda se consigue un bajo nivel de reflexiones, esto resulta beneficioso a la hora de realizar pruebas de compatibilidad electromagnética. Para la realización de las pruebas de compatibilidad los dispositivos a ser probados se colocan dentro de un volumen de prueba. Este volumen en general comienza a un tercio de la distancia entre la base de la celda y el conductor central, el cual se encuentra desplazado verticalmente del medio de la celda. Se construye la celda de tal forma que su geometría logre una impedancia característica que coincida con la del conector, esto se hace para evitar reflexiones y pérdida de potencia a la hora de realizar pruebas de compatibilidad. El estándar IEC 61000-4-20 cubre pruebas y mediciones de EMC y técnicas de medición con guías de ondas TEM, como celdas TEM y GTEM[5]. Por las particularidades de la geometría no existen ecuaciones para calcular directamente las características de la misma (VSWR, reflexión, impedancia característica), por lo que se recurre a métodos numéricos como el Método de los elementos finitos.

4.2.2. Ventajas de la celda GTEM

Las celdas GTEM poseen distintas ventajas sobre los métodos para realizar pruebas de compatibilidad expuestos, por ejemplo:

- No hay necesidad de un gran espacio abierto y libre de interferencias, o la construcción de una habitación especializada, se puede instalar en una habitación con suficiente espacio.
- Las celdas GTEM están aisladas de interferencia ambiental.
- El costo de materiales y fabricación es menor en comparación con una cámara anecoica.
- No es necesario cambiar de antena para realizar pruebas a distintas frecuencias

Pero la celda presenta la desventaja que el tamaño del dispositivo bajo prueba se encuentra limitado a un tamaño de un tercio de la altura entre el conductor central y el piso [3, 2].

5. Método de los elementos finitos

El Método de los elementos finitos (MEF) es un método utilizado en ingeniería para aproximar la solución de ecuaciones diferenciales. Una vez conocidas las ecuaciones para describir un fenómeno físico y sus condiciones iniciales y de contorno es sencillo adaptar este método a un ambiente computacional[6]. La aplicación del MEF a un problema físico tiene las siguientes características:

- Se divide la geometría del problema en una cantidad finita de elementos definidos por parámetros. Estos elementos están unidos entre si por medio de nodos, cuyas características definen el elemento. La unión de todos estos elementos discretos forman la "malla" de la geometría.
- Las incógnitas del problema se aproximan dentro de cada elemento a partir de los valores obtenidos en los nodos.

Para la aplicación del MEF en un problema real se pueden seguir varias metodologías, pero en general se siguen los siguientes pasos:

- Definir el problema, identificar la Ecuación Diferencial Parcial (EDP) y sus condiciones de contorno.
- Reformular el problema de la EDP como un problema variacional.
- Resolver el problema variacional
- Calcular cantidades derivadas y graficar resultados (post-procesamiento).

De una forma u otra estos pasos se siguen en la mayoría de los casos de aplicación del MEF

5.1. Herramientas Computacionales

5.1.1. FEniCS Ptoject

FEniCS Project es una plataforma informática de código abierto creada en 2003, principalmente utilizada en el sistema operativo Linux, que tiene como funcionalidad principal la resolución de EDPs. Como utiliza interfaces en Python y C++ es fácil de implementar y ofrece opciones avanzadas a usuarios más experimentados. La plataforma es utilizada principalmente en conjunción con el sistema operativo Linux, por lo que es posible ejecutarla en equipos como notebooks e inclusive clusters de alto rendimiento [7].

5.1.2. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un software interactivo utilizado para modelar y resolver todo tipo de problemas físicos. Es posible ampliar los modelos utilizados en un tipo de física y aplicarlo a otro tipo y luego ejecutarlos a la vez para obtener resultados finales combinados. Utilizando las interfaces de física incorporadas y el soporte avanzado para las propiedades de los materiales, es posible construir modelos definiendo las características físicas específicas del modelo. COMSOL es capaz de someter los modelos creados a una gran variedad de estudios. Para la resolución de modelos en COMSOL, se utiliza el método de elementos finitos [8].

6. Modelado de un corte transversal de la celda

En este capítulo se calculará la impedancia característica de un corte transversal de la celda GTEM, valor dependiente de sus dimensiones, por el método de elementos finitos, utilizando dos herramientas computacionales, el paquete de software COMSOL Multiphysics y el software de código abierto FEniCS. Tras realizar simulaciones con mallas de diferente refinamiento, se comparan los resultados de impedancia característica obtenidos. Se espera un valor de 50 Ω de impedancia característica para asegurar el correcto acoplamiento con la línea de transmisión de energía [3]. En la Figura 2 se observa la geometría de un corte transversal de la celda

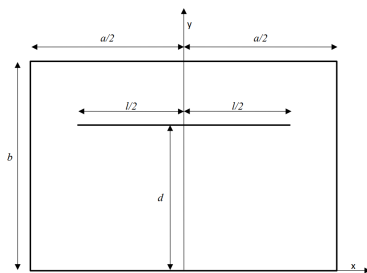


Figura 2: Geometría de la celda GTEM. Fuente: Propia.

6.1. Cálculo de impedancia característica

Para calcular la impedancia característica de la celda GTEM, el campo electrostático es modelado por la ecuación de Poisson y se resuelve utilizando el método de elementos finitos. Los cálculos se realizan sobre mallas con diferentes refinamientos utilizando tanto COMSOL como FEniCS, y luego se comparan los resultados obtenidos. La ecuación de Poisson para el campo electrostático se expresa como:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad \text{en } \Omega \setminus (\partial\Omega \cup C), \quad (1)$$

donde $\Phi : \Omega \rightarrow R$ es el potencial eléctrico dentro de la celda, y el dominio de la celda es $\Omega = [-a/2, a/2] \times [0, b]$, donde $a = 2,19$ m y $b = 1,49$ m, estos valores representan los valores constructivos de un prototipo, siendo construido en la Universidad Nacional de Asunción. Además, las relaciones a/b y d/l influyen en las características de la celda. En la frontera del dominio, $\partial\Omega$, se imponen condiciones homogéneas, i.e., $\Phi(\partial\Omega) = 0$ V, y en el conductor central, C , que se encuentra a $d = 1,04$ m del límite inferior con la longitud $l = 1,53$ m, se le impone $\Phi(C) = 25$ V.

A partir del potencial eléctrico Φ , el campo eléctrico \vec{E} se calcula mediante

$$\nabla \Phi = -\vec{E}. \quad (2)$$

Entonces obtenemos el campo magnético \vec{H} por

$$\vec{H}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{Z_{TEM}}} \hat{k} \times \vec{E}(x, y), \quad (3)$$

donde $Z_{TEM} = 377 \Omega$ es la impedancia del espacio libre. Luego se calcula el vector de Poynting que es en esencia la densidad de potencia, que se puede definir como [9]:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{H}, \quad (4)$$

donde μ es la permeabilidad del medio por el que pasa la radiación, en este caso el aire, por lo que $\mu = 1$. Este vector tiene la dirección de \hat{k} componente donde se transmiten las ondas en modo TEM.

La potencia máxima (P_{max}) que fluye a través del GTEM se obtiene mediante la integral de superficie:

$$P_{max} = \int_{\Omega} \vec{S} \cdot \hat{k} ds. \quad (5)$$

Luego se calcula la impedancia característica aplicando la Ley de Ohm:

$$Z_o = \frac{V^2}{P_{max}}. \quad (6)$$

6.2. Prueba paramétrica

Para obtener las relaciones a/b y d/l adecuadas y lograr una impedancia característica de 50 Ω se realizó una prueba paramétrica en el programa COMSOL,

variando los valores de las relaciones se realizaron los cálculos de impedancia característica. Los resultados obtenidos se observan en el siguiente gráfico.

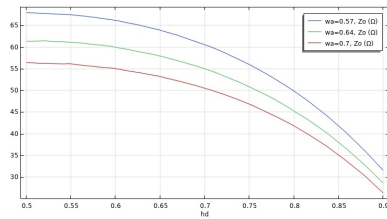


Figura 3: Prueba Paramétrica. **Fuente:** Resultado de Simulación.

Luego de esta prueba se tomaron los valores de $a/b = 0,7$ y $d/l = 0,7$ para las siguientes pruebas.

6.3. Comparación entre métodos

Luego, se estimó la impedancia característica utilizando COMSOL y Fenics. En el caso de Fenics, la ecuación (1) se resuelve usando elemento triangular con polinomio de interpolación de segundo orden, y solver lineal UMFPACK[7]. Los resultados obtenidos se observan en la siguiente tabla:

Tabla 1: Resultados de la comparación.

Elementos	Área x elemento[m ²]	Resultado en COMSOL[Ω]	Resultado en Fenics[Ω]
3100	0.0010526	50.0531029	50.0440244
6400	0.0005098	50.1323180	50.1394491
12400	0.0002631	50.1882589	50.1912878
24900	0.0001310	50.2298363	50.2323996
48800	0.0000668	50.2583535	50.2546213

Fuente: Resultado de Simulación.

La Figura 4 (izquierda) muestra los resultados, obtenidos en FENICS, para el potencial eléctrico Φ sobre la geometría analizada. La Figura 4 (derecha) muestra el porcentaje de error sobre la impedancia característica obtenido en función del tamaño del elemento, usando como referencia la mejor simulación de COMSOL, que se obtuvo en la configuración pre-determinada usando una malla con 48000 elementos.

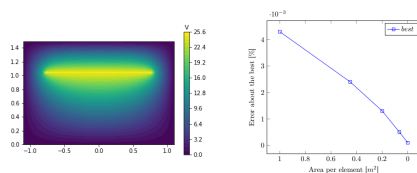


Figura 4: (izq.) Resultados de la simulación del Potencial Eléctrico. (der.) Resultados de la comparación. **Fuente:** Resultado de Simulación.

Estos resultados son los primeros pasos para realizar una simulación 3d del prototipo y caracterizar la respuesta de frecuencia del GTEM.

7. Simulación del Campo Electromagnético y caracterización de la celda en COMSOL

7.1. Workflow en COMSOL

Como COMSOL utiliza el MEF, posee de las herramientas necesarias para definir problemas físicos, la geometría sobre la cual se deben resolver estos y también ofrece la posibilidad de realizar un análisis sobre los resultados obtenidos. Para trabajar en COMSOL se sigue el siguiente orden de operaciones [8]:

- Si es necesario se definen características que puedan afectar a todo el modelo.
- Luego se crea un componente del modelo, contiene la geometría del componente con su interfaz física asociada, también incluye las mallas generadas.
- Después se definen los estudios a los que se van a someter los componentes, estos dependen de las interfaces físicas seleccionadas
- Luego de que se realizan los estudios se puede realizar un análisis de los resultados obtenidos, crear gráficos, tablas y exportar los resultados para su procesamiento en otros programas.

El objetivo de esta simulación es obtener la distribución de campo eléctrico en el GTEM a distintas frecuencias y a partir de estos resultados obtener gráficos de la misma y mediciones de valores como el VSWR y S_{11} .

7.2. Componente

7.2.1. Geometría

La geometría generada se creo con base en las medidas del GTEM construido en el Laboratorio de Mecánica y Energía. La geometría puede ser separada en 4 partes principales: La carcasa externa, el septum, el arreglo de pirámides de espuma absorbente y un volumen de prueba, que sera de utilidad a la hora de obtener resultados.

7.2.2. Carcasa

En la siguiente tabla se tienen las medidas de la carcasa que tiene forma de pirámide truncada.

Tabla 2: Medidas de la Carcasa

Parte	Medida [m]
Altura	3,76
Largo base inferior	2,25
Ancho base inferior	1,55
Largo base superior	0,13
Ancho base superior	0,09

Fuente: Elaboración propia.

7.2.3. Arreglo Piramidal

Estas pirámides de espuma fueron ordenadas en un arreglo de 8 x 6 y fueron colocadas en una base del mismo material al fondo del GTEM. Las medidas son de acuerdo a las especificaciones del fabricante y se ven en la tabla 3.

Tabla 3: Medidas del arreglo de material absorbente

Parte	Medida [m]
Altura de la pirámide	0,6
Lado de la base de la pirámide	0,25
Grosor de la base	0.1
Largo de la base	2
Ancho de la base	1.5

Fuente: Elaboración propia.

7.2.4. Septum y arreglo resistivo

El arreglo resistivo va conectado entre los dientes del septum y la tapa posterior del GTEM. La inclinación del septum respecto a la base es de 14,649°. En la Tabla 4 se observan las medidas de esta parte.

Tabla 4: Medidas del septum y arreglo resistivo

Parte	Medida [m]
Largo del septum	3,67
Largo de los dientes	0,60
Base menor del septum	0,088
Base mayor del septum	1,25
Base del diente	0,25
Ancho del arreglo resistivo	1
Grosor del arreglo resistivo	0.1

Fuente: Elaboración propia.

7.2.5. Volumen de Prueba

El volumen de prueba dentro del GTEM esta colocado a una distancia de 2.5[m] de la entrada al mismo. En la tabla 5 se observan las medidas del mismo.

Tabla 5: Medidas del volumen de prueba

Parte	Medida [m]
Largo	0,75
Ancho	0,467
Alto	0,194
Distancia a la base	0,194

Fuente: Elaboración propia.

7.3. Materiales

Las características del material mas relevantes para los estudios a ser realizados mas adelante serian la permitividad relativa μ_o , la permeabilidad relativa ϵ_o

y la conductividad σ . Las características de los materiales por partes del modelo se ven en la siguiente tabla:

Tabla 6: Materiales del modelo

Parte	μ_o	ϵ_o	σ [S/m]
Arreglo absorbente	1	1	0,5
Arreglo resistivo	1	1	0.2
Septum	PEC	PEC	PEC
Carcasa	PEC	PEC	PEC
Volumen interno	1	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Definir la conductividad del arreglo absorbente en 0, 5[S/m] tiene la finalidad de simular las capacidades absorbentes de ondas electromagnéticas de la espuma con ferrita [10]. El arreglo resistivo tiene una conductividad de 0, 2[S/m] para simular el arreglo resistivo con la finalidad de obtener la impedancia esperada de 50 Ω [4]. En el caso del septum y la carcasa se impuso una condición de conductor eléctrico perfecto (PEC), para simplificar la simulación. El volumen interno tiene las características eléctricas del aire.

7.4. Malla

Para la generación de la malla sobre la cual sera aplicada el MEF se impuso la condición a los elementos de la misma de que estos no superen un tamaño mayor a $\lambda/5$ [4].

8. Estudios Realizados

Todas las pruebas realizadas se realizaron en un rango de frecuencias de 50[Mhz] a 1[GHz], siendo 50[MHz] la frecuencia mínima a la que se espera operar el GTEM. En la primera prueba se obtienen gráficos de la intensidad de campo eléctrico en 3D en la Figura 5 y además en cortes transversales a distintas distancias de la entrada en la Figura 6, así como también la dirección del campo eléctrico y magnético.

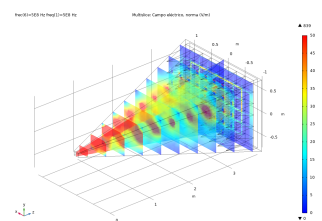


Figura 5: Campo eléctrico en 3D a 500 MHz. **Fuente:** Resultado de Simulación.

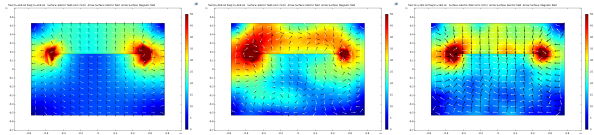


Figura 6: Campo eléctrico y dirección de \vec{E} y \vec{H} a 100[MHz](izq.), 500[MHz](centro) y 1[GHz](der.), a una distancia de 2[m] (arriba) y 3[m] (abajo) de la entrada. **Fuente:** Propia.

Para visualizar como cambia la intensidad de campo en función de la frecuencia se agregan gráficos de intensidad de campo a lo largo del volumen de prueba a distintas frecuencias en la Figura 7 e intensidad de campo eléctrico en el centro del volumen de prueba a distintas frecuencias en la Figura 8, en donde se observa que el campo se estabiliza alrededor de 16[V/m]

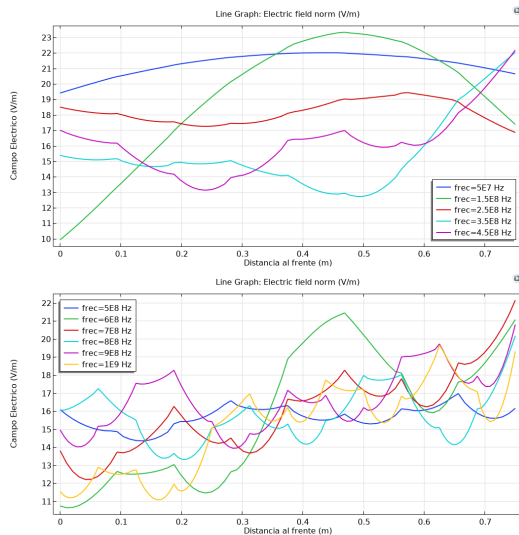


Figura 7: Campo eléctrico a lo largo del volumen de prueba, de 50[MHz] a 450[MHz] (izq.) y 500[MHz] a 1000[MHz] (der.). **Fuente:** Resultado de Simulación.

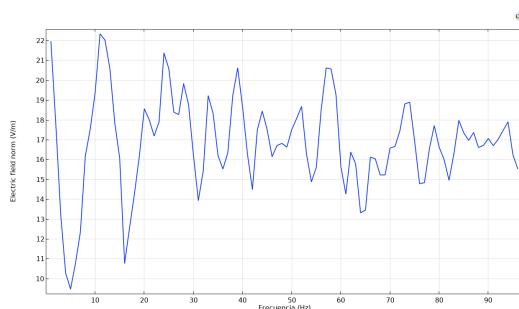


Figura 8: Campo eléctrico en el centro del volumen de prueba. **Fuente:** Resultado de Simulación.

Se realiza un barrido de frecuencias de 50[MHz] a 1[GHz] con un salto de 1[MHz] entre valores, A partir de los resultados obtenidos en estas pruebas se

hicieron los siguientes gráficos de S_{11} (Figura 9) y de VSWR (Figura 10). En el caso del valor de S_{11} en el rango de 50[MHz] a 200[MHz] se tiene que es relativamente alto, pero una vez se llega a los 200[MHz] disminuye, llegando a estabilizarse alrededor de los -25[dB]. Este comportamiento se refleja en la VSWR, que tiene un valor elevado que disminuye a los 200 [MHz] y se estabiliza un poco por encima de 1. Ambos valores son adecuados para asegurar una buena transferencia de potencia a la hora de alimentar la celda.

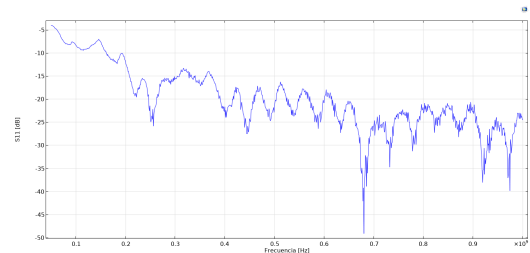


Figura 9: S_{11} . **Fuente:** Resultado de Simulación.

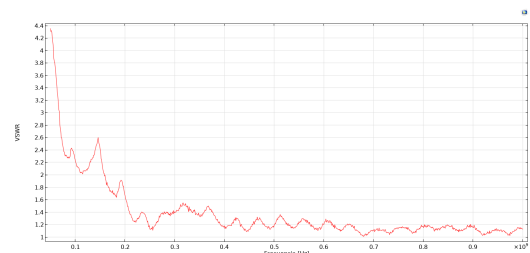


Figura 10: VSWR. **Fuente:** Resultado de Simulación.

8.1. Resultados con mediciones reales

Se realizaron mediciones al GTEM construido en la FIUNA, los resultados de VSWR obtenidos en estas pruebas se encuentran en la Figura 11 Se observa que a diferencia de los valores obtenidos en la simulación en COMSOL, los valores de VSWR son superiores a 2 en gran parte del espectro probado y los valores de S_{11} (Figura 12) son mayores a -10[dB], lo que indica una pérdida de potencia [11].

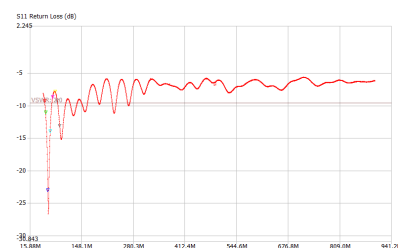


Figura 11: S_{11} medido. **Fuente:** [11].

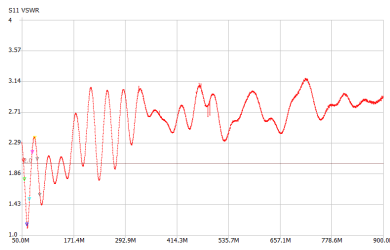


Figura 12: VSWR medido. Fuente: [11].

9. Conclusión

En este trabajo se caracterizó una celda para modos de ondas electromagnéticas transversales en Gigahertz (GTEM) mediante simulaciones numéricas y mediciones experimentales. Para lograr esto se comenzó desarrollando un modelo computacional en dos dimensiones de un corte transversal, utilizando la librería abierta FEniCS y el software COMSOL. A partir de este modelo se realizaron simulaciones del comportamiento de la misma en las cuales se observaron los cambios en el campo electromagnético y la impedancia característica de la misma al alterar su geometría. Tras realizar simulaciones con mallas de diferente refinamiento, se comparan los resultados de impedancia característica obtenidos, de la celda para estudiar su distribución de carga y la respuesta en frecuencia. Se comprobó que era posible lograr una geometría que de una impedancia característica de 50[Ω]. Se realizó un modelo en tres dimensiones de la celda entera, en el software multifísica COMSOL, con geometría, materiales y física lo más aproximados al GTEM real construido en el Laboratorio de Mecánica y Energía, esto a fin de predecir posibles armónicos y reflexiones dentro de la misma. Se obtuvieron valores de VSWR y S_{11} en un rango de frecuencias de 50[MHz] a 1[GHz], y estos resultados se los comparó con mediciones de GTEM real. Se notaron diferencias en el sentido en que los valores de VSWR son superiores a 2 en gran parte del espectro probado y los valores de S_{11} son mayores a -10[dB], aunque estos valores pueden ser mejorados.

10. Trabajos futuros

En cuanto a mejoras futuras se podría utilizar una computadora de mayor potencia o inclusive un cluster de computadoras, esto a fin de reducir el tiempo de procesamiento, permitir un modelado más preciso de la celda y abarcar un rango de frecuencias, también agregar detalles y modificaciones puntuales a la celda. Además se podría mejorar y agregar modificaciones al modelo del GTEM simulando las imperfecciones que se encuentran en la construcción de la misma

como la acometida del ápice al resto de la celda, los soportes internos y las imperfecciones en la puerta de entrada a la celda. Luego de implementar las mejoras propuestas se pueden volver a realizar las mediciones de distintas características y comparar resultados para verificar si estos están más aproximados

Referencias

- [1] J. Zheng, *Electromagnetic compatibility (EMC): design and test case analysis*. Wiley, 2019.
- [2] P. Kotwal, G. Verma, and P. K. Katti, "Modelling and analysis of gigahertz transverse electromagnetic mode (gtem) cell," *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 2019.
- [3] I. Clemens, "The construction and application of a gtem cell," Master's thesis, Helsinki University of Technology, 1995. [Online]. Available: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2020120342664>
- [4] A. D. Vita, R. Gaffoglio, and S. Bruno, "Characterization of an open gtem cell with the comsol multiphysics software," in *2018 COMSOL Conference*, 2018.
- [5] M. Heidemann and H. Garbe, "Using tem waveguides according to the new iec 61000-4-20," *2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03.*, 2003.
- [6] A. A. M. Jose and D. M. Palma, *Análisis del Efecto de la tensión fuera del plano en la conformabilidad de chapa metálica Proyecto Fin de Carrera*. s.n., 2014.
- [7] A. Logg, K.-A. Mardal, G. N. Wells et al., *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method*, A. Logg, K.-A. Mardal, and G. N. Wells, Eds. Springer, 2012.
- [8] COMSOL Multiphysics, *Comsol Multiphysics User's Guide Version 5.5*. COMSOL, 2012.
- [9] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*. Pearson, 2014.
- [10] COMSOL Multiphysics, "Modeling of pyramidal absorbers for an anechoic chamber," *COMSOL Application Gallery*, 2020.
- [11] B. Vega, "3rd south american international industrial engineering and operations management conference, asunción, paraguay," in *Design and Fabrication of a Large GTEM Cell for Electromagnetic Compatibility Testing*, 2022.