

Resultados iniciales en el estudio de una celda GTEM mediante el uso de software de cálculo computacional

Laura Nicora¹, Carolina Giuffrida², Norberto Dalmas Di Giovanni³

Facultad de Ingeniería del Ejército Argentino (Escuela Superior Técnica)

Av. Cabildo 15, C.A.B.A., Argentina

¹ lnicora.est@gmail.com

² c_giuffrida@hotmail.com

³ norberto.digiovanni@yahoo.com.ar

Abstract— This paper presents the first results of a simulation project of a GTEM CELL with two different softwares. This project aims to increase knowledge in the use of these tools and to be the first stage in the cell building, because it is an important device in everything related to training in Electromagnetic Compatibility.

Resumen— El presente trabajo muestra los primeros resultados obtenidos en un proyecto de simulación, con dos softwares distintos, de una celda GTEM. Este proyecto pretende incrementar el conocimiento en el uso de estas herramientas y ser el paso previo a la construcción de la celda, por ser un dispositivo fundamental en todo lo relacionado con la formación en Compatibilidad Electromagnética.

I. INTRODUCCIÓN

La Compatibilidad Electromagnética (EMC, con su sigla en inglés) es una disciplina que acompaña a una gran mayoría de proyectos de desarrollo en las diferentes áreas de posible aplicación. Es una disciplina que está presente, o debería estarlo, en todo ámbito en el cual coexistan diferentes dispositivos eléctricos y/o electrónicos y que sea necesario evaluar las posibles interacciones entre ellos.

En esas interacciones deben diferenciarse las de origen conducido y las de origen radiado. El presente trabajo aborda precisamente una problemática relacionada con esto último.

Para demostrar que un cierto dispositivo cumple con normas de EMC, es necesario disponer de una norma definida a cumplir y de una infraestructura de ensayo acorde a esa normativa. Esas normas pueden ser generales (como p.ej. la EN 61000), apropiadas a la aplicación a considerar (p. ej. Normas MIL) o adecuadas a algún producto en particular.

En estos procesos surgen dos instancias de ensayo: los de pre certificación (que se iteran durante el proceso de desarrollo) y los de certificación, que son los ensayos finales. Las normas generalmente indican con certeza tanto los ensayos de certificación a realizar como la infraestructura necesaria, mientras que para la pre certificación puede usarse instrumental ligeramente diferente o más adecuado al proceso de desarrollo y a quién lo realiza.

De estas últimas consideraciones se desprende que el desarrollador debe contar con un acceso casi permanente a infraestructura de ensayo, para que el proceso de

realimentación ante resultados obtenidos pueda corregirse y vuelto a medir, hasta que se obtengan los niveles estipulados de los parámetros en cuestión.

Debido a la importancia de esta disciplina, la Facultad de Ingeniería del Ejército, a través de un proyecto de investigación, ha decidido ahondar en los conocimientos del uso de uno de los elementos más conocidos que es la celda GTEM.

II. DESARROLLO TEÓRICO

A. Descripción física de una celda GTEM

Para realizar mediciones de compatibilidad electromagnética en un entorno aislado se utilizan típicamente cámaras semi anecoicas, pero éstas necesitan de una gran cantidad de material absorbente de muy alto costo y requieren de una gran potencia de entrada para realizar los ensayos.

Para solventar el problema de la cámaras semi anecoicas se puede utilizar una celda TEM (Transverse Electro-Magnetic), que es una línea de transmisión plana y expandida funcionando en el modo TEM, para que se asemeje a una onda plana en el espacio libre. Esta permite realizar pruebas de EMC con un dispositivo de bajo costo y móvil, ya que no es una infraestructura fija y de menor tamaño, con una limitación máxima en frecuencia de alrededor de 500MHz, dependiendo de las dimensiones de la celda.

Para resolver el inconveniente de la limitación en frecuencia se ha desarrollado la celda GTEM (Gigahertz Transverse Electromagnetic), que es una celda híbrida con características de la cámara anecoica y de una TEM. Así una celda GTEM logra extender el rango de frecuencia al orden del GHz, y cumpliendo con las capacidades de una celda TEM de producir un campo homogéneo y repetible sobre un determinado volumen, permitiendo realizar ensayos de compatibilidad electromagnética (EMC) en un ambiente controlado como los regulados en la norma IEC 61000.

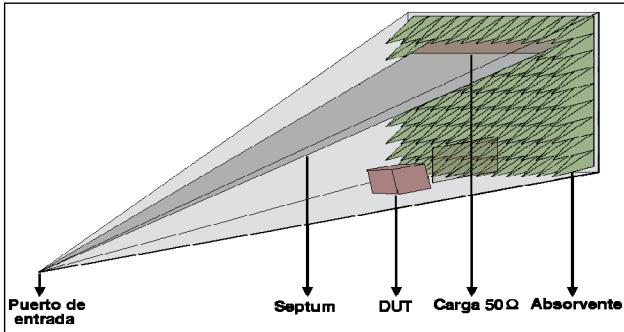


Fig. 1. Esquema de una celda GTEM

Una celda GTEM físicamente está formada por un conductor externo de forma piramidal, que hace de línea de transmisión y permite el apantallamiento del campo electromagnético al exterior. Internamente posee un conductor central plano llamado "septum", que termina en una red de cargas de $50\ \Omega$ conectadas al conductor externo. El puerto de entrada se encuentra en la parte más pequeña de la misma, que se utiliza para introducir una señal de RF o para medir una señal producto de las emisiones del objeto a ensayar. En el otro extremo posee material absorbente para atenuar las reflexiones dentro de la celda. Para realizar las pruebas de compatibilidad, la muestra se coloca por debajo del septum en una zona limitada, de forma tal de conseguir un área dentro de la celda que asegure confiabilidad y repetibilidad en las mediciones, es por esto que la muestra a estudiar debe tener las dimensiones adecuadas a la celda. En la Fig. 1 se puede observar un esquema de una celda GTEM.

Las dimensiones de una celda GTEM es muy variable, pero en general son estructuras relativamente grandes, en general suelen medir desde 1m hasta 9m de largo y desde 0.5m hasta 3m de alto, por ende resultan ser estructuras bastante más grandes que un celda TEM tradicional. La frecuencia de trabajo puede llegar hasta los 20GHz, lo que resulta alrededor de 0.015m de longitud de onda.

B. Descripción teórica de una celda GTEM

Como se describe en [1], [2] y [5], la intensidad de campo dentro de la celda disminuye de forma inversa a la distancia longitudinal de la celda, esto se debe al hecho de que la celda es un sector del ángulo sólido de una esfera, con lo cual el comportamiento es consistente con una onda esférica.

La intensidad de campo en el área de prueba es aproximadamente el cociente de la diferencia de potencial entre el conductor central y el exterior inferior, y la altura entre estos, según (1).

$$E = \frac{U_{\text{Interior}} - U_{\text{Exterior}}}{h}, \quad (1)$$

La potencia respectiva está dada por (2).

$$P = \frac{U^2}{Z}, \quad (2)$$

Entonces la potencia de entrada necesaria en función del campo eléctrico en la posición del DUT está dada por (3).

$$P = \frac{(E \cdot h)^2}{Z}, \quad (3)$$

De esta forma el campo eléctrico en la posición del DUT resulta como se indica en (4).

$$E = \frac{\sqrt{P \cdot Z}}{h}, \quad (4)$$

Lo que da como resultado que el campo eléctrico depende de la potencia de entrada y de la altura h . En la Fig. 2 se muestran varios gráficos del campo E en función de la altura h , para varias potencias de entrada:

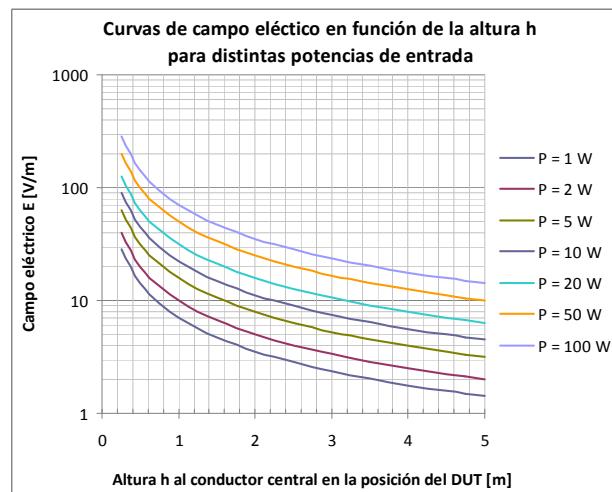


Fig. 2. Curvas de E en función de h para varias potencias de entrada

C. Impedancia de la celda GTEM

Una celda GTEM es una línea de transmisión expandida que funciona en modo TEM, con lo cual la impedancia característica se debe asegurar para evitar reflexiones que puedan causar modos de orden superior. La impedancia característica de la celda depende de las dimensiones de su geometría, que debido a la asimetría de la misma, el cálculo de dicha impedancia debe hacerse por métodos numéricos. Esto puede realizarse usando la aproximación de la capacitancia de una línea coaxial rectangular con conductor infinitesimalmente fino y desplazado verticalmente del centro, como se ve en la Fig. 3.

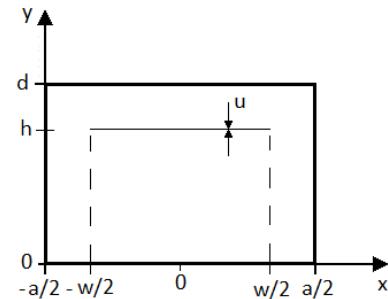


Fig. 3. Esquema de la aproximación de la celda a una línea rectangular

La impedancia característica resulta ser inversamente proporcional a la capacitancia, según (5).

$$Z = \frac{1}{c_0 \cdot C}, \quad (5)$$

III. DESARROLLO

A. Objetivo

El proyecto de investigación que da origen a este trabajo, fue conformado con múltiples objetivos. El objetivo final es construir una celda GTEM para el Laboratorio de Electrónica, y así, ampliar sus capacidades para realizar ensayos de EMC y prácticas académicas.

Como objetivos secundarios se encuentran:

- Profundizar la experiencia en el uso de software de simulación electromagnética. Además se optó por dejar las simulaciones típicas de antenas para orientarlas a simulaciones de grandes estructuras a alta frecuencia, más exigentes desde el punto de vista computacional, como es el caso de una celda GTEM.
- Comparar los resultados de distintos softwares.
- Adquirir conocimientos para conseguir elaborar una aplicación académica que puedan utilizar docentes y alumnos de la Facultad.

Cabe acotar que existen trabajos similares, especialmente aquellos realizados por profesionales de empresas vinculadas a la comercialización de estos dispositivos. Con este trabajo se pretende incorporar una disciplina de trabajo que no estaba presente en la Facultad y que se considera importante basarla en resultados propios.

B. Metodología

La celda que se estudió en el presente trabajo está basada en el análisis de una celda comercial, que por ser el primer estudio de este tipo de estructuras, se pensó en iniciarla con una de las más pequeñas. La misma es de 2,9m. de largo, 1,5m de ancho, y 1m de alto. La frecuencia de trabajo de esta celda comercial puede ser hasta 20 GHz. En la Fig. 4 se puede observar un esquema de la misma.

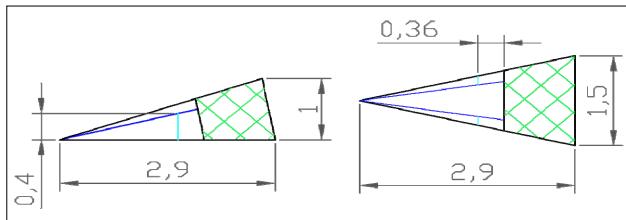


Fig. 4. Esquema de la celda comercial estudiada.

La Facultad de Ingeniería del Ejército Argentino posee convenios de utilización de dos programas comerciales aptos para estas aplicaciones, CST (Computer System Technologies) y FEKO (Hyperworks). Se realizaron las simulaciones de la celda GTEM tomada como ejemplo con ambos programas.

NOTA: Las características de las simulaciones realizadas obedecen a las mejores condiciones de elección de rango de frecuencias, capacidad de cálculo de los programas disponibles, características del hardware utilizado y duración en tiempo de los procesos de cálculo.

C. Simulación en el CST

Basándose en [3] y [4], en el CST se realizaron tres simulaciones. Una de la celda abierta, otra con una tapa sin el absorbente y por último una con un bloque absorbente, cuya permitividad es de 2,25. En la Fig. 5 se muestran las mismas.

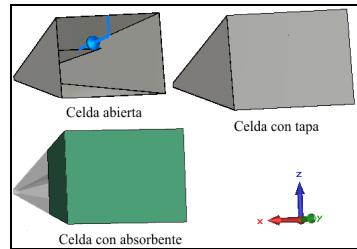


Fig. 5. Esquema de las distintas etapas de simulación de la celda en el CST.

La simulación se realizó en un rango de frecuencia de 0,5 a 1GHz, el método de simulación utilizado fue el Transient, la simulación generó alrededor de 2.300.000 celdas de malla.

Los resultados obtenidos se muestran en las Fig. 6 y 7 en dos cortes de la celda, uno en el plano YZ a lo largo de la misma y otro en un corte en el plano XZ a la altura del DUT.

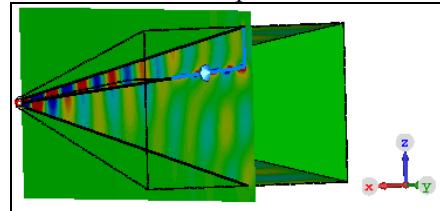


Fig. 6. Corte de la celda en el plano YZ.

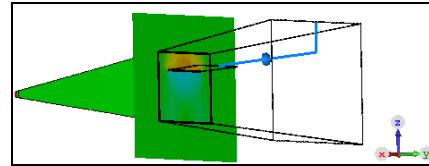
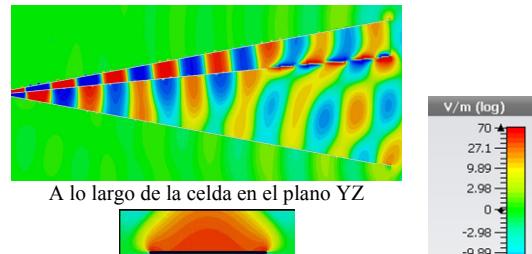


Fig. 7. Corte en el plano XZ a la altura del DUT.

En las Fig. 8, 9, 10, 11, 12 y 13 se muestran los resultados del modo TEM obtenidos en el CST para cada una de las etapas simuladas.

- Componente Z del Campo E.

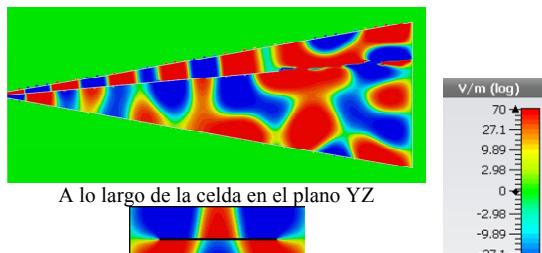


A lo largo de la celda en el plano YZ

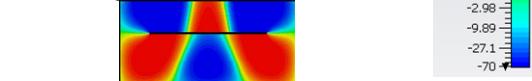


En un corte en el plano XZ a la altura del DUT

Fig. 8. Componente Z del campo E obtenido en la celda abierta.



A lo largo de la celda en el plano YZ



En un corte en el plano XZ a la altura del DUT

Fig. 9. Componente Z del campo E obtenido en la celda con tapa.

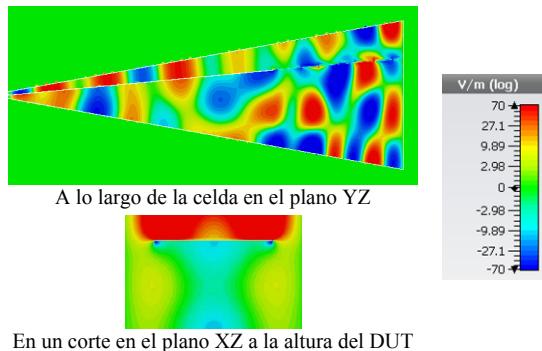


Fig. 10. Componente Z del campo E obtenido en la celda con absorbente.

- Componente X del Campo H.

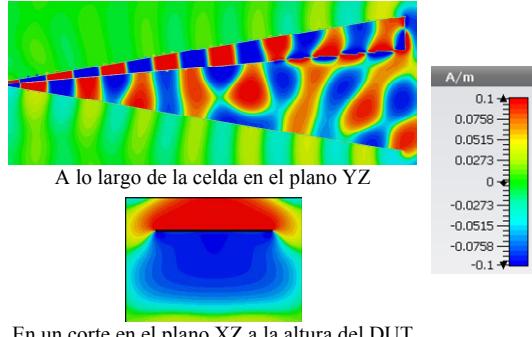


Fig. 11. Componente X del campo H obtenido en la celda abierta.

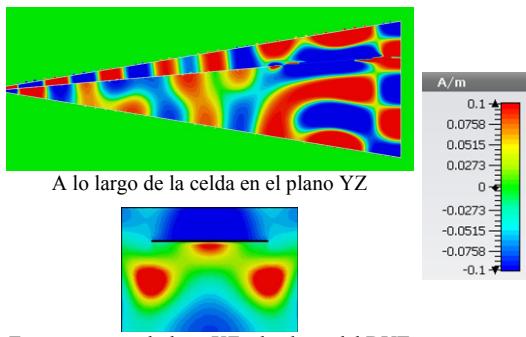


Fig. 12. Componente X del campo H obtenido en la celda con tapa.

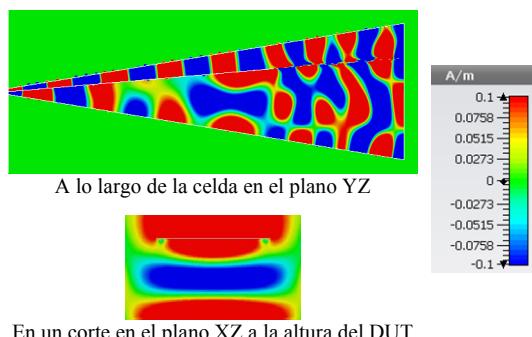


Fig. 13. Componente X del campo H obtenido en la celda con absorbente.

A continuación se muestra como es la uniformidad del campo. En la Fig. 14 se gráfica el campo Ez para distintos puntos del DUT en función de la frecuencia, para la celda con tapa y absorbente. En la Fig. 15 se muestra la variación del campo en el tiempo para los tres tipos de celdas:

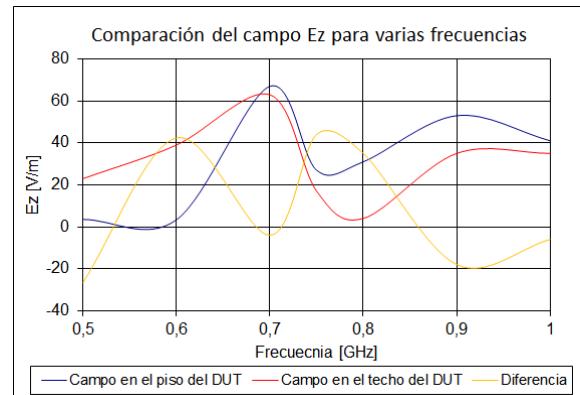


Fig. 14. Campo Ez para la celda con tapa y absorbente.

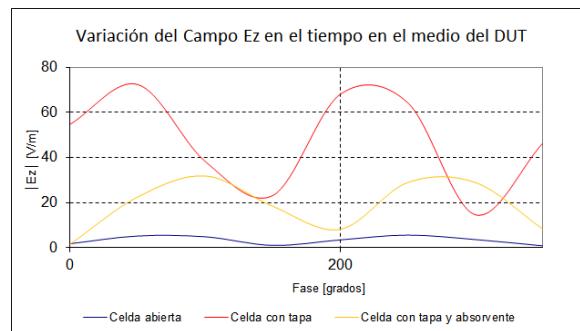


Fig. 15. Campo Ez en el tiempo en el medio del DUT para $f = 0,75\text{Ghz}$.

D. Simulación en el FEKO

En una primera instancia se replicó la celda GTEM comercial en el software FEKO en su totalidad. Se utilizó un cubo en la geometría del absorbente para disminuir el tiempo de cálculo.

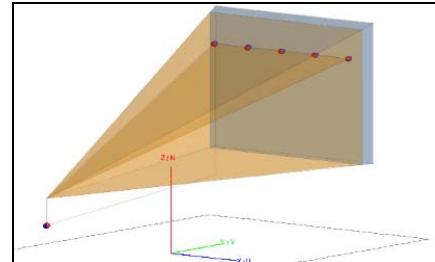


Fig. 16. Vista del modelo de celda utilizado en la simulación en FEKO.

El primer elemento a determinar fue el rango de frecuencias, ya que el FEKO utiliza para calcular sus triángulos del mallado la frecuencia más alta del rango de operación, haciendo que para las frecuencias más bajas sea excesivo el número de triángulos y por lo tanto muy elevado el tiempo de simulación. Por ello se optó por iniciar en el rango de 30 a 300 MHz.

En cuanto al tipo de carga, se utilizaron puertos en paralelo haciendo de resistencias, de tal forma que la total resulte en 50 ohms. En primera instancia se utilizaron 5 cargas, luego 9 y por ultimo 17.

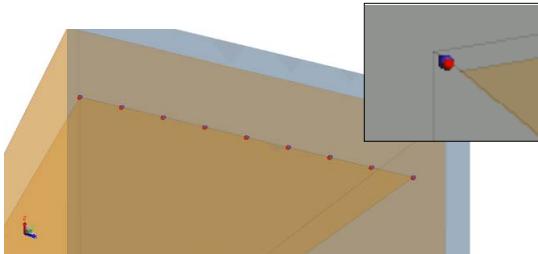


Fig. 17. Vista de la modelización de las cargas en la celda GTEM.

Simulación con 9 cargas:

- Adaptación de la entrada.

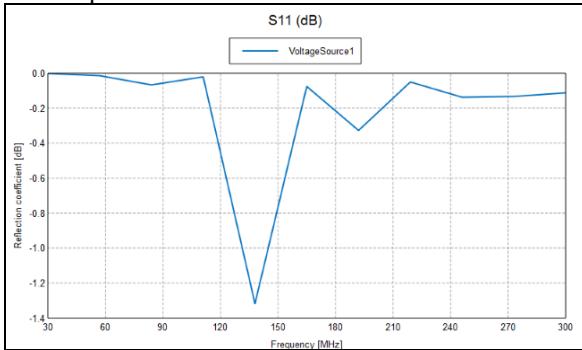


Fig. 18. Gráfico de S11.

- Modo TEM a lo largo de la celda.

Campo E en posición del DUT:

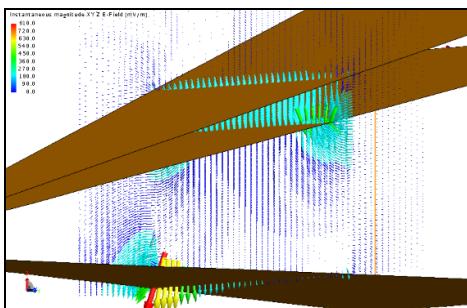


Fig. 19. Campo E en posición del DUT en 30MHz

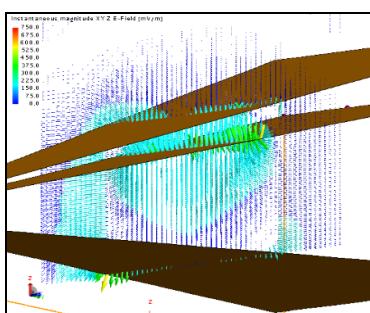


Fig. 20. Campo E en posición del DUT en 300MHz

Campo H en posición del DUT:

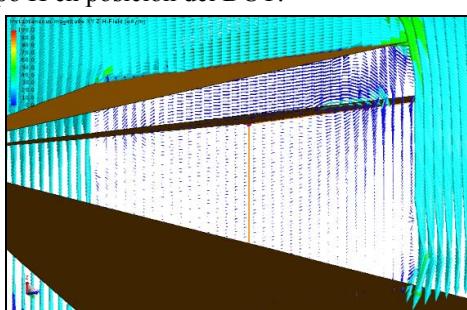


Fig. 21. Campo H en posición del DUT en 30MHz

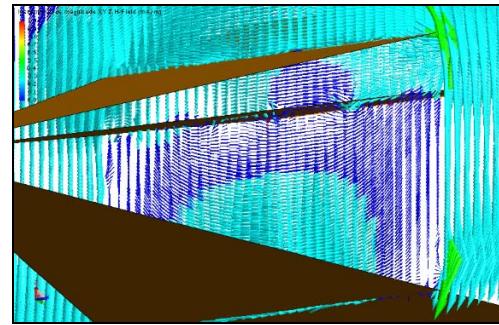


Fig. 22. Campo H en posición del DUT en 300MHz

Se puede observar el modo TEM ya que el campo H es transversal al campo E y a su vez a la dirección de propagación de la onda.

- Uniformidad del campo en el punto del DUT.

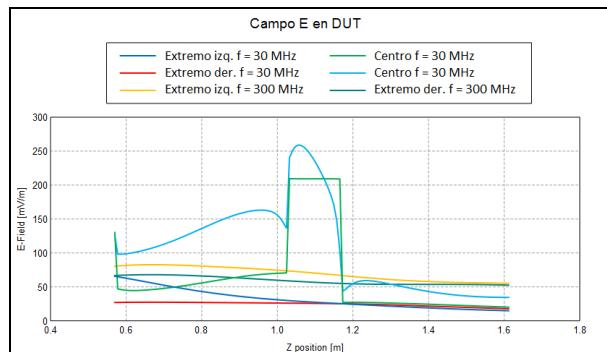


Fig. 23. Intensidad de campo E en el plano de colocación del DUT.

En la Fig. 23 se puede observar el campo E a lo largo del eje Z de la celda en el plano de ubicación del DUT.

Se utilizó el tamaño del DUT recomendado en la hoja de datos de la celda estudiada para un área uniforme (variación de campo entre 0 y 6 dB) y se analizó en dos puntos del mismo, en el piso y en el techo. En la Fig. 24 se puede observar el campo E en cada posición.

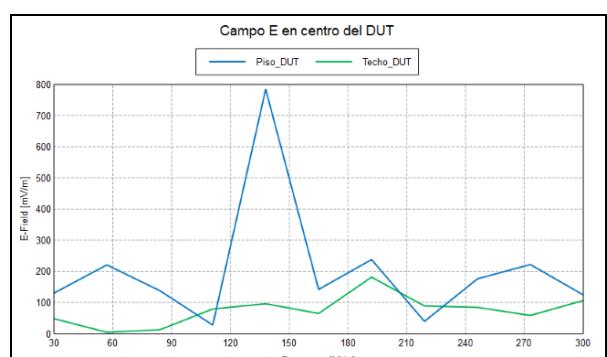


Fig. 24. Intensidad de campo E en los puntos extremos de ubicación del DUT.

Para determinar cuan uniforme es el campo en el área del DUT en la Fig. 25 se observa la diferencia en dB entre el techo y el piso del mismo.

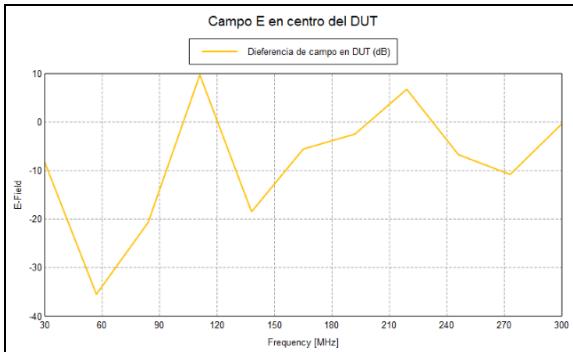


Fig. 25. Uniformidad de campo E en el plano de colocación del DUT.

Se puede observar la importante variación de campo eléctrico obtenido en función de la frecuencia. Si bien esto no es lo esperable, se ha podido obtener valores sin errores en el diseño de la estructura que impidan que el programa calcule. A partir de aquí, se deberá trabajar especialmente con la carga y el absorbente para optimizar los resultados. Otra condición a estudiar será modificar el Septum para encontrar la posición óptima.

A su vez se prevé repetir todas las simulaciones con un paso menor de frecuencias para corroborar que esté desadaptada y que no estemos perdiendo puntos intermedios de valores críticos, así como también mejorar el mallado para descartar que este ítem no este afectando los resultados.

IV. CONCLUSIONES

Se han podido obtener resultados en las simulaciones de grandes estructuras y se avanzó en la formación de los recursos humanos que utilizan estos programas.

De las simulaciones realizadas se puede concluir que es posible simular este tipo de estructuras, pero con grandes tiempos computacionales y altos requerimientos de memoria, que limitan mucho la frecuencia máxima de trabajo y las opciones de modelización de los distintos componentes de la celda, condicionando los resultados a los recursos disponibles en los laboratorios de la Facultad.

Esto se debe a que en las grandes estructuras a altas frecuencias la cantidad de longitudes de ondas que caben en el objeto a simular está relacionado con la cantidad de celdas del mallado de la simulación, cuantas más longitudes de onda más celdas tiene la simulación y cuantas más celdas tenga la simulación más memoria se requiere para realizarla.

Para el CST se recomienda no tener más de 5 millones de celdas por cada Gigabyte de memoria para poder realizarla. Una simulación de hasta 1 GHz genera un poco más de 2 millones de celdas de mallado, si la frecuencia llegara hasta 3GHz se obtendrían más de 35 millones de celdas. En la Tabla I Se muestran los tiempos de simulación según la memoria de la computadora utilizada para realizarla.

TABLA I
ESPECIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN SOFTWARE CST

Simulación en CST			
Frecuencia máxima	Mallado	Tiempo total de simulación	Memoria Sistema
1 GHz	~ 2 millones	~ 2:30 hs	4 GByte
3 GHz	~ 35 millones	No fue posible realizarla	4 GByte

Para la simulación en el FEKO de un rango de frecuencias tan elevado es necesario dividirla. El software

necesita que al menos el tamaño del triangulo del mallado sea de $\lambda/10$ (teniendo en cuenta la frecuencia más elevada). El inconveniente es que si el rango de frecuencia es muy grande, el tamaño del triángulo de mallado que se requiere es muy pequeño, parámetro acertado para la frecuencia más alta pero excesivo para la más baja. Esto genera que el tiempo de simulación sea muy elevado, o peor aún, que la memoria de la PC no sea suficiente y salten errores durante la corrida. Para este trabajo se utilizó la simulación especificada en la Tabla II.

TABLA III
ESPECIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN SOFTWARE FEKO

Simulación en FEKO		
Mallado	Tiempo	Memoria total
620 segmentos		463,058 MBytes pico,
2558 triángulos metálicos	2,72 hs.	2 procesos, 3.836 GBytes máx. permitida
1074 triáng. dieléctricos		

Por otro lado, ambos softwares tuvieron casi los mismos problemas de requerimientos de memoria y los resultados de ambos, si bien las simulaciones no fueron iguales, resultaron bastante compatibles.

V. TRABAJOS A FUTURO

Tratar de mejorar los tiempos de simulación en función de la adecuada selección de los rangos de frecuencia a utilizar.

Utilizar en cada programa, el método de simulación más adecuado para cada rango de frecuencia.

Realizar un modelo que ajuste mejor al comportamiento real de una carga distribuida de 50Ω .

Buscar un modelo acorde para el absorbente, para poder llegar a un posible modelo de celda que sirva para su construcción real.

Profundizar las simulaciones realizadas analizando en detalle las variaciones y cambios detectados en cada caso.

Realizar mediciones en una celda de este tipo, para verificar las variaciones de campo que se obtuvieron por cálculo.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente al Ing. Aldo Peruggia y al Dr. Joao Costa, por el asesoramiento permanente en el uso de los softwares FEKO y CST, respectivamente.

VII. REFERENCIAS

- [1] S. Z. Sapuan and A. Alphones, "Study of the Electric Field in a GTEM-CELL", *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China*, Apr. 2010.
- [2] A. Ubin and M. Z. M. Jenu, "Characterization of Electric Fields in a GTEM Cell", *RF and Microwave Conference, Subang, Selangor, Malaysia*, Oct. 2004.
- [3] H. Thye, G. Armbrecht, and M. Koch, "Aspects of modelling a GTEM Cell using CST", *3rd European CST User Group Meeting, Tegernsee*, Sep. 2007.
- [4] Y. Wei1, Z. Yang, L. Yong-chao, F. Zhi-min, Z. Bo, R. Rong, "Study on Multifunction GTEM Cell for Radiated EMI Measurement and Analysis" *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, 2010.
- [5] E. Yamashita and K. Atsuki, "Strip line with rectangular outer conductor and three dielectric layers", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 18, No. 5, May 1970, pp. 238-244.