

SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA FD-TD: UNA AYUDA AL DISEÑO EN COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Alex Vidal, Gabriel Anzaldi, Ferran Silva

Grupo de Compatibilidad Electromagnética.

Dept. de Ingeniería Electrónica. UPC.

<http://www.upc.es/web/gcem/>

alex@eel.upc.es, gabriel@eel.upc.es ferran@eel.upc.es

INTRODUCCIÓN

El algoritmo FD-TD (Finite Difference Time Domain) es un método de simulación de campos electromagnéticos. La técnica FD-TD, y sus variantes como XFDTD, están presentes desde hace tiempo en muchas aplicaciones y puede compararse en madurez a técnicas ya consolidadas como el método de los momentos u otros algoritmos de elementos finitos [1].

La simulación ha dejado de ser algo exclusivo de los trabajos de investigación para pasar a ser una herramienta dentro de los procesos de diseño de un producto. De entre las opciones de simulación (resolución analítica, métodos numéricos y sistemas expertos), los métodos numéricos permiten una mayor flexibilidad. La potencia bruta de cálculo y el hecho de que no necesita resultados previos como los sistemas expertos, convierte la simulación EM en la herramienta más idónea al atacar problemas nuevos y de gran complejidad.

A lo largo del artículo veremos una introducción al algoritmo FD-TD. Se intentará dar una perspectiva del estado actual de la simulación y su aplicación en diseños reales.

EJEMPLOS DE APLICACIONES CON FD-TD.

La importancia de la simulación es cada vez mayor y con ello se toma más en serio su utilización. Hay dos claros ejemplos que lo corroboran: cada vez hay más productos comerciales y cada vez aparecen más resultados en publicaciones técnicas compartiendo protagonismo con resultados experimentales.

Dado su carácter temporal, FD-TD permite el cálculo de transitorios, resolución de problemas de scattering, propagación,... El buen comportamiento de FD-TD a alta frecuencia le permite estar presente en aplicaciones a EMC, análisis y síntesis de antenas, cálculo de Radar Cross Section (RCS), interacción de campos de telefonía móvil en seres vivos, diseño microelectrónico,...

Esta última es un área en el que las medidas son en ocasiones muy complicadas. La verificación cualitativa de las soluciones al diseño es un campo importante de aplicación de la simulación. Las formulas asociadas a los parámetros de capacidad e inductancia de las interconexiones suelen deducirse para estructuras aisladas y pueden ser muy imprecisas cuando se trabaja con estructuras más complejas. La simulación también es un recurso en este caso ya que puede evaluar la estructura completa. No solo permite ver los acoplamientos sino también las distribuciones de corriente que son importantes en la problemática actual de disipación de calor. Las figuras siguientes muestran un ejemplo. En este caso lo que se analiza es la distribución de la corriente en un integrado LM7171. montado sobre un PCB.

En la figura 1 podemos ver el modelo del interconexión de salida del integrado que está conectado sobre un PCB. En la figura 2 se observan los resultados obtenidos, donde las zonas más claras (verdes y rojas) corresponden a una densidad de corriente mayor. Además este ejemplo también muestra otra potencialidad de estos métodos: la utilización de diversas técnicas de simulación simultáneas. El *core* del circuito (que aparece en el centro de la figura 1) corresponde a un modelo PSPICE del circuito integrado, al mismo tiempo en la simulación EM se definen puertos de entrada en los que se calcula V o I. Estos parámetros se introducen como excitación en un nodo de un circuito SPICE que se simula al mismo tiempo de modo que esta excitación produce una respuesta en el circuito que puede utilizarse como condición de contorno en otro punto del modelo físico.

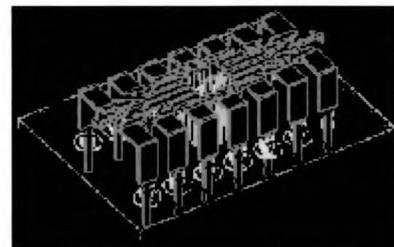


Figura 1. Modelo de un circuito integrado LM7171 sobre una PCB.

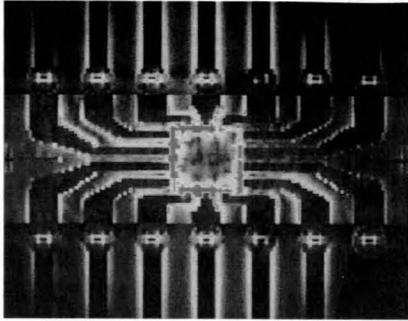


Figura 2: Distribución de corrientes en la estructura anterior.

Las técnicas de FD-TD también están siendo aplicadas a problemas de muy alta frecuencia [2]. La aplicación de FD-TD ya no solo corresponde al dominio radioeléctrico sino incluso se utiliza a problemas en el dominio óptico [3] asociados por ejemplo a la dispersión de la luz en materiales o en LASERS.

Otro ejemplo destacable fue el proyecto realizado para SAAB en aviónica sobre el estudio de las corrientes en el fuselaje debidos a la caída de rayos durante el vuelo. El modelo ocupa un volumen de 30x30x15 m y se ha discretizado a un tamaño de celda de 2.5cm. Estos valores implican un número de celdas que supera los 1000 millones. En total se realizaron 2500 pasos de simulación con un timestep de 83.3ps. La precisión y el volumen de celdas requiere un total de 64Gbytes de RAM. El tiempo de simulación necesario fue de 66 min en un paralelizador de 125 procesadores RS/600 a 160MHz. Los valores de corriente obtenidos y el campo magnético radiado se muestran en la figura 3.

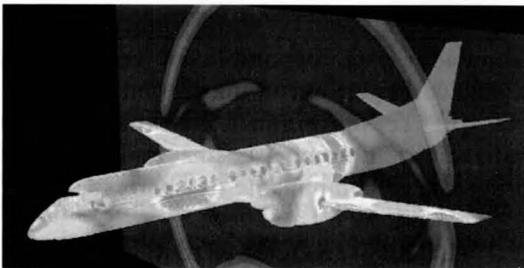


Figura 3. La simulación permite estudiar las corrientes de un rayo circulando por el fuselaje.

REVISIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO

La revisión que se da en este punto solo pretende ser una pincelada de los fundamentos matemáticos de FD-TD [4].

Las ecuaciones de Maxwell en caso de no existir fuentes de campo eléctrico ni magnético pueden reducirse a:

$$\nabla \times H = J + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

donde ϵ es la permitividad eléctrica y μ la permeabilidad magnética. Para un medio con conductividad no infinita podemos expresar: $J = \sigma \cdot E$. El desarrollo de estas ecuaciones nos da un sistema acoplado en que E depende las componentes de H y viceversa. De forma cualitativa, podemos decir que FD-TD substituye los operadores derivada por incrementos, pasándose así al dominio discreto.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (3b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (3d)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (3e)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (3f)$$

Para solventar este problema de interdependencia de E y H , Yee propuso en 1966 [5] una discretización diferente para calcular el campo eléctrico y magnético. Esta nueva discretización se da tanto en el dominio temporal como espacial. Yee definió lo que se conoce como celda Yee. La figura 4 representa los puntos en los que se calcula campo eléctrico y magnético.

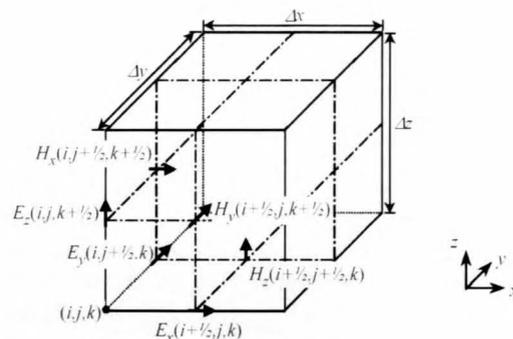


Figura 4. Celda Yee.

Cada punto en el que se calcula E está rodeado de 4 puntos en los que se conoce H , por lo que de se puede obtener el

valor de campo tanto por las expresiones en forma diferencial como a través de su forma integral. Considerando el campo E en el paso de simulación n, el algoritmo realiza el cálculo de los valores de campo magnético para un instante de tiempo entre dos pasos de simulación n+1/2. De forma similar, se realiza el cálculo del campo E en el instante n+1 a partir de los valores de H calculados anteriormente. Esto demuestra una importante característica del algoritmo: su natural paralelización. Dado que el cálculo solo depende de los valores de E o H anteriores, este se puede realizar de forma paralela para diversos puntos.

El algoritmo permite la definición de las características de cada celda por separado (e, m y s). Incluso pueden introducirse materiales anisótropos [6].

Para que el algoritmo converja se han de considerar unas condiciones tanto para los incrementos espaciales como temporales. Por lo que respecta a las condiciones espaciales, existe la recomendación de no hacer la celda mayor de 1/20 parte de la mínima longitud de onda presente en el problema. En muchas ocasiones esta cota es mucho menos restrictiva que las propias condiciones de resolución que se desean para el modelo a discretizar. Otro aspecto importante en FD-TD es la interrelación entre los incrementos temporales y espaciales: una discretización fina obliga a un cálculo con incrementos de tiempo pequeños. Esto es debido a la velocidad de propagación de los campos y su efecto en las celdas vecinas. Las condiciones anteriores se resumen en la condición de Courant, que garantiza la convergencia:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{\max} \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (4)$$

donde Δt será el incremento de tiempo (discretización temporal). Δx , Δy , Δz corresponden a la resolución de la discretización espacial. Y por último v_{\max} será la máxima velocidad de propagación de la luz en el modelo y que dependerá de las características físicas de los materiales utilizados.

Por último hay que destacar la problemática de las Absorbing Boundary Conditions (ABC). En el modelo deben definirse unas condiciones de contorno en los límites del mismo. Si no fuese así existirían reflexiones de potencia que no aparecerían en el caso real para propagación en espacio libre. Las ABC tienen la función de realizar una adaptación de las impedancias de los materiales del modelo y el medio ficticio correspondiente a su extensión. Principalmente se utilizan dos técnicas: las condiciones de absorción de MUR [7], y las PML (Perfectly Matched Layers) [8].

Por último comentar que de la misma forma que FD-TD es muy utilizado a alta frecuencia, una limitación importante del método son las simulaciones a baja frecuencia. La resolución temporal (que es función de la espacial) puede ser muy pequeña requiriendo tiempos de simulación demasiado largos.

UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN: LC.

LC nació en el seno de Silicon Graphics con el objetivo de tener una herramienta FD-TD propia que pudiese servir de ayuda en el diseño de sus supercomputadores. En este aspecto la simulación puede ayudar a obtener resultados cualitativos sobre las distribuciones de corriente y acoplamiento en modelos sencillos del interconexión interno.

LC es un simulador lineal que permite la caracterización de materiales isótropos a partir de su permitividad eléctrica y permeabilidad magnética. Permite también introducir pérdidas en el modelo a partir de la conductividad eléctrica del material. Incluso en la última versión se puede definir la conductividad magnética que permite modelar materiales que disipan la energía del campo magnético en forma de calor.

Otro de los refinamientos importantes que tiene el método FD-TD es la posibilidad de una discretización no uniforme del modelo permitiendo así mejorar la resolución del modelo en zonas donde es necesario, mitigando el problema de la memoria excesiva. En LC esta opción aparece bajo el nombre de *submesh*.

El simulador está disponible en versiones para paralelizadores pero existe una versión para LINUX, de la que recientemente ha aparecido una actualización que permite sistemas multiprocesador. El programa se compone de tres partes:

-El PRE-PROCESADOR: es un editor simple que permite la definición de la geometría así como de las características de los materiales; las fuentes de excitación y los puntos (o superficies) de prueba de campos E-H, tensiones o corrientes. También permite definir parámetros de la simulación como el método de truncado del dominio de simulación o el tiempo de la misma.

-El SOLVER DEL SIMULADOR. Esta parte realiza la discretización del modelo e implementa el algoritmo computacional de FD-TD.

-El POST-PROCESADOR: permite la visualización de los resultados. Además permite realizar operaciones con estos para obtener información adicional como diagramas de radiación o distribuciones de líneas equipotenciales. También

permite la obtención de los parámetros S y las capacidades e inductancia de estructuras.

Algunos productos de simulación comercial no desarrollan mucho el primer y tercer componente. Son más flexibles en estos aspectos permitiendo importar los modelos de formatos estándar como AUTOACAD en lugar de crear su propio formato. De esta forma pueden adaptarse a las herramientas ya disponibles en el entorno de trabajo. Un ejemplo de estas herramientas de pre y post-procesado es el GID [9], desarrollado en el CIMNE, el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería de la UPC. Lo mismo ocurre para las herramientas de post-procesado como MATLAB. Incluso existen solvers para complementar a este último. Pero LC, al combinar las tres partes, resulta una herramienta muy intuitiva y completa para iniciarse en la simulación.

Actualmente LC ha pasado a ser de CRAY RESEARCH INC al igual que Silicon Graphics. Se puede obtener más información sobre él y sobre como conseguir la distribución gratuita en <http://lc.cray.com>.

En la figura 5 aparece una aplicación extraída de esta propia web en la que se estudia la distribución de corrientes en un circuito integrado.

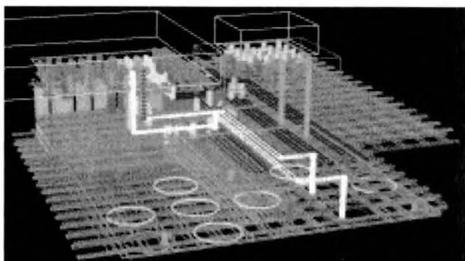


Figura 5. modelo de un circuito integrado sobre el que se obtienen densidades de corriente.

Es importante ver que una empresa como Silicon Graphics considerara la simulación como una herramienta más en el desarrollo de sus productos.

Por último, destacar que dentro del Grupo de Compatibilidad Electromagnética (GCEM) de la UPC, se han desarrollado diversos productos de instrumentación para medidas de EMC y que han tenido aportaciones de la simulación en su diseño. En concreto, se ha desarrollado una sonda para la medida en campo próximo [10] [11] y actualmente se trabaja en obtener una sonda isotrópica. Antes de construir los prototipos la simulación se utilizó para obtener diferentes parámetros de la sonda: impedancia de entrada, sensibilidad en frecuencia o diagrama de recepción. En la figura 6 se puede comparar el modelo real y el de simulación.

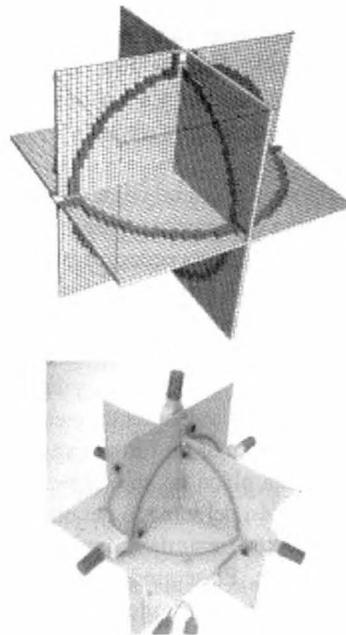


Figura 6: Arriba, el modelo simulado de la sonda isotrópica. Abajo, el modelo real montado en PCB.

UNA APLICACIÓN PRÁCTICA: GENERACIÓN DE UNA ONDA PLANA.

La onda plana es un valioso recurso a la hora evaluar la respuesta de un elemento al efecto de un campo lejano. La obtención del diagrama de radiación, la sensibilidad, los ajustes en las impedancias de carga,... de una antena o la RCS son parámetros que pueden obtenerse a partir de la iluminación de la estructura con una onda plana. Pueden considerarse dos caminos en su implementación en simuladores: la generación numérica y el modelado completo de un sistema real que la genere.

La generación numérica de una onda plana no es nueva en los algoritmos de FD-TD. Por cuestiones de seguridad nacional, el simulador LC solo permite esta opción en distribuciones para su uso dentro de EEUU, ya que a partir de simulación podrían obtenerse firmas Radar por ejemplo. Por este motivo, para poder utilizar ondas planas en LC en otros países se debe generar la onda mediante la simulación completa de un sistema que radie.

Una de las posibilidades sería la utilización de una antena patrón como elemento radiante, a una distancia suficiente del elemento a ensayar para considerar campo lejano. Como patrón puede usarse un dipolo resonante. Esta solución presenta diversos inconvenientes:

-Problemas con el método. La respuesta del dipolo tiene una fuerte dependencia de la frecuencia. En si esto no es un problema en la simulación, ya que puede corregirse calibrando. Pero es más razonable considerar un método cuya excitación sea uniforme en la banda de frecuencias a considerar.

-Problemas de simulación. La separación entre las antenas emisora y receptora presenta varios problemas. En primer lugar, la distancia necesaria puede ser grande en términos de número de celdas por lo que el consumo de memoria necesaria puede dispararse. Esto se agrava si la resolución espacial necesaria para el objeto a ensayar tiene que ser pequeña. Por otra parte, y dado que el tiempo de simulación es aproximadamente lineal con el tamaño, éste se puede incrementar de forma exagerada. Además, conseguir una onda plana no solo depende de la antena emisora sino también del tamaño del objeto a iluminar y sobre el que se desea un frente de onda plano (equipotencial) en todos sus puntos. El segundo problema es que esta situación corresponde a un modelo abierto. Esto requiere de condiciones de contorno absorbentes que permitan la simulación sin retorno de potencia al modelo. Realmente la adaptación nunca es perfecta y pueden aparecer reflexiones. Para evitar este efecto se recomienda dejar un espacio de 1 o 2 longitudes de onda entre el modelo y el límite de este en todas las direcciones, cosa que agrava el problema de la memoria ya comentado. Si no se tienen en cuenta todos los aspectos anteriores, los resultados que se obtienen divergen en el caso de que la potencia reflejada sea grande o el espacio libre alrededor de los elementos sea insuficiente.

En nuestro caso, el modelo escogido para la generación es la estructura TEM [12]. El funcionamiento de una celda TEM puede verse de modo intuitivo igual que el funcionamiento de un cable coaxial. El cable coaxial se comportará como una línea de transmisión sobre la que se propaga una onda electromagnética. El ensanchamiento de este coaxial y su conductor central permiten crear un volumen en el que se tiene un campo aproximadamente uniforme y líneas de campo paralelas. En el caso de la celda TEM ambos requerimientos (memoria, y las condiciones de absorción ABC's) se relajan. Por lo que respecta a la potencia, la TEM es una estructura completamente cerrada que confina el campo generado. De esta forma se elimina la necesidad de aire circundante reduciéndose la memoria necesaria. En el caso de la generación de onda a partir de un dipolo existe además la restricción del tamaño del DUT. Si el objeto es muy grande, es necesario alejarlo de la antena patrón para asegurar el frente de onda. En el caso de la TEM, si el DUT cabe dentro de la zona de campo uniforme, la memoria necesaria es independiente del tamaño de este, ya que el volumen total se mantiene constante.

En la figura 7 se representa el modelo de celda con un corte transversal que permite ver el objeto a ensayar

colocado en su interior. El modelo consta de tres componentes: el coaxial del generador, el coaxial de la carga, y la parte central de transmisión de la potencia. Cada uno de estos tres elementos puede variar la respuesta frecuencial de la celda.

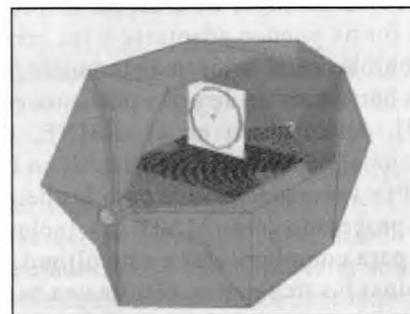


Figura 7. Sección de la celda TEM utilizada. En su interior se coloca el elemento a iluminar (en este caso una sonda de campo cercano).

La modificación de la geometría de un coaxial para obtener la TEM conlleva modificaciones en la distribución y propagación del campo. Esto se mejora si tanto la impedancia del generador como la carga coinciden con la impedancia característica de la línea. En caso contrario las reflexiones que se produzcan en la carga pueden variar su respuesta frecuencial y crear ondas estacionarias.

En la creación del modelo se ha tenido en cuenta que deben minimizarse estos efectos. En lo que respecta a los coaxiales de entrada y de terminación, inicialmente se consideró una fuente de tensión y una carga que unen el conector central y la carcasa por un único punto. Esta asimetría también introduce variaciones en la distribución de los campos. Se ha optado por poner dos fuentes de igual amplitud en paralelo (ya que ambas conectan el conductor central y la carcasa exterior) como excitación. Este problema de simetría también se traslada a la carga donde se han colocado 4 cargas de 200W en paralelo para obtener una impedancia de 50W. Las cargas se distribuyen formando una estrella entre el conductor central y la carcasa exterior. La figura 8 muestra ambos coaxiales.

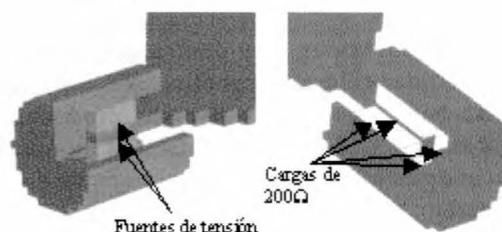


Figura 8. Cortes de los coaxiales de excitación (izq) y de la carga (dcha).

Una vez construida la celda, se pasó a verificar su funcionamiento. Para ello se utilizó un pulso con una respuesta plana en la zona del espectro de interés. Una

matriz de puntos de prueba en el centro y laterales de la celda permite determinar el volumen útil en la que puede considerarse una onda plana. Finalmente se obtuvo un volumen de 10x10x10 cm dentro de la celda en la que el campo puede considerarse dentro de una dispersión de $\pm 5\%$, y que puede observarse en la figura 9.

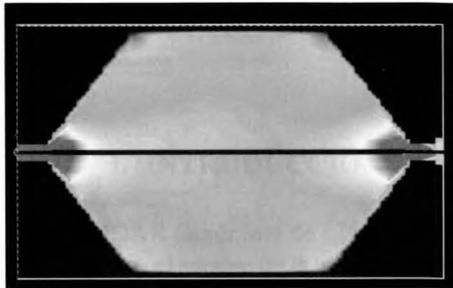


Figura 9: Distribución del campo eléctrico en un plano transversal de la celda.

La respuesta de la celda puede considerarse plana hasta 300 MHz. Este valor depende del tamaño de la celda: si la celda es menor, su frecuencia de corte es mayor pero disminuye su volumen útil.

Los resultados obtenidos, figura 10, demuestran un buen comportamiento de la celda. La componente principal (componente z) difiere en más de un orden de magnitud de las componentes residuales de campo en cuadratura (componente y) y transversales al frente de onda (componente x).

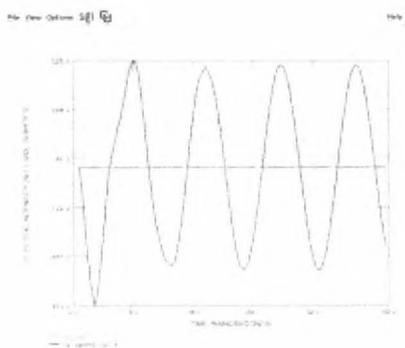


Figura 10: Respuesta a campo E de la TEM. La componente principal es claramente superior a las componentes residuales.

La memoria necesaria se acerca a los 70Mb para un modelo que tiene del orden de 1 millón de celdas. Este valor se ha obtenido discretizando la mayor parte del modelo a 5 mm y utilizando submeshes (zonas de discretización más fina) de 2 mm en el volumen útil mencionado anteriormente. El timestep necesario es de 3.3 ps siendo el tiempo de simulación total de 43ns. Cada una de las simulaciones lanzadas se completa en un tiempo aproximado de 8 horas. Es

importante destacar que se utilizó en la simulación un ordenador personal, un PIII a 766MHz y 1Gb de RAM.

CONCLUSIONES

La simulación de campos electromagnéticos es una técnica cada vez más usada y ya no pertenece solo al dominio de la investigación. Puede ser importante en la evaluación cualitativa de cambios en un diseño, reduciendo así el número de prototipos e incluso el *Time To Market*. Aun así los aspectos más cuantitativos aún están en una fase de verificación: los diseñadores extraen de la simulación «reglas de diseño» más que datos numéricos.

Actualmente estas herramientas ya no se relegan a grandes corporaciones provistas de recursos como supercomputadores. Un ordenador personal puede llegar a ser una plataforma suficiente para realizar proyectos de simulación permitiendo a las pequeñas empresas el acceso a estas técnicas.

LC es una herramienta perfecta para realizar los primeros en aspectos de simulación. También adolece de diversas limitaciones, que en algunos casos pueden ser superadas como se ha visto con la necesidad de generar una onda plana y la construcción de la celda TEM.

Por último destacar la gente, tanto de desarrollo como de investigación, implicada en estos temas que demuestran las posibilidades y la confianza que se ha puesto en este nuevo recurso que es la simulación EM.

REFERENCIAS

- [1] Q. Li, Y. Chen, and D. Ge, «Comparison Study of the PSTD and FDTD Methods for Scattering Analysis», *Microwave Opt. Technol. Lett.*, Vol. 25, no. 3, pp. 220-226, Mayo 2000.
- [2] Young-Seek Chung; Joo-Hiuk Son; Changyul Cheon; Song-Yop Hahn; «Propagation characteristics of free-space terahertz electromagnetic pulses», *Lasers and Electro-Optics, 1999. CLEO/Pacific Rim '99. The Pacific Rim Conference on*, Vol. 4, pp 1111 -1112, 1999
- [3] Yamauchi, J.; Kanbara, H.; Nakano, H.; «Analysis of optical waveguides with high-reflection coatings using the FD-TD method» *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, pp 111-113, Jan 1998.
- [4] A. Taflove «Advanced in Computational Electrodynamics, The finite-Difference Time-Domain Method», Artech House, 1998.

[5] Yee, K. S., «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media» IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 14, pp 302-307, 1966

[6] Materdey, T.; Gonzalez, S.; Gomez, R.; Garcia, B., «A new vision of numerical methods for the solution of Maxwell's equations related to the FD-TD method; application to general anisotropic media» . Computation in Electromagnetics, 1994. Second International Conference on , pp 138–141, Apr 1994.

[7] G.Mur, «ABC for the finite difference approximations of the time-domain electromagnetic field equations», IEEE trans. EMC, Vol. 23, pp 377-382, Nov-1981.

[8] J.P. Berenguer, «A PML for the absorption of electromagnetics waves», J Computational Phys., Vol. 114, pp 185-200, 1994.

[9] Ramón Ribó Rodríguez «Desarrollo de un sistema integrado para tratamiento de geometría y generación de malla y datos para el análisis por el método de los elementos finitos».

Tesis doctoral. Departamento de resistencia de materiales y estructuras de la Universitat Politècnica de Catalunya. Febrero de 2002.

[10] Quilez, M.; Silva, F.; Martin, A.; Fontanilles, J.; Riu, P.; «**Radiation pattern of a PCB based probe intended for near field measurements**», Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on , Vol. 2, pp 879-881, 1999.

[11] Silva, F.; Sanchez, F.; Riu, P.J.; Pallas-Areny, R.; «**Low-cost near-field probe for simultaneous E and H measurement with analog optical link**», Electromagnetic Compatibility, 1997. IEEE 1997 International Symposium on , pp 533-536, 18-22 Aug 1997.

[12] Crawford, M.L «The generation of standard EM field using TEM transmission cells», IEEE Trans on EMC-16, pp 189.