

Tipo de artículo: Artículo original  
Temática: Matemática computacional  
Recibido: 24/03/2014 | Aceptado: 30/05/2014

## Implementación en MatLab del método FDTD para el modelado de estructuras de microcinta

### *MatLab implementation of the FDTD method for microstrip structures modelling*

Adrian Iglesias Benitez<sup>1\*</sup>, Francisco Marante Rizo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Inmunoensayo. Calle 134 y Ave. 25 Cubanacán, Playa. CP 11600. La Habana, Cuba.

<sup>2</sup> Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Calle 114, Marianao, CP 11600. La Habana, Cuba.

\* Autor para correspondencia: [inpipeta1@cie.sld.cu](mailto:inpipeta1@cie.sld.cu)

---

#### Resumen

En el presente trabajo se analizan los fundamentos del Método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD), la implementación de las condiciones de frontera absorbentes, así como los criterios para su estabilidad y convergencia. Para evaluar las ventajas de la utilización del método FDTD se modela una antena de microcinta utilizando el entorno MatLab con el fin de determinar su diagrama de radiación de potencia normalizado tomando como referencia los resultados obtenidos mediante el software profesional de simulación CST Microwave Studio y el Método de Muestreo Biortogonal en el Dominio del Tiempo (SBTD).

**Palabras clave:** antenas, diferencias finitas, Matlab, microcinta.

#### Abstract

*In the present work the basics of the Finite Differences in the Time Domain Method (FDTD) are analyzed, absorbent boundary conditions are implemented and conditions for their convergence and stability are introduced. To evaluate the advantages of the use of FDTD method a microstrip antenna is modeled using MatLab environment and the normalized power pattern diagram is determined using as reference the results obtained with the professional software of simulation CST Microwave Studio and the Biortogonal Sampling in the Time Domain Method (SBTD).*

**Keywords:** antennas, finite differences, Matlab, microstrip.

## Introducción

En correspondencia con el desarrollo alcanzado en el diseño experimental de radiadores de microcinta (Elsadek, 2013), ha habido un gran incremento en el grado de sofisticación de los modelos numéricos disponibles para el análisis de estas estructuras (George, 2003). Al determinar cual técnica utilizar en el modelado de una antena, es necesario considerar las diferentes metodologías disponibles. Estas se dividen en dos grandes categorías: modelos empíricos y modelos de onda completa.

Los modelos empíricos generalmente asumen simplificaciones, fundamentalmente en lo concerniente al mecanismo de radiación de la antena. Fenómenos como la propagación por onda de superficie y la dispersión no son tomados en cuenta. Entre las aproximaciones que asumen simplificaciones se encuentran: el modelo de cavidad, el modelo de línea de transmisión y el modelo de red multipuerto (Sadiku, 2001), que caracterizan la antena en términos de elementos circuitales distribuidos y concentrados. Aunque la exactitud de estos modelos aproximados es limitada, son frecuentemente utilizados en el diseño de estructuras simples. Esto es debido a que brindan un buen estimado inicial del comportamiento de la estructura bajo análisis y son de gran ayuda para predecir la tendencia de sus características con la variación de los parámetros de diseño.

En contraste, los modelos de onda completa involucran una representación más rigurosa de la estructura de la antena, son capaces de analizar geometrías de forma arbitraria y pueden tomar en cuenta el efecto de varios tipos de alimentación. En general, estos modelos, son mucho más precisos y capaces de manejar una gran variedad de configuraciones estructurales a expensas de incrementar la complejidad computacional y el tiempo de diseño. Algunas de las aproximaciones más populares utilizadas en los modelos de onda completa incluyen el Método de los Momentos (MoM, del inglés “Method of Moments”), el Método de los Elementos Finitos (FEM, del inglés “Finite Element Method) y el Método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD, del inglés “Finite Difference in Time Domain”) (Taflove, 2000).

El MoM fue por primera vez aplicado al análisis de antenas de microcinta en 1981, y desde entonces ha sido constantemente modificado para analizar estructuras más complejas y con mayor grado de precisión. El análisis MoM

puede llevarse a cabo tanto en el dominio espacial como espectral. El análisis en el dominio espacial involucra algún tipo de ecuación integral de Somerfeld, mientras que en el dominio espectral tiene la ventaja de evaluar en su formulación funciones de Green<sup>1</sup> con forma cerrada. Sin embargo, aunque esta técnica es conveniente en el manejo de estructuras de microcinta planares montadas sobre grandes planos de tierra y es capaz de modelar gran variedad de estructuras de alimentación, necesita de un extensivo procesamiento para construir la función de Green requerida para una geometría dada, además los resultados obtenidos son muy sensibles a las funciones bases y de muestreo utilizadas.

A diferencia del MoM, el FEM utiliza una aproximación volumétrica, que lo habilita para modelar convenientemente heterogeneidades. También puede ser adaptado para modelar rasgos estructurales sin sacrificar exactitud. La habilidad de usar tetraedros y prismas como elementos base, permite una precisa caracterización geométrica de la estructura. Otra característica atractiva del método es la habilidad de visualizar los campos en el dominio en que están siendo modelados a medida que se va resolviendo el problema. Aunque el FEM ha sido ampliamente utilizado en el análisis de circuitos de microondas, no puede decirse lo mismo acerca de su aplicación al análisis de antenas de microcinta, sobre todo cuando se trata de un entorno complejo. Una razón para esto es que el truncamiento de la malla para regiones abiertas todavía presenta dificultades. Sin embargo algunos problemas que no encuentran una solución factible en el FEM, pueden resolverse utilizando un híbrido que combina las aproximaciones FEM y MoM, aunque aún no se ha extendido su uso al problema de las antenas de microcinta.

El método FDTD ha recibido la mayor atención en la comunidad del electromagnetismo debido a que se ha aplicado satisfactoriamente en el modelado de antenas con diferentes estructuras (Peng, 2007; Pinho, 2007; Pascaud, 2007). Esta técnica es muy útil para manejar configuraciones complejas de antenas de microcinta, debido a que puede modelar convenientemente las numerosas heterogeneidades que se encuentran en este tipo de estructuras. Además presenta otra ventaja sobre los métodos que trabajan en el dominio de la frecuencia, y es que puede generar las características de la antena sobre un amplio rango de frecuencias con una sola simulación (Apaydin, 2013). Este esquema requiere  $O(N)$  multiplicaciones para actualizar  $N$  nodos de la malla de simulación, mientras que la matriz de  $N \times N$  utilizada en el MoM requiere  $O(N^3)$  multiplicaciones para su inversión. Antenas de microcinta de

---

<sup>1</sup> Uno de los problemas fundamentales de la teoría de los campos es la construcción de soluciones de ecuaciones diferenciales lineales cuando se tiene una fuente específica y la ecuación diferencial debe satisfacer determinadas condiciones de contorno. Las funciones de Green que proveen de un método para obtener dichas soluciones, deben su nombre a George Green (1793–1841).

estructura simple fueron por primera vez modeladas utilizando el método FDTD por A. Reinneix y B. Jecko en 1989 (Taflove, 2000), desde entonces muchas configuraciones diferentes como parches parásitos acoplados, antenas activas, arreglos de dos elementos en fase y antenas de microcinta montadas sobre superficies curvas fueron exitosamente analizadas con esta aproximación (Sadiku, 2001).

Por otra parte, el entorno MatLab ha ganado la popularidad del sector científico y profesional como plataforma para el desarrollo de modelos matemáticos y la implementación de un gran número de métodos numéricos. MatLab cuenta con un lenguaje de programación de alto desempeño diseñado para realizar cálculos técnicos. Integra el cálculo, la visualización y la programación en un ambiente fácil de utilizar donde los problemas y las soluciones se expresan en una notación matemática. MatLab es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es el arreglo que no requiere de dimensionamiento previo. Esto permite resolver muchos problemas computacionales, específicamente aquellos que involucren vectores y matrices, en un tiempo mucho menor al requerido para escribir un programa en un lenguaje escalar no interactivo tal como C o Fortran. El método FDTD resuelve un sistema de ecuaciones algebraicas que puede expresarse eficientemente utilizando notación matricial (Luo, 2008). Pudiera considerarse entonces, la implementación en MatLab del método FDTD como alternativa a las aplicaciones para la simulación de antenas que solo pueden adquirirse a altos costos en el mercado internacional. Además, teniendo en cuenta que la implementación a la medida de un modelo de una estructura de microcinta utilizando el método FDTD presenta otras ventajas importantes:

1. El método FDTD es integral en el sentido de que su aplicación conduce a la solución del problema interno y del externo en la zona cercana e intermedia. Obsérvese que el proceso de solución del método FDTD no se circunscribe a la superficie de la antena, sino que abarca una región del espacio alrededor de la misma.
2. El método FDTD no utiliza álgebra lineal. Al ser un procedimiento completamente explícito, el método FDTD evita las dificultades relacionadas con el álgebra lineal que limitan el tamaño de los modelos electromagnéticos basados en elementos finitos y ecuaciones integrales en el dominio de la frecuencia.
3. El método FDTD es preciso y robusto. Las fuentes de error en el cálculo FDTD son bien conocidas y pueden limitarse para permitir modelos precisos sobre una gran variedad de problemas electromagnéticos.
4. El método FDTD trata el comportamiento impulsivo de manera natural. Al ser una técnica en el dominio del tiempo, se calcula directamente la respuesta al impulso del sistema electromagnético.

5. El método FDTD trata el comportamiento no lineal de manera natural. Al ser una técnica en el dominio del tiempo, se calcula directamente la respuesta no lineal de cualquier sistema electromagnético. La técnica FDTD permite especificar el tipo de medio en cualquier punto del dominio de interés, de forma que pueden ser modelados de manera fácil y natural una gran variedad de materiales lineales y no lineales.
6. El método FDTD es una aproximación sistemática. Con él, la especificación de una nueva estructura a ser modelada reduce el problema a la generación de la malla de nodos, sin la necesidad de reformular una potencialmente compleja ecuación integral. Por ejemplo, no se requiere del cálculo de funciones de Green dependientes de las estructuras a analizar.
7. En el método FDTD al calcular los campos eléctrico y magnético en todos los puntos del dominio de interés a medida que evoluciona el tiempo, permite visualizar la dinámica del campo electromagnético en el modelo.

Considerando estos elementos, se plantea como objetivo principal de este trabajo la implementación en MatLab del método FDTD y su aplicación al modelado de una estructura de microcinta.

## Materiales y métodos

El método FDTD es un procedimiento computacional para resolver las ecuaciones de Maxwell directamente en el dominio del tiempo. Su aplicación para la solución de problemas electromagnéticos fue propuesta por K. S. Yee en 1966 (Taflove, 2000) El algoritmo se basa en el muestreo volumétrico de las componentes del campo eléctrico,  $\bar{E}$ , y el campo magnético,  $\bar{H}$ , dentro y alrededor de la estructura de interés en un período de tiempo determinado. Las ecuaciones rotacionales de Maxwell en un medio isotrópico, lineal, no dispersivo y con pérdidas pueden describirse a través de las expresiones:

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{E} - \frac{1}{\mu} (\bar{M}_{\text{fuente}} + \sigma^* \bar{H}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \bar{H} - \frac{1}{\varepsilon} (\bar{J}_{\text{fuente}} + \sigma \bar{E}) \quad (2)$$

Que a su vez se descomponen en seis ecuaciones escalares en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - \frac{1}{\mu} (M_{\text{fuente}}^x + \sigma^* H_x) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) - \frac{1}{\mu} (M_{\text{fuente}}^y + \sigma^* H_y) \quad (3b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - \frac{1}{\mu} (M_{\text{fuente}}^z + \sigma^* H_z) \quad (3b)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) - \frac{1}{\varepsilon} (J_{\text{fuente}}^x + \sigma E_x) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) - \frac{1}{\varepsilon} (J_{\text{fuente}}^y + \sigma E_y) \quad (4b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - \frac{1}{\varepsilon} (J_{\text{fuente}}^z + \sigma E_z) \quad (4c)$$

Para que la solución de este sistema de ecuaciones sea única se deben satisfacer:

1. Condiciones iniciales: El valor de las componentes del campo electromagnético en el instante de tiempo  $t = 0$  debe especificarse para todo el dominio de interés. Se asume cero excepto en el plano de excitación.
2. Condiciones de frontera: Deben conocerse las componentes tangenciales de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  en el límite del dominio de interés para todo instante de tiempo  $t > 0$ .

### Esquemas de Diferencias Finitas

Dada la función mostrada en la figura 1 se puede aproximar su derivada, pendiente o tangente en el punto, por la pendiente del arco **PB**, obteniéndose la fórmula de diferencia finita hacia delante (5a), o la pendiente del arco **AP**, resultando en la fórmula de diferencia finita hacia atrás (5b), o por la pendiente del arco **AB**, produciendo la fórmula de diferencia finita central (5c).

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (5a)$$

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \quad (5b)$$

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (5c)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales de Maxwell aplicando el método FDTD deben reemplazarse las derivadas respecto al espacio y al tiempo por esquemas de diferencia finita.

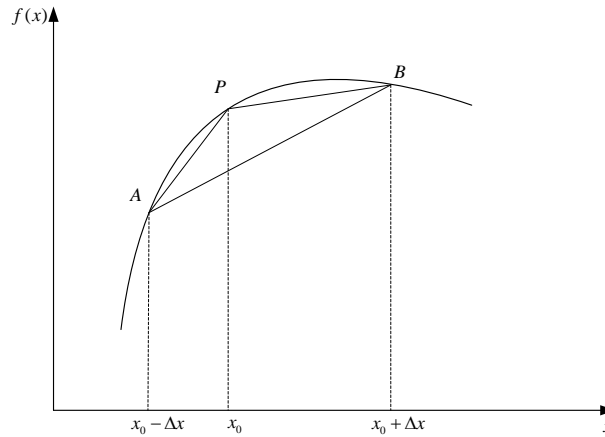


Figura 1. Esquemas de diferencias finitas.

### Algoritmo de Yee

Para aplicar los esquemas de diferencia finita a las Ecuaciones de Maxwell en tres dimensiones, la región donde va a resolverse el problema se divide en un conjunto de particiones espaciales denominadas celdas de Yee (Taflove, 2000). Una de estas celdas puede observarse en la figura 3. La ecuación (5) implica que las componentes  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  deben conocerse solamente en los puntos discretos  $(x_i, y_j, z_k)$  donde  $x_i = i\Delta x$ ,  $y_j = j\Delta y$  y  $z_k = k\Delta z$  siendo  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$  las dimensiones de la grada espacial. La propiedad más notable de estas celdas es que la posición de las diferentes componentes de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  satisfacen las ecuaciones de Maxwell tanto en forma diferencial como integral.

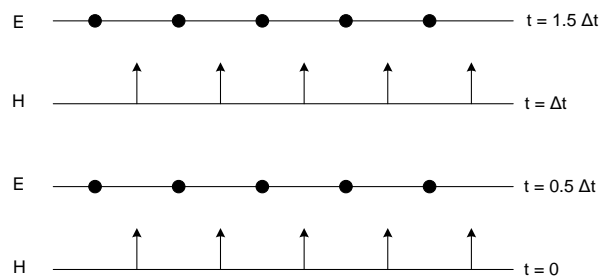


Figura 2. Evolución en el tiempo del cálculo de las componentes del campo electromagnético.

No sólo la colocación de los nodos de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  están desplazados en medio intervalo espacial, sino que el instante de tiempo en que se calcula cada componente también se encuentra desplazado en medio intervalo temporal. Esto proporciona un algoritmo en el cual las componentes  $\vec{H}$  son calculadas en el instante de tiempo  $n\Delta t$  y las componentes  $\vec{E}$  en el instante de tiempo  $(n + 1/2)\Delta t$ , donde  $\Delta t$  representa la grada de discretización en el tiempo, véase la figura 2.

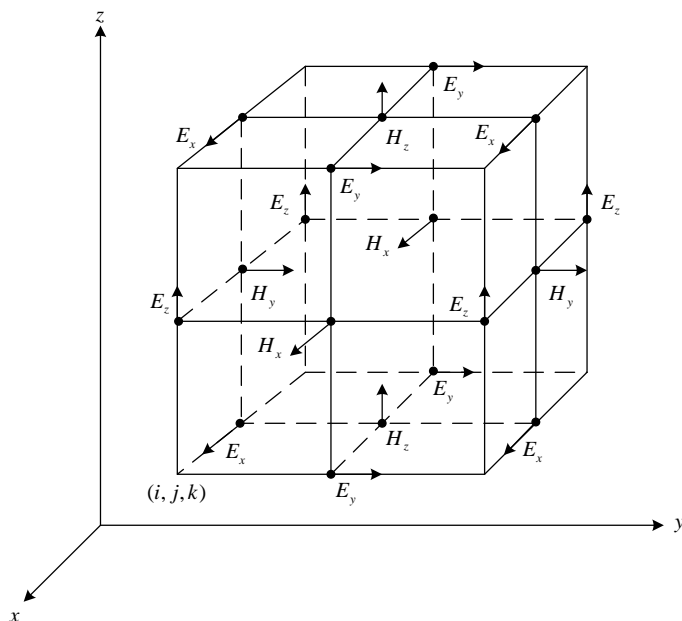


Figura 3. Celda de Yee.

### Condiciones de frontera absorbentes

Para la modelación de una antena radiante situada en el espacio libre se desea que las ondas electromagnéticas se propaguen en un espacio sin fronteras, pero no existe ningún equipo de cómputo que pueda almacenar un número infinito de datos, debido a lo cual la región de solución debe ser truncada. Las condiciones de frontera absorbentes son necesarias para simular adecuadamente la propagación del campo electromagnético una vez que éste ha llegado al límite de la malla de simulación (Berenger, 1994).



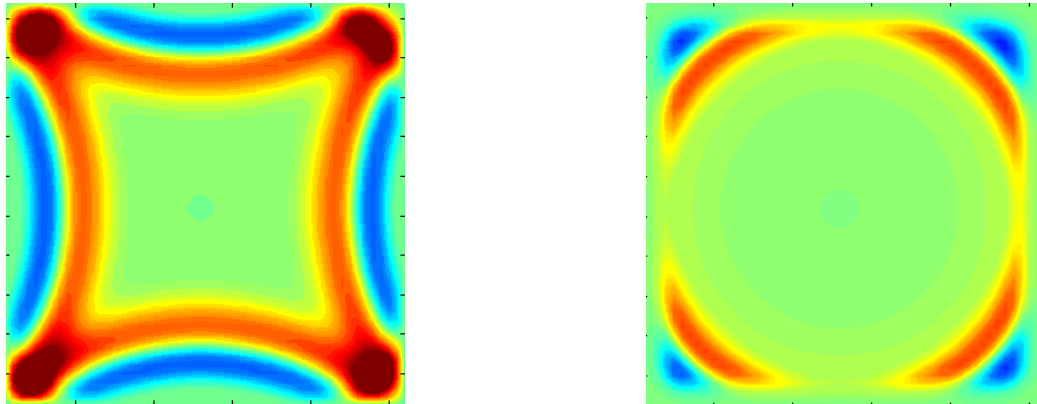


Figura 4. Reflexión en el PEC y absorción en la PML del campo electromagnético en la frontera del dominio de simulación respectivamente.

En el método numérico FDTD, el valor del campo electromagnético en cada punto del espacio se determina mediante el promedio del valor del campo en los puntos vecinos. Pero en la frontera de la malla de simulación este promedio no se puede calcular porque no se conoce el valor del campo fuera de ella. Si se asume que el campo electromagnético es cero, o sea, que el exterior del dominio de simulación está rodeado por un conductor ideal perfecto (PEC), cuando los campos radiados alcanzan el límite del dominio de solución son reflejados de vuelta al dominio FDTD e interfieren en la simulación.

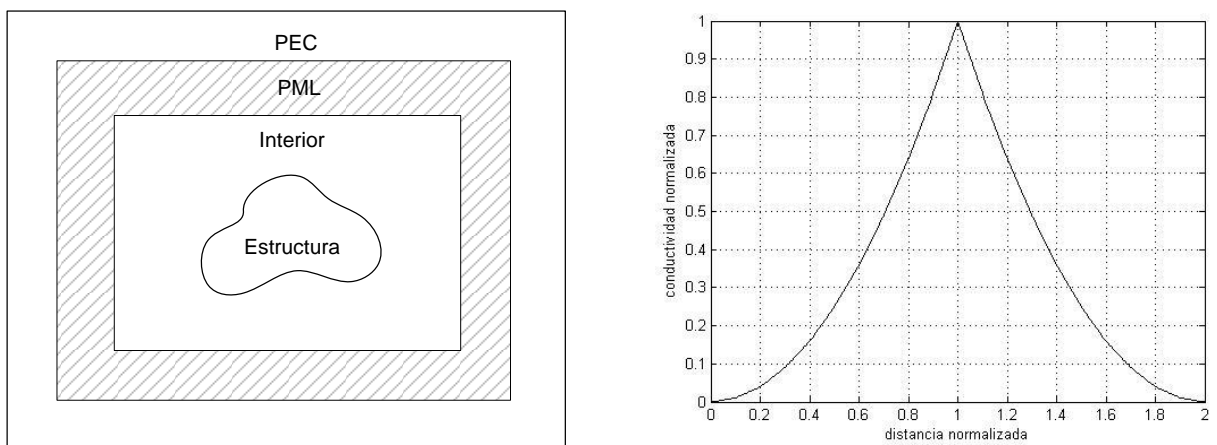


Figura 5. Dominio de modelación y perfil de conductividad cuadrático respectivamente.

Una alternativa para implementar las condiciones de frontera absorbentes (ABC, del inglés “Absorbing Boundary Conditions”), consiste en terminar la frontera exterior de la malla de simulación con un medio material absorbente, de manera análoga al tratamiento físico que se da a las paredes de una cámara anecóica (Benavides, 2011). Idealmente, este medio absorbente tiene el grosor de unas pocas celdas e impide la reflexión de todas las ondas incidentes sobre todo el espectro de frecuencias. Con este fin J. P. Berenger en 1994 introdujo el concepto de capa perfectamente acoplada (PML, del inglés “Perfect Matched Layer”), véase la figura 5. La técnica PML separa las seis componentes vectoriales cartesianas del campo electromagnético en dos partes e introduce conductividades eléctricas y magnéticas para provocar su rápida atenuación. Las diferentes porciones de la PML que limitan la región interior se describen en términos de las conductividades  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ . Por ejemplo, para caracterizar la cara  $x$ ,  $\sigma_y = 0$  y  $\sigma_z = 0$ , para la arista  $xy$   $\sigma_z = 0$ , y para definir el vértice  $xyz$  las conductividades  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son diferentes de cero, véase la figura 6.

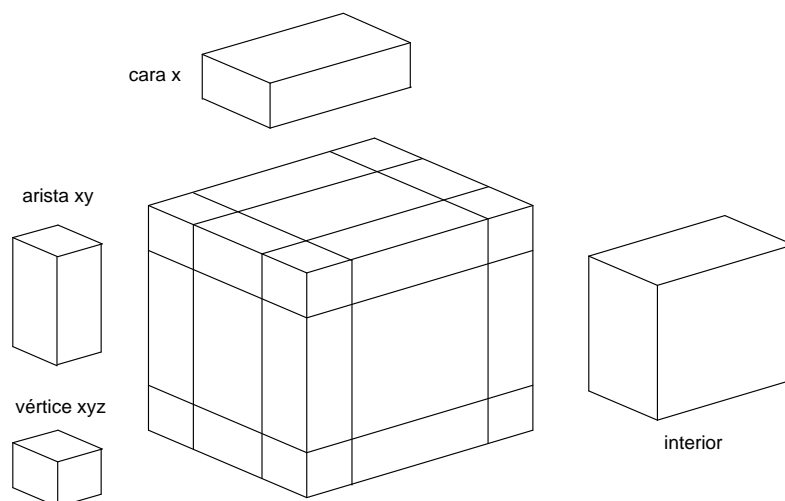


Figura 6. Porciones de la región PML.

En la interface con la PML se desea que las ondas electromagnéticas se propaguen sin ninguna reflexión. Una vez que las ondas penetren en la región PML éstas deben ser atenuadas y absorbidas. La condición necesaria para que no ocurran reflexiones mientras las ondas se propagan a través de la interfaz es el acoplamiento de impedancia entre las dos regiones. En aplicaciones prácticas se define el grosor de la capa entre cuatro y dieciséis celdas, donde la conductividad se incrementa de cero, en la interfaz Aire – ABC, hasta un valor máximo en el límite de la región de solución. Como la ABC está terminada en un PEC, cuando las ondas electromagnéticas alcanzan la frontera exterior

de la ABC, ocurre una reflexión total y viajarán de regreso, siendo atenuadas una vez más antes de volver al dominio FDTD minimizándose su influencia en la solución.

### Estabilidad y Convergencia

La aproximación de diferencia finita es válida solamente si la solución es convergente y estable. Una solución inestable y no convergente puede ocurrir al seleccionar un valor inadecuado de  $\Delta t$  para los intervalos espaciales  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$ . La inestabilidad o la no convergencia no son debidas a la acumulación de errores sino a la casualidad. El problema de la convergencia consiste en la determinación de las condiciones bajo las cuales la diferencia entre la solución exacta y la solución aproximada en un punto cualquiera del espacio de cuatro dimensiones (las tres dimensiones espaciales y el tiempo) tiende a cero en la medida que las dimensiones de las celdas  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  y  $\Delta t$  tienden a cero (Remis, 2000). Es evidente que mientras más pequeñas sean las celdas, mayor será el volumen de cálculos a realizar y mayor será por tanto el tiempo de simulación y la memoria exigida al medio de computación.

El problema de la estabilidad está relacionado directamente con el problema de la convergencia, consiste en la determinación de las condiciones bajo las cuales la diferencia entre la solución exacta y la aproximada se mantiene limitada cuando las dimensiones de las celdas tienden a cero. Si la ecuación diferencial corresponde a un problema de contorno que ha sido correctamente planteado<sup>2</sup>, la estabilidad es una condición necesaria y suficiente para garantizar la convergencia de las soluciones. Los problemas electromagnéticos definidos mediante las ecuaciones de Maxwell donde se han establecido condiciones iniciales y de frontera en un dominio, que en principio, tiene dimensiones infinitas, representan un problema de contorno correctamente planteado conocido como problema de Cauchy.

El criterio de estabilidad del algoritmo propuesto por Yee se resume a la condición de Courant (Remis, 2000; Werner, 2013):

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Donde  $c$  es la máxima velocidad de fase de la onda en el dominio considerado.

---

<sup>2</sup> Un problema de contorno y de condiciones iniciales se considera correctamente planteado si ante pequeñas variaciones de las condiciones de contorno e iniciales, la variación de la solución es arbitrariamente pequeña.

Otro aspecto a tener en cuenta en los modelos matemáticos que emplean el método FDTD está relacionado con la anisotropía numérica, es decir la dependencia de la velocidad de fase de la onda con relación a la dirección de propagación en el reticulado de celdas que surge del proceso numérico. Para que este error se considere despreciable<sup>3</sup>, en el modelo tridimensional en el espacio, se requiere que las celdas cumplan la condición (Remis, 2000; Werner, 2013):

$$\Delta \leq \frac{\lambda_{\min}}{20} \tag{7}$$

Donde  $\lambda_{\min}$  es la menor longitud de onda que se desea analizar y  $\Delta$  la menor dimensión de la grada espacial.

## Resultados y discusión

Aunque las antenas de microcinta formadas por un solo parche rectangular han sido analizadas extensivamente a lo largo de las pasadas décadas (Balanis, 2007), estas constituyen un estándar de comparación para verificar la exactitud de métodos numéricos como FDTD.

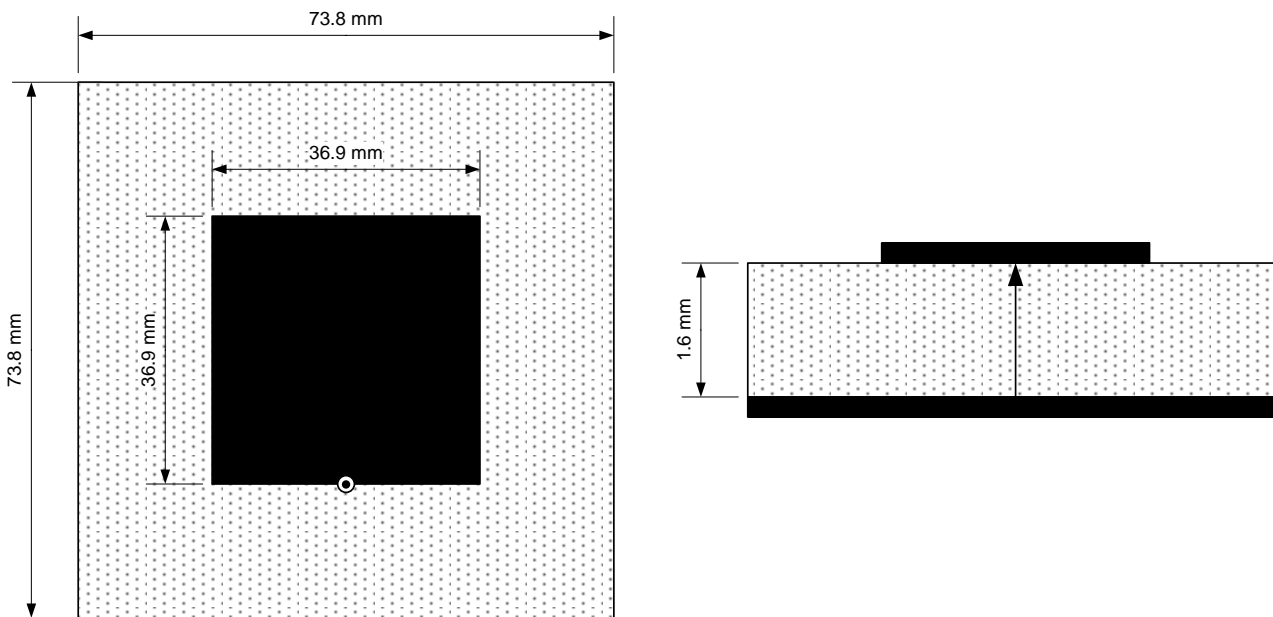


Figura 7. Estructura analizada.

<sup>3</sup> Del orden de un grado de error de fase por unidad de longitud de onda.

La antena que se consideró está compuesta por un parche cuadrado de dimensiones  $36.9\text{mm} \times 36.9\text{mm}$  y un plano de tierra de dimensiones  $73.8\text{mm} \times 73.8\text{mm}$ . Está montada sobre un sustrato FR4 de grosor  $1.6\text{mm}$  cuya constante dieléctrica relativa es  $\epsilon_r = 4.4$  y se ha asumido que no tiene pérdidas. Se utilizó una discretización uniforme conforme al esquema  $3.6\text{mm} \times 3.6\text{mm} \times 0.8\text{mm}$  que permite contar con aproximadamente 23 celdas por longitud de onda. El parche y el plano de tierra fueron modelados utilizando una capa de material PEC infinitamente fina. Se seleccionó un espacio de 40 celdas entre la estructura radiante y las condiciones de frontera absorbentes, las cuales fueron implementadas utilizando una ABC de seis celdas de grosor con un perfil cuadrático de conductividad para un coeficiente de reflexión de incidencia normal máximo de  $10^{-5}$ .

El dominio computacional total está definido por  $116 \times 116 \times 51$  celdas que se traduce en  $686256$  celdas. Para implementar la fuente de alimentación se utilizó el modelo de señal fuerte aplicado a un puerto discreto, que se define a partir de dos puntos que conectan el parche radiante y el plano de tierra. Como señal de excitación se seleccionó un pulso Gaussiano de duración 1ns con el cual se puede obtener la respuesta del sistema en torno a la frecuencia de resonancia 1.8GHz (Godara, 2002).

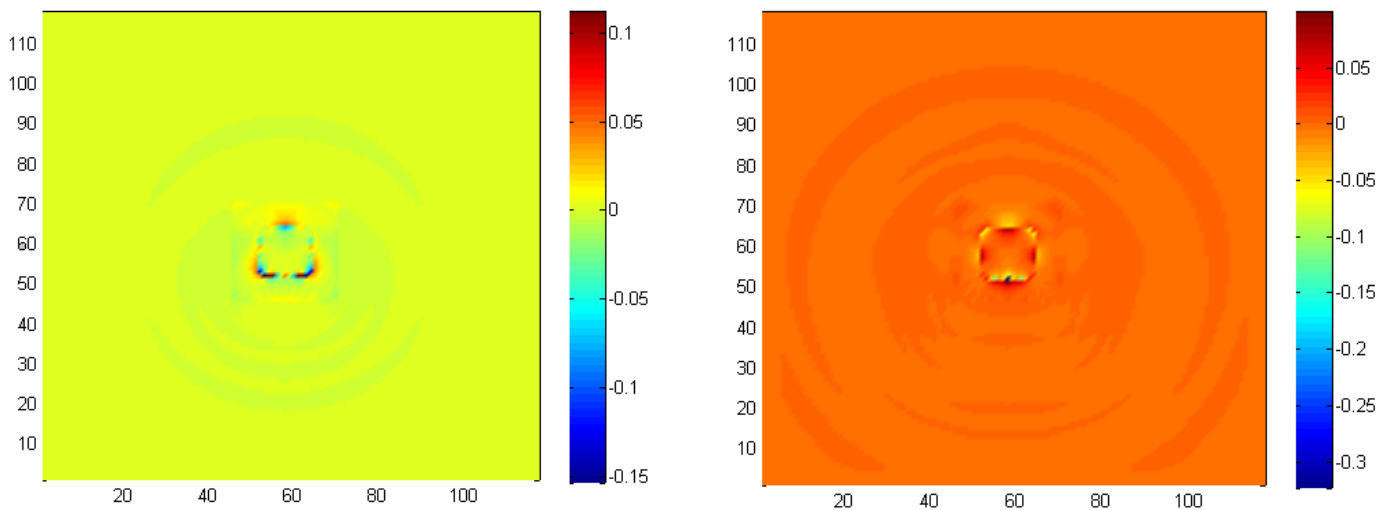


Figura 8. Simulación en MatLab de los campos radiados normalizados.

Los valores de las componentes del campo electromagnético resultantes de las ecuaciones del método FDTD representan la respuesta en el tiempo de la estructura bajo análisis en la zona cercana. Mediante el empleo de la transformación campo cercano – campo lejano (NTFFT, del inglés “Near To Far Field Transformation”) (Bushyager, 2005) que se deriva del principio de equivalencia electrodinámica (Shrestha, 2013), se obtuvo el diagrama de radiación normalizado de la antena. Para comprobar la validez del método numérico FDTD implementado en MatLab, se comparan los diagramas de radiación resultantes de la simulación FDTD con los obtenidos a través del software profesional de simulación CST Microwave Studio y el método SBTB (Bushyager, 2005), véase la figura 9.

El programa de simulación CST Microwave Studio de la empresa CST (“Computer Simulation Technology”), es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en tres dimensiones de componentes de alta frecuencia. Implementa métodos de análisis de tipo onda completa, concretamente el método FDTD. El módulo “Transient Solver” ha sido el utilizado en las simulaciones efectuadas. Es la herramienta más flexible del programa y permite simular la mayoría de los problemas electromagnéticos.

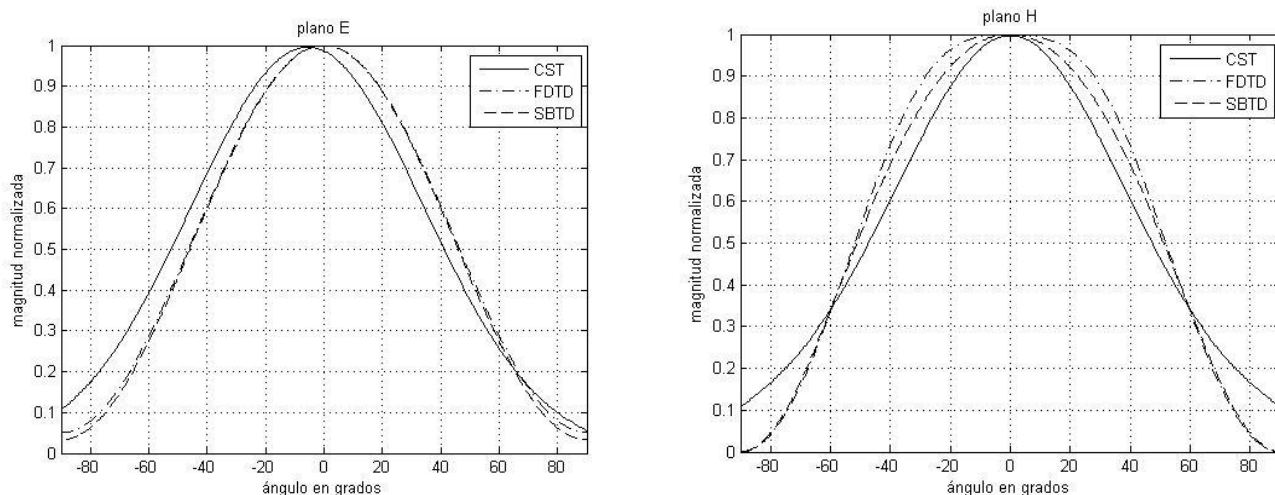


Figura 9. Diagrama de radiación en el plano **E** y en el plano **H** respectivamente.

Nótese que los resultados obtenidos concuerdan entre sí. Las discrepancias que se aprecian pueden ser producto de varias simplificaciones utilizadas, entre las que vale citar la aplicación de un puerto discreto como forma de alimentación utilizando el modelo de excitación fuerte (Benkler, 2007; Costen, 2007), que impide la propagación de

la onda reflejada de vuelta a la línea de transmisión; y la asunción de que la antena de microcinta radia solo en medio espacio.

## Conclusiones

En este trabajo se presentaron las bases de la técnica FDTD y los fundamentos de la implementación de las condiciones de frontera absorbentes. A manera de resumen puede plantearse que las técnicas de diferencia finita están basadas en aproximaciones que permiten reemplazar las ecuaciones diferenciales por ecuaciones de diferencia finita. La solución de un problema aplicando el método FDTD implica tres pasos básicos: dividir la región a modelar en una red de nodos para formar un conjunto de particiones espaciales conocidas como celdas de Yee, aproximar la ecuación diferencial a su equivalente en diferencia finita, y resolver las ecuaciones de diferencia finita de acuerdo a las condiciones iniciales y de frontera. Para demostrar la validez del método FDTD como alternativa a las costosas aplicaciones existentes en el mercado internacional para modelar antenas, se simuló en MatLab una estructura de microcinta y se validaron los resultados a partir de una comparación con el software profesional de simulación CST Microwave Studio y el Método de Muestreo Biortogonal en el Dominio del Tiempo.

## Referencias

- APAYDIN, G. An FDTD-based waveguide filter simulator: Calibration against analytical models. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*; 2013.
- BALANIS, C. *Antenna Theory, Analysis and Design*. Arizona: John Wiley & Sons; 2007.
- BENAVIDES, M. A novel set of reduced equations to model perfect layer matched (PML) in FDTD. *Revista Mexicana de Física*; 2011.
- BENKLER, S. *FDTD Subcell Models Powering Latest Progress in Computational Antenna Optimization*. Honolulu, Hawaii, USA; IEEE Antennas and Propagation Society, 2007.
- BERENGER, J. *A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves*. Computational Physics; 1994.
- BUSHYAGER, N. *MRTD (Multiresolution Time Domain) Method in Electromagnetics*. Morgan & Claypool; 2005.
- COSTEN, F. Accuracy Assessment of the Soft source Implementation for a Dipole in FD-FDTD for UWB Systems. Honolulu, Hawaii, USA; IEEE Antennas and Propagation Society, 2007.

- ELSADEK, H.A. Microstrip Antennas: Future Trends and New Applications. International Journal of Antennas and Propagation; 2013:1.
- GODARA, L. Handbook of Antennas in Wireless Communication. CRC Press; 2002.
- GEORGE, W. Wavelets in Electromagnetics and Device Modeling. Arizona: John Wiley & Sons; 2003.
- LUO, S. A compact one-dimensional modal FDTD method. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields - Special Issue on Frontiers of Applied Computational Electromagnetics; 2008:15-27.
- PASCAUD, R. New DG-FDTD Method: Application to the Study of a MIMO Array. Honolulu, Hawaii, USA; IEEE Antennas and Propagation Society, 2007.
- PENG, S. Efficient Numerical Modeling of 3D Electromagnetic Scattering by Using Graphics Rendering Devices. Honolulu, Hawaii, USA; IEEE Antennas and Propagation Society, 2007.
- PINHO, P. Adaptive Finite Difference Schemes Based on Interpolating Wavelets for Solving 2D Maxwell's Equation. Honolulu, Hawaii, USA; IEEE Antennas and Propagation Society, 2007.
- REMIS, R. F. On the Stability of the Finite-Difference Time-Domain Method. Journal of Computational Physics; 2000.
- SADIKU, M. Numerical Techniques in Electromagnetics. Arizona: CRC Press; 2001.
- SHRESTHA, S. Comparative Study of Antenna Designs for RF Energy Harvesting. International Journal of Antennas and Propagation; 2013.
- SULLIVAN, D. Electromagnetic Simulation Using FDTD Method. Boston: IEEE Press; 2000.
- TAFLOVE, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House; 2000.
- WERNER, G. R. A More Accurate, Stable, FDTD Algorithm for Electromagnetics in Anisotropic Dielectrics. Computational Physics; 2013:30.