

# SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA GLOBAL DE CIRCUITOS DE MICROONDAS USANDO EL MÉTODO FDTD (ELEMENTOS PASIVOS Y ACTIVOS)

Julián Alberto Herrera\*, Néstor Misael Peña\*\*

## RESUMEN

*Se presenta el desarrollo de un simulador electromagnético 3D de circuitos de microondas usando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) el cual incluye una extensión para la inclusión de elementos activos en la simulación electromagnética, la cual permite realizar una simulación global de los circuitos. La validación del simulador se realiza con resultados disponibles en la literatura y con simuladores comerciales, para circuitos en tecnología de microcintas y guías de ondas.*

## ABSTRACT

*We present the development of an electromagnetic simulator for 3D microwave circuits based on the finite-difference time-domain method (FDTD). The simulator implements an extension of the method to include lumped and active elements in the full wave circuit simulation. The validation is performed against available results in the technical literature and also using commercial electromagnetic simulators, especially for microstrip circuits and waveguides.*

**Palabras Clave:** Circuitos microondas, Simulación Electromagnética, FDTD, Elementos activos, Elementos no-lineales.

## 1. INTRODUCCIÓN

La saturación del espectro electromagnético y la creciente demanda de dispositivos cada vez más compactos han empujado a la industria electrónica a hacer uso de frecuencias cada vez más altas. Los últimos microprocesadores de consumo masivo trabajan a frecuencias por encima de 2 GHz y los dispositivos WLAN, en la banda ISM (0.9, 2.4 y 5.8 GHz), son vistos como elementos importantes de la próxima

revolución en conectividad. Estos nuevos dispositivos operan en la banda de las microondas (banda centimétrica y milimétrica), tradicionalmente definida entre 1 y 300 GHz.

La electrónica a frecuencias tan elevadas requiere de nuevos conceptos y afronta dificultades fundamentalmente diferentes a las encontradas a frecuencias por debajo de 1 GHz. La predicción precisa del funcionamiento de un circuito de microondas requiere tener en cuenta la configuración de los campos electro-

\* Estudiante de Magister, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, ju-herre@uniandes.edu.co

\*\* Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, npena@uniandes.edu.co

magnéticos y su interacción con los diferentes componentes del circuito. La obtención de una solución de onda completa (solución de las ecuaciones de Maxwell) por su parte requiere de métodos numéricos en casi la totalidad de los casos prácticos.

A pesar de los avances en electromagnetismo computacional y las demandas crecientes en la industria, el desarrollo de simuladores electromagnéticos con capacidad de realizar una simulación global (circuitos con componentes agrupados lineales y no-lineales y distribuidos) es un tema de investigación todavía muy activo.

El interés de este trabajo es contribuir al cuerpo de técnicas que se han venido desarrollando desde comienzos de los años 90 [1] para simular circuitos híbridos (elementos agrupados y distribuidos) de microondas en el dominio del tiempo.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA DE CIRCUITOS DE MICROONDAS

El rasgo característico de la ingeniería de microondas es que las dimensiones de los dispositivos son comparables a la longitud asociada a la frecuencia de operación (desde menos de un milímetro hasta unos cuantos centímetros). Además es común la propagación en modos no-TEM y la presencia de modos evanescentes. Cantidades de circuito como por ejemplo el voltaje sólo están bien definidas cuando los campos son cuasiestáticos o tiene lugar propagación en el modo TEM. Claramente las leyes de Kirchhoff no proporcionan en el régimen de microondas una descripción adecuada de la dinámica del circuito. Si a bajas frecuencias es la topología de un circuito la que determina su comportamiento, a frecuencias de microondas la geometría tiene un papel fundamental.

Para la fabricación de circuitos de microondas, la tecnología de microcintas tiene una gran acogida por su bajo costo. Ésta consiste en imprimir sobre un sustrato dieléctrico un motivo

conductor de acuerdo con el diseño del circuito. En la cara opuesta del dieléctrico se pone una capa conductora a modo de plano de tierra. La figura 1 muestra una línea de transmisión implementada en tecnología de microcintas a modo de ejemplo.

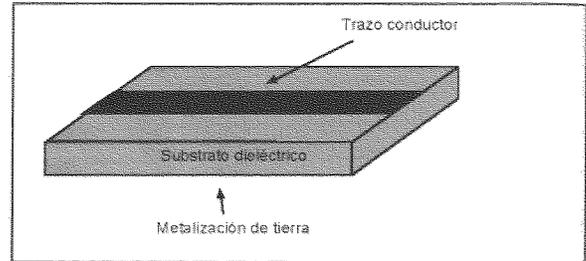


Figura 1. Estructura de una línea de microcintas.

Muchos circuitos activos de microondas incluyen también elementos agrupados como diodos y transistores. Los circuitos de microondas son esencialmente de naturaleza distribuida. Un dispositivo que combina elementos agrupados con componentes distribuidos se conoce como un circuito híbrido (ver figura 2). En la etapa de diseño de tales circuitos se debe prestar especial atención al trazado de los conductores («layout») y la ubicación de los componentes agrupados.

Los circuitos de microondas se caracterizan mediante la matriz de parámetros de repartición (matriz [S]), cuyos elementos representan coeficientes de transmisión y reflexión bajo condiciones de adaptación, los cuales se miden mediante los analizadores de redes [2].

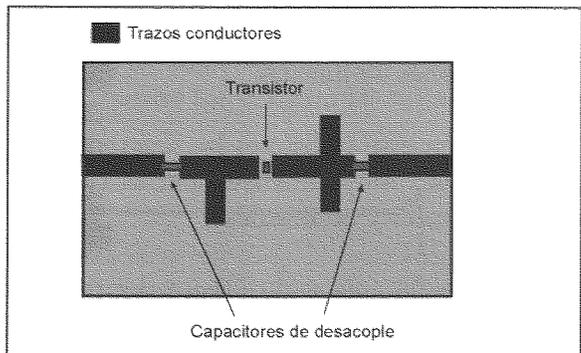


Figura 2. Ejemplo de un circuito híbrido de microondas en tecnología de microcintas. La geometría de los trazos conductores determina las características de las redes de acople conectadas al transistor.

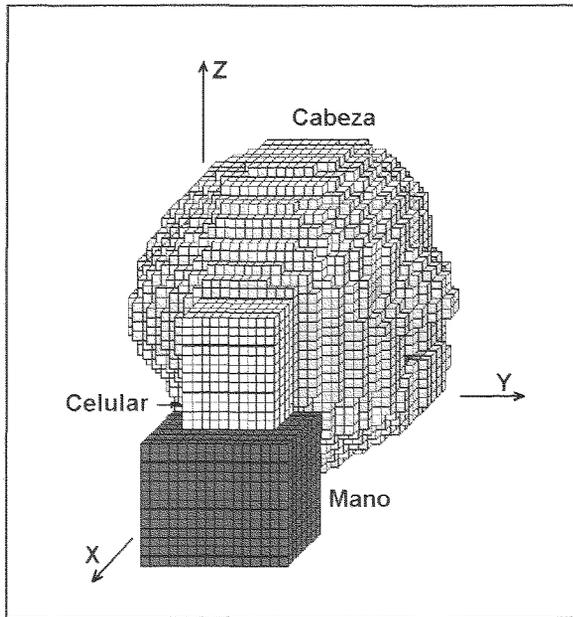


Figura 4. Discretización de una cabeza humana en celdas cúbicas para el estudio de los efectos de la radiación de un teléfono celular sobre el cerebro.

### 3.2 Aplicaciones del método FDTD

El método FDTD por su gran flexibilidad es aplicable en casi todas las áreas del electromagnetismo computacional aunque tradicionalmente ha sido utilizado en [5]-[6]:

- Cálculo de secciones de radar
- Estudios sobre los efectos de pulsos electromagnéticos (EMP)
- Obtención de los modos de cavidades resonantes y guías de ondas
- Caracterización de circuitos de muy alta frecuencia
- Simulación de sistemas electromagnéticos con regiones no lineales.

El énfasis en este trabajo es la caracterización de circuitos a muy altas frecuencias con elementos lineales y no-lineales.

Para ilustrar la aplicación clásica del método FDTD se muestran inicialmente ejemplos de aplicación a estructuras pasivas: la obtención de los modos fundamentales de una cavidad y el cálculo de los parámetros [S] de un circuito en tecnología de microcintas.

#### 3.2.1 Obtención de los modos de una cavidad resonante

El cálculo analítico de las frecuencias propias de una cavidad resonante como la de la figura 5 es por lo general demasiado complejo y en los pocos casos prácticos en los que se puede llegar a una expresión cerrada, ésta resulta de limitada utilidad.

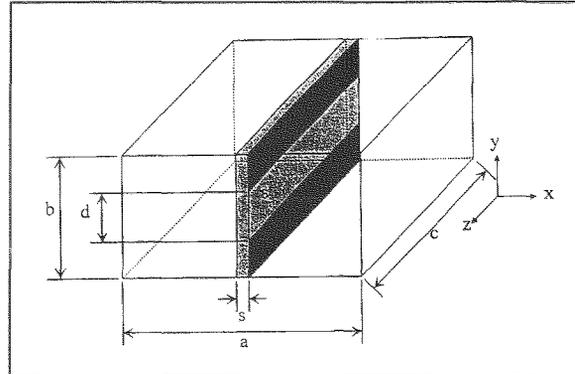


Figura 5. Cavidad resonante cargada con dieléctrico (tomado de [7]).

La simulación electromagnética puede proporcionar una solución en unos pocos minutos con niveles de error típicamente inferiores al 3%. La figura 6 muestra el espectro de la cavidad de la figura 5. Las frecuencias de los picos corresponden a dos de los primeros modos.

#### 3.2.2 Caracterización de un circuito pasivo de microondas

Una estructura muy utilizada en la literatura para mostrar el funcionamiento de códigos FDTD se presenta en un artículo de D.M Sheen *et. al.* [8] y se reproduce en la figura 7. Se trata de un filtro pasivo de microcintas para el cual los autores publicaron los parámetros [S] obtenidos de manera experimental. En las figuras 8 y 9 aparecen los resultados de la simulación con el simulador FDTD desarrollado, comparado con los resultados de la medición. El nivel de correspondencia es notablemente alto.

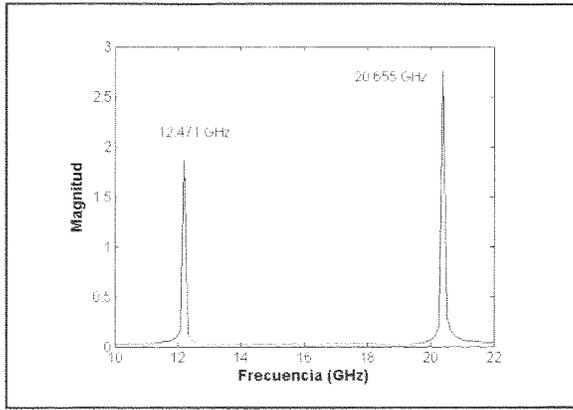


Figura 6. Espectro de la cavidad de la figura 5. La frecuencia calculada para el modo fundamental es de 12.471 GHz, lo que corresponde a un error de 1.12% respecto al valor teórico.

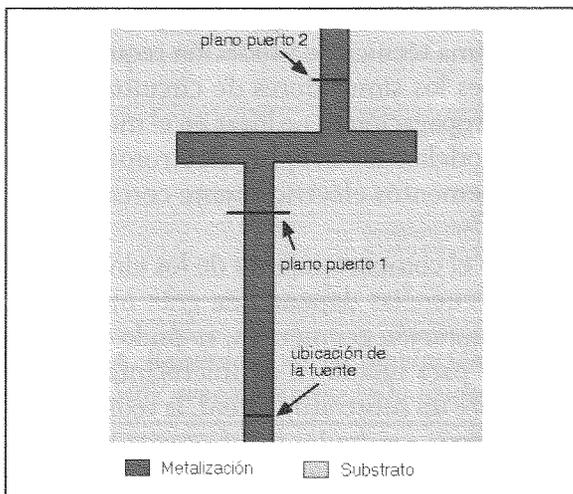


Figura 7. Estructura del filtro pasivo de microcintas de [8].

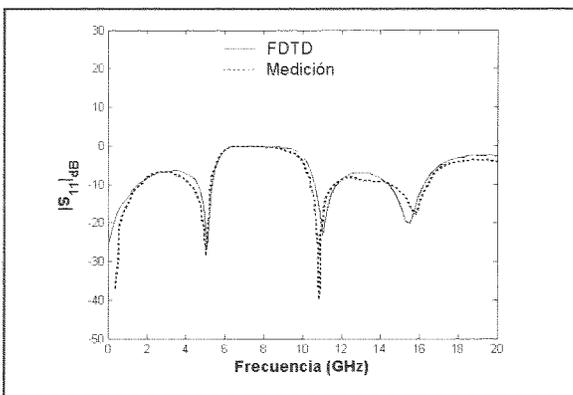


Figura 8. Pérdidas de retorno del filtro pasivo de microcintas de la figura 7.

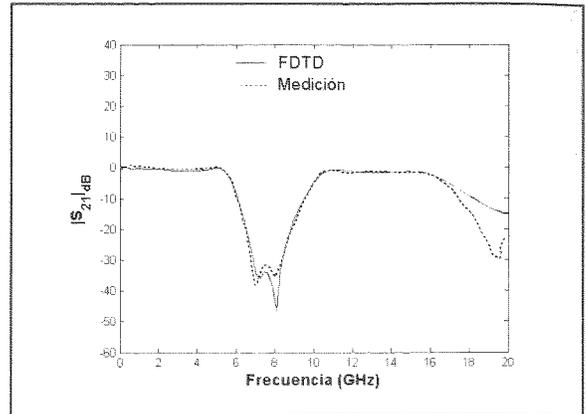


Figura 9. Pérdidas de inserción del filtro pasivo de microcintas de la figura 7. La desviación que ocurre a partir de 17 GHz se puede deber a que el equipo de laboratorio estaba calibrado sólo hasta 18 GHz [8].

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTRATEGIAS PARA INCLUIR ELEMENTOS AGRUPADOS EN FDTD

Todos los elementos agrupados son susceptibles de ser analizados por medio de simulación electromagnética con el nivel de detalle que se requiera, y se encuentran algunos ejemplos en la literatura de caracterización de elementos de circuito con FDTD [9]. Sin embargo, cuando el elemento hace parte de un sistema mayor, se enfrenta el problema de modelar una estructura con detalles a diferentes escalas. Como referencia, en un diodo de punto de contacto (bigote de gato) de uso extendido en microondas, la región activa (el punto de contacto) es solo una fracción del volumen total del empaque (figura 10). A su vez, el empaque suele ser de dimensiones reducidas respecto a la parte pasiva (en la figura 10, la línea de transmisión).

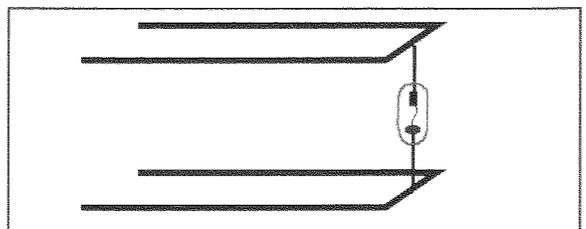


Figura 10. Diodo de punto de contacto terminando una línea de transmisión de placas paralelas. La escala de la parte activa del diodo es uno o dos órdenes de magnitud menor que la línea de microcintas.

Modelar adecuadamente la pequeña región activa del diodo requiere un mallado (discretización espacial) al menos dos órdenes de magnitud más detallado que el necesario para modelar la parte pasiva, lo cual implicaría un consumo excesivo de recursos computacionales. Una forma de salvar esta dificultad es evitar modelar en detalle la estructura interna del elemento y usar en cambio una la relación I-V que represente al elemento e incluya los efectos de empaquetamiento.

Para efectuar la simulación conjunta de las cantidades de campo y las cantidades de circuito se han planteado a grandes rasgos, dos estrategias generales. La primera consiste en modificar las ecuaciones de actualización de los campos para incluir el efecto del componente agrupado y la segunda consiste en usar un modelo equivalente de circuito para las celdas de Yee que contienen al elemento (figura 11). Se han propuesto diversas variaciones de las estrategias mencionadas tendientes a obtener algoritmos numéricamente estables.

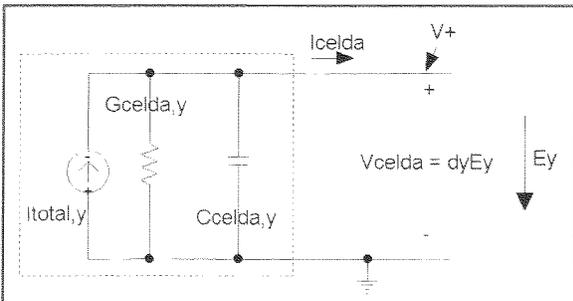


Figura 11. Circuito equivalente para una celda de Yee en la dirección 'y'.

En este trabajo se propone una combinación de las dos estrategias basada en la idea (original) de descomponer la corriente de dispositivo en tres subcomponentes: corriente inductiva, corriente capacitiva y corriente resistiva. Los detalles concernientes se encuentran en [10]. En la sección 5 aparecen resultados obtenidos con el simulador FDTD desarrollado alrededor de la idea planteada. La estabilidad del algoritmo fue probada con elementos altamente no-lineales como un diodo trabajando como limitador de voltaje, tal como se hace en [11].

Otra fuente de dificultad se presenta cuando el elemento se extiende a través de más de una celda. En estos casos se pierde la naturaleza local y explícita del algoritmo FDTD. Para un recuento histórico de las diferentes técnicas propuestas en los últimos diez años para salvar los diferentes obstáculos, se puede consultar [10].

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS Y VALIDACIÓN

El simulador FDTD desarrollado tiene la capacidad de incluir elementos agrupados pasivos y activos conectados a través de múltiples celdas. Para la validación se recurrió a resultados presentados en la literatura técnica [8], [11]-[13] y también se efectuó la comparación con simuladores de circuito (por ejemplo SPICE®). Esta última técnica de validación requiere cautela, pues los simuladores de circuito asumen que la propagación tiene lugar en el modo TEM y no modelan los acoples electromagnéticos entre elementos eléctricamente cercanos.

Aunque el comportamiento de los circuitos de altas frecuencias depende en gran medida de la configuración geométrica, se pudo determinar que para una línea de microcintas de 2.4 mm sobre un sustrato Duroid, la teoría de circuitos arroja resultados satisfactorios hasta frecuencias de casi 10 GHz. Esto permite usar simuladores como Ansoft Designer® en la validación del simulador.

### 5.1 Simulaciones de elementos pasivos (resistores, capacitores e inductores)

En la tecnología de microcintas planar, es común encontrar un elemento agrupado conectado entre dos líneas como en la figura 12, cuya discretización aparece en la figura 13.

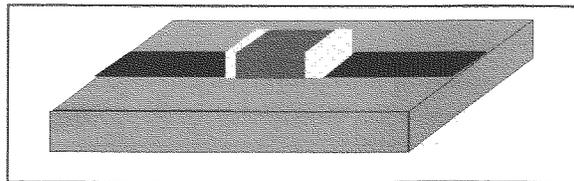


Figura 12. Estructura para la simulación de resistores, capacitores e inductores. Las líneas están implementadas en tecnología de microcintas.

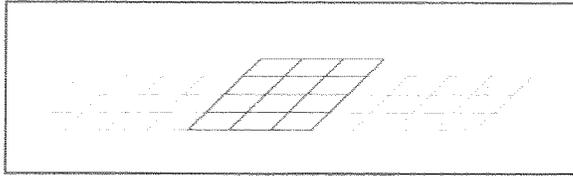


Figura 13. Discretización de la superficie de la estructura de la figura 12.

Las figuras 14, 15 y 16 muestran las curvas obtenidas con la simulación FDTD comparadas con las correspondientes a un circuito ideal. En todos los tres casos la correspondencia es buena incluso más allá de 10 GHz.

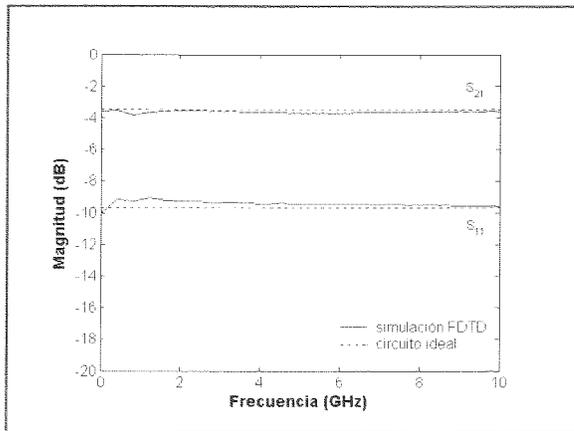


Figura 14. Resultados de la simulación de un resistor de 50Ω conectado como en la figura 12.

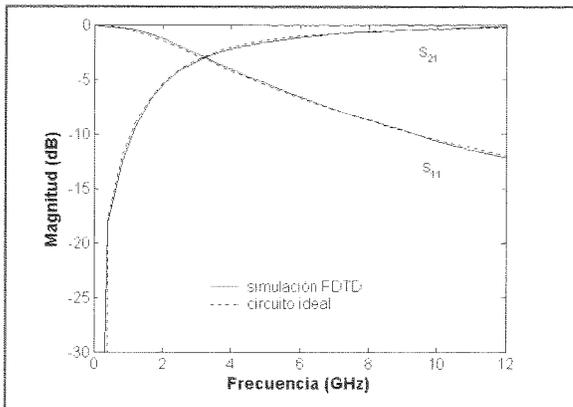


Figura 15. Resultados de la simulación de un capacitor de 0.5 pF conectado como en la figura 12.

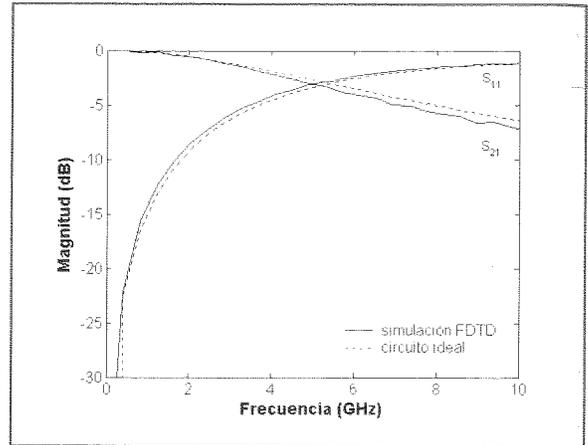


Figura 16. Resultados de la simulación de un inductor de 3 nH conectado como en la figura 12.

## 5.2 Simulaciones de elementos activos (diodos y transistores)

Se simularon diodos convencionales [11] y diodos de efecto túnel [12], ambos con diferentes algoritmos.

### 5.2.1 Simulación de diodos

Los diodos de efecto túnel pueden ser usados en osciladores cuando se los polariza alrededor de la región de resistencia negativa. Una configuración típica es la de la figura 17. En ésta, el diodo se coloca en el interior de una cavidad resonante conectada a una guía de ondas. El diodo proporciona ganancia en AC hasta el punto de saturación. El voltaje pico en el diodo (figura 18) crece hasta alcanzar el nivel de saturación (el límite de la región de resistencia negativa).

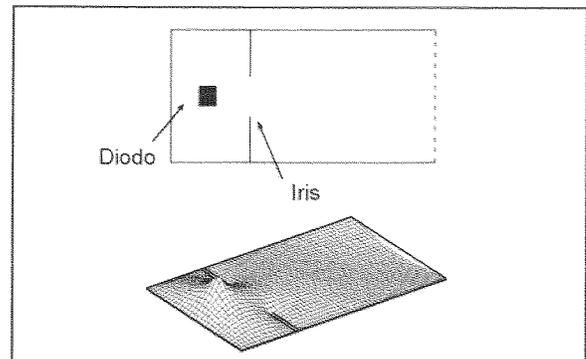


Figura 17. Sección transversal del oscilador con diodo túnel e instantánea del campo eléctrico.

El espectro del voltaje (figura 19) muestra que la frecuencia central del oscilador es de 26.87 GHz, lo que representa un error de cerca del 3% respecto a los resultados de Russer *et. al.* [12]. También se utilizó el simulador comercial MEFISTo-2D Classic® para validar estos resultados.

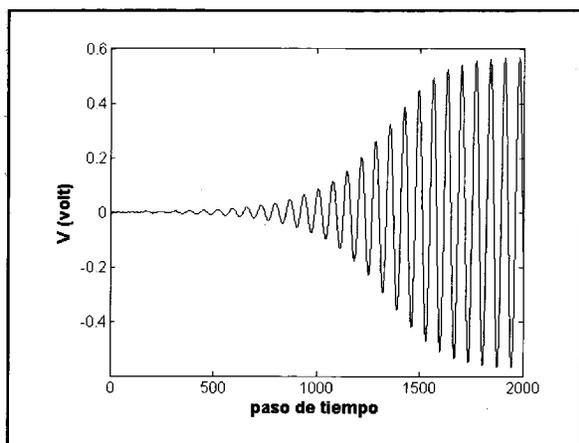


Figura 18. Construcción de las oscilaciones en la cavidad de la figura 17.

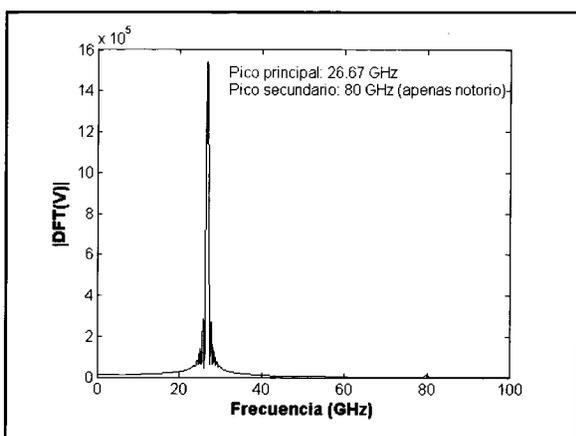


Figura 19. Espectro del voltaje en el diodo túnel del oscilador de la figura 17.

### 5.2.2 Simulación de transistores

El interés principal del trabajo es la simulación de circuitos con transistores. La validación se efectuó en este caso reproduciendo los resultados de Reddy y Garg [13], quienes simularon un amplificador completo de una etapa con redes de adaptación de entrada y salida (un circuito práctico aunque sencillo). El diagrama esquemático del amplificador está en la figura

20, implementado en tecnología de microcintas, el trazado resulta similar al circuito de la figura 2.

La figura 21 muestra los resultados obtenidos superpuestos con los de Reddy y Garg [13]. En general hay buena correspondencia. Se observa que los resultados obtenidos en este trabajo se aproximan más a la simulación circuital que los que se presentan en [13].

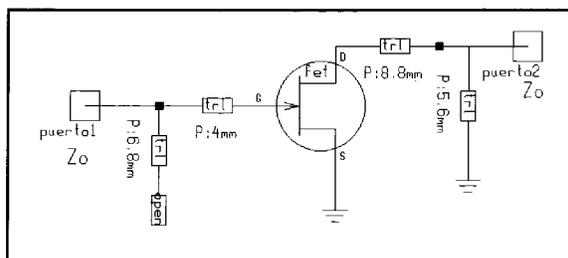


Figura 20. Diagrama del amplificador de microondas monoetapa simulado por Reddy y Garg [13].

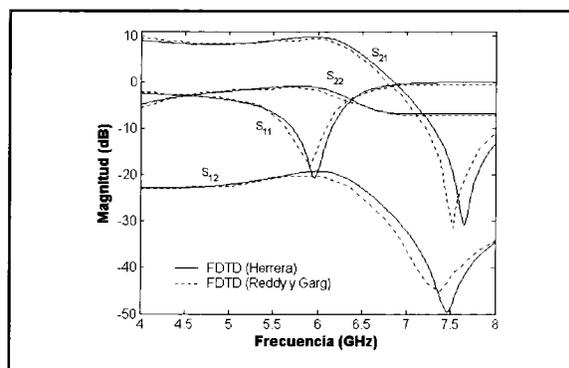


Figura 21. Comparación de los parámetros [S] del amplificador obtenidos por simulación FDTD con la simulación FDTD de Reddy y Garg [13].

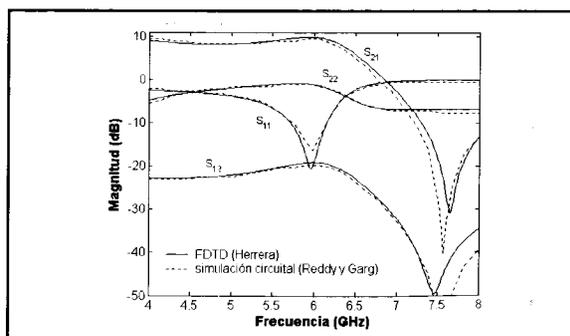


Figura 22. Comparación de los parámetros [S] del amplificador obtenidos por simulación FDTD con la simulación circuital de Reddy y Garg [13].

## 6. CONCLUSIONES

Se creó un simulador electromagnético flexible, basado en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). Para validar el código se simularon con éxito estructuras pasivas típicas. El simulador fue posteriormente extendido para incluir diferentes elementos agrupados en la simulación de onda completa y se confirmaron resultados importantes disponibles en la literatura. Se propuso una nueva variante de fácil extensión a redes de topología arbitraria con elementos no-lineales. El simulador tiene la capacidad de simular circuitos de microondas que incluyan resistores, capacitores, inductores, diodos y transistores.

## 7. REFERENCIAS

- [1] W. Sui, D. Christensen y C. H. Durney, «Extending the two-dimensional FDTD Method to hybrid electromagnetic systems with active and passive lumped elements», *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, no. 4, pp. 724—730, Abril 1992.
- [2] G. Gonzalez, «*Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*», 2<sup>nd</sup> ed., Prentice Hall, 1996.
- [3] K. S. Yee, «Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems involving Maxwell's Equations In Isotropic Media», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 14, no. 3, pp. 302—307, Mayo 1966.
- [4] J. P. Berenger, «A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves», *Journal of Computational Physics*, 114, pp. 185—200, 1994.
- [5] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [6] A. Taflove, *Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [7] N. Peña, «Contribution Au Développement De Conditions Aux Limites Absorbantes Pour La Méthode TLM Avec Applications À L'analyse De Circuits Hyperfréquences», Tesis de Doctorado, Université de Rennes I, 1997.
- [8] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra y J. A. Kong, «Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits», *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 38, no. 7, pp. 349—857, Julio 1990.
- [9] P. Ciampolini y G. Stopponi, «Integrated FDTD and solid-state device simulation», *IEEE Microwave And Guided Wave Letters*, Vol. 6, no. 11, pp. 419—421, Noviembre 1996.
- [10] J. Herrera, «*Estudio sobre la incorporación de elementos activos en la simulación electromagnética de circuitos de microondas*», Tesis para optar al título de ingeniero electrónico. Universidad de Los Andes, Bogotá, Agosto 2003.
- [11] M. Picket-May, A. Taflove y J. Baron, «FD-TD modeling of digital signal propagation in 3-D circuits with passive and active loads», *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, no. 8, pp. 1514—1523, Agosto 1994.
- [12] P. Russer, P. P. M. So y W. J. Hofer, «Modeling of nonlinear active regions in TLM», *IEEE Microwave And Guided Wave Letters*, Vol. 1, no. 1, pp. 10—12, Enero 1991.
- [13] V. S. Reddy y R. Garg, «An improved extended FDTD formulation for active microwave circuits», *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, no. 9, pp. 1063—1069, Septiembre 1999.