

## **MODULADOR DE FM CONTROLADO MEDIANTE PIC**

AYALA ALFONSO, ALEJANDRO J.  
RODRÍGUEZ PÉREZ, SILVESTRE  
RODRÍGUEZ VALIDO, MANUEL  
GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, OSWALDO B.  
RODRÍGUEZ MENDOZA, BEATRIZ  
MAGDALENO CASTELLÓ, EDUARDO

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El propósito del presente trabajo es el diseño e implementación de un dispositivo electrónico que permite obtener una señal modulada de FM utilizando un oscilador controlado por tensión (VCO). El transmisor de FM fue diseñado para operar dentro de la banda comercial, utilizándose un PIC para el control automático de la frecuencia de la portadora. Para llevar a cabo la implementación de este proyecto, el estudiante debe tener unos conocimientos básicos sobre las técnicas de modulación FM. Este trabajo está pensado como un problema práctico de laboratorio a realizar por un grupo de dos o tres estudiantes de ingeniería durante el transcurso de un cuatrimestre del curso. Con el desarrollo de dicho trabajo, el alumno aprende el uso de convertidores analógico-digitales, acondicionamiento de señal y técnicas de modulación. Por lo tanto, el diseño y desarrollo del sistema puede permitir una mejor comprensión de los dispositivos descritos, así como su utilización en la resolución de problemas específicos.

# MODULADOR DE FM CONTROLADO MEDIANTE PIC

Alejandro Ayala Alfonso, Silvestre Rodríguez Pérez, Manuel Rodríguez Valido, Oswaldo González Hernández, Beatriz Rodríguez Mendoza y Eduardo Magdaleno Castelló  
 aayala@ull.es, srdguezp@ull.es, mrvalido@ull.es, oghdez@ull.es, bmendoza@ull.es, emagcas@ull.es  
 Dpto. de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna. Avda. Francisco Sánchez, s/n. La Laguna, Tenerife – España.

**Abstract-** The purpose of the present work is the design and implementation of an electronic device that allows us to obtain FM modulated signal using a VCO oscillator. The FM transmitter was designed to operate within the commercial band and a PIC was used for the automatically controlling the carrier frequency. The student should understand the basic operation principles of the FM techniques in order to carry out the implementation. It may be conceived as a practical problem of laboratory for a team project of 2-3 students. During the hardware development, the student learns the use of digital to analog converters, signal conditioning and modulation techniques. Therefore, the design and development of the system can serve as aid to better understand the described devices and their use to solve an specific problem.

## I. INTRODUCCIÓN GENERAL. OBJETIVOS

Entre las técnicas de modulación utilizadas en la obtención de una señal de FM, se encuentran aquellas de tipo directo que hacen uso de un oscilador controlado por tensión (VCO) [1]. En las mismas, una componente de continua define la frecuencia de la señal portadora, mientras que la moduladora se suma, con posterioridad, a la anterior dando lugar a los cambios de frecuencia característicos en este tipo de modulación.

El objetivo del presente trabajo se ha centrado en el diseño e implementación de un dispositivo electrónico que, haciendo uso de un VCO, posibilita la obtención de una señal de FM [2] en la banda comercial (88-108 MHz), siendo éste gestionado mediante la utilización de un PIC [3,4,5] y posibilitando la selección automática de la frecuencia a la que opera la portadora.

Dicho sistema constituye una práctica dirigida a alumnos de Ingeniería Electrónica dentro de la asignatura Sistemas de Comunicación I de la Universidad de La Laguna. Este hecho, permite aunar en una única experiencia conocimientos puramente electrónicos con otros inherentes al campo de las comunicaciones. Con ello se logra que alumnos, con una adecuada formación en electrónica, puedan hacer uso de sus conocimientos en ese campo para aplicarlos al diseño de un sistema de comunicación.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Tal y como se ha indicado con anterioridad, el núcleo central del presente trabajo lo constituye un VCO que será el encargado de generar la señal de FM. La Fig. 1 muestra el diagrama de bloques general del mismo y donde podemos observar el PIC (PIC16F877) destinado a gestionar todo el

sistema, y que a su vez se comunica con el usuario mediante un teclado y una pantalla de visualización (display).

La frecuencia de la portadora a utilizar será introducida a través del teclado siguiendo las instrucciones indicadas en el *display*, donde también será mostrado el valor seleccionado (Figuras 1 y 2). Tras este primer paso, el PIC, mediante un convertidor digital analógico serie (CDA, TLC5620), genera una señal de continua que es enviada al diodo varicap que utiliza el VCO (MC1648, Fig. 2) para obtener la portadora deseada. En esta fase, la señal procedente del micrófono (micro) es sustituida, mediante un multiplexor analógico, por una tensión nula. De esta manera, a la salida del sumador (Fig. 1 y 2) únicamente tendremos el voltaje procedente del CDA necesario para fijar la frecuencia de la portadora.

Sin embargo, es necesario que en todo momento el PIC conozca la frecuencia del VCO con objeto de modificar el

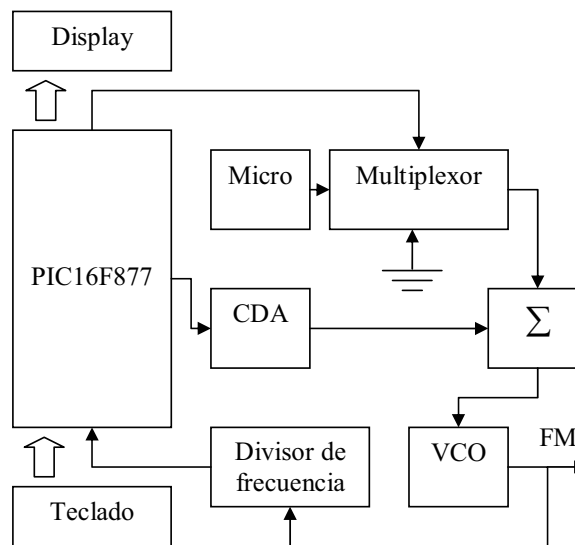


Fig.1 Diagrama de bloques

dato enviado al CDA y obtener el valor de frecuencia deseado, y que fue introducido con anterioridad por el usuario.

Por este motivo, la señal procedente del VCO es enviada a un “circuito divisor de frecuencia” implementado haciendo uso de un “prescaler” (SAB6456, que divide por 256) y un biestable T (mediante un HEF4027B, que lo hace por 4), lo que se traduce en poder dividir el valor de la frecuencia por un factor total de 1024, permitiendo que ésta pueda ser leída por el PIC.

Mediante esta técnica, es posible medir frecuencias de hasta 128MHz, lo que cubriría ampliamente el rango comercial de 88 a 108MHz.

De esta forma, y a modo de bucle, el PIC irá modificando la tensión enviada al VCO y leyendo la frecuencia de la señal generada por éste hasta lograr la portadora deseada. En ese instante, el *display* dejará de mostrar el mensaje “Ajustando frecuencia”, e indicará “Puede transmitir” junto la frecuencia de transmisión. Conjuntamente, el multiplexor permitirá la entrada de la señal procedente del “micro” que se sumará a la correspondiente de continua utilizada en la etapa anterior. Esto producirá cambios de tensión en los extremos del diodo varicap, proporcionales a la señal moduladora, que darán lugar a la señal de FM.

En cualquier instante es posible modificar la frecuencia de transmisión pulsando cualquiera de las teclas, puesto que en ese caso el sistema nos requeriría la introducción de un nuevo valor para ese parámetro.

Por otro lado, a intervalos regulares, el PIC testea el valor de la frecuencia (siempre que no se esté transmitiendo) con objeto de corregir posibles desviaciones de la misma.

Como circuito VCO se ha utilizado el MC1648 de la casa Motorola (Fig. 2) que permite operar en la región deseada del espectro, utilizando una alimentación doble y un número mínimo de componentes externos.

Si bien este circuito fue inicialmente diseñado para la implementación de PLL's, puede ser utilizado en otras aplicaciones donde sea necesario disponer de una señal de frecuencia fija o variable con una alta pureza espectral.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema implementado fue testado con el fin de comprobar su correcto funcionamiento. Para tal fin, se hizo uso de un receptor de FM de tipo comercial que permitía comparar la frecuencia de transmisión seleccionada a través del teclado de nuestro dispositivo con la de sintonía mostrada por el receptor, obteniéndose excelentes resultados.

### IV. CONCLUSIONES

El sistema implementado constituye una propuesta de carácter didáctico donde los alumnos pueden comprobar como los conocimientos de carácter meramente electrónico que poseen pueden ser aunados para obtener un dispositivo de utilidad práctica.

Si bien la presente experiencia va dirigida alumnos de Ingeniería Electrónica, ésta puede ser de utilidad para otras ingenierías, sobre todo si tenemos en cuenta que vivimos en la denominada “era de las comunicaciones”.

### REFERENCIAS

- [1] N. R. Malik, “Circuitos Electrónicos”, Madrid, España: Edt. Prentice Hall, 1996
- [2] L. W. Couch II, “Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos”, México: Edt. Prentice may, 1998
- [3] J. Mª Angulo, E. Martín e I. Angulo, “Microcontroladores PIC. La solución en un chip”, Madrid, España: Edt. Paraninfo, 1997
- [4] J. Mª Angulo e I. Angulo, “Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones”, Madrid, España: Edt. Paraninfo, 1997
- [5] Microchip, PIC16F877

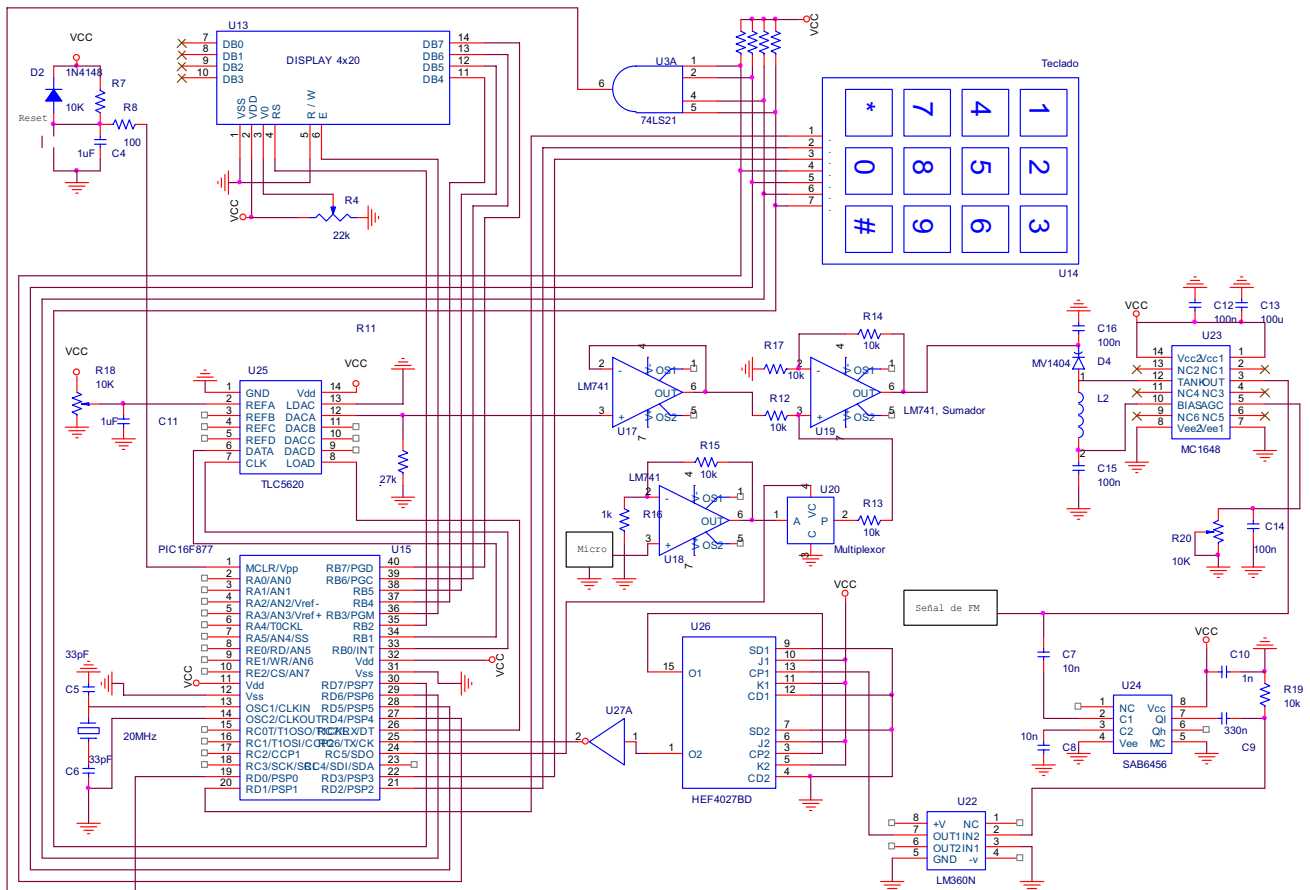


Fig. 2. Esquema general del circuito

## **HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA EL ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES**

SÁNCHEZ DELGADO, ALBERT MIQUEL  
ANGUERA, JAUME  
PÉREZ, ANTONIO  
VICENT, LLUIS

UNIVERSIDAD RAMON LLULL  
UNIVERSIDAD RAMON LLULL  
UNIVERSIDAD RAMON LLULL  
UNIVERSIDAD RAMON LLULL

En este artículo se presenta un libro electrónico dedicado a la teoría de Antenas. El libro electrónico es una herramienta informática de trabajo construida en un entorno MathCAD®. Este es un potente programa orientado a ingeniería que engloba una gran cantidad de prestaciones, de manera que presenta una interfaz adecuada para incorporar el libro. El libro contiene las explicaciones que contendría un libro corriente, pero el estudiante puede interactuar instantáneamente con cualquier tipo de ecuación o simulación que se haya incorporado con la posibilidad por parte del autor de añadir vídeos y gráficas en 2 y 3 dimensiones para facilitar la comprensión del concepto de interés. Todas las gráficas son modificables por el estudiante variando los parámetros del escenario con el que esté trabajando. Con esto, no se deja al azar la modificación de estos parámetros, sino que se marcan unas pautas para poder guiar al estudiante hacia a la dirección adecuada en el momento de realizar las pruebas y mostrar visualmente lo que se ha explicado teóricamente. La temática del libro escogida es, como dice su título, Una Aproximación a la Teoría de Antenas, y muestra los puntos fundamentales sobre la teoría de antenas. El sexto capítulo de este libro realiza un estudio sobre un sistema de antenas inteligentes, en el que se permite realizar diferentes simulaciones y experimentos relacionados con el procesado de la señal. En este capítulo se han fusionado las facilidades que presenta el MathCAD®, con la potencia de cálculo del lenguaje Matlab®. Todos los códigos de simulación están escritos en el programa Matlab®, pero MathCAD® dispone de una herramienta de interacción con otros programas, entre ellos el Matlab®, de manera que puede realizar llamadas instantáneas para que el Matlab® realice las simulaciones y retorne los resultados de nuevo al MathCAD®, siendo este quien los muestra por pantalla, ya sea numéricamente o gráficamente.

# Herramienta Educativa para el Estudio de un Sistema de Antenas Inteligentes

Albert-Miquel Sánchez<sup>(1)</sup>  
albertm@salle.url.edu

Jaume Anguera<sup>(1,2)</sup>  
jaume.anguera@fractus.com

Antonio Pérez<sup>(1)</sup>  
antonip@salle.url.edu

Lluís Vicent<sup>(1)</sup>  
vicent@salle.url.edu

(1) Departamento de Comunicaciones y Teoría de la Señal, Universidad Ramon Llull, Barcelona 08022, España.

(2) Fractus, S. A., Barcelona, España.

**Abstract:** This paper presents a new educative tool for the study of the Antenna Theory. This tool consists in an electronic book which has as a main characteristic the possibility of introducing animations and interactive examples, where the student can realize instantaneously different experiments to prove the theory presented. The electronic book has been implemented over *MathCAD*®, that concentrates the possibilities of a text processor and a calculus tool. To present the book, this paper is centered on the sixth chapter, dedicated to the smart antennas systems.

## I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal que se persigue es conseguir un método para que los alumnos entiendan los conceptos más importantes y aprendan de una manera dinámica y con las máximas facilidades posibles a su alcance. Con estas pretensiones se concibió un libro electrónico dedicado a la teoría de Antenas ([1], [2] y [3]). El libro electrónico es una herramienta informática de trabajo construida en un entorno *MathCAD*®. Este es un potente programa orientado a ingeniería que engloba una gran cantidad de prestaciones, de manera que presenta una interfaz adecuada para incorporar el libro.

El libro contiene las explicaciones que contendría un libro corriente, pero el estudiante puede interactuar instantáneamente con cualquier tipo de ecuación o simulación que se haya incorporado con la posibilidad por parte del autor de añadir vídeos y gráficas en 2 y 3 dimensiones para facilitar la comprensión del concepto de interés. Todas las gráficas son modificables por el estudiante variando los parámetros del escenario con el que esté trabajando. Con esto, no se deja al azar la modificación de estos parámetros, sino que se marcan unas pautas para poder guiar al estudiante hacia a la dirección adecuada en el momento de realizar las pruebas y mostrar visualmente lo que se ha explicado teóricamente.

La temática del libro escogida es, como dice su título, *Una Aproximación a la Teoría de Antenas*, y muestra los puntos fundamentales sobre la teoría de antenas. El primer capítulo se dedica a las antenas lineales, el

segundo a las agrupaciones de antenas, el tercero a las antenas *microstrip*, el cuarto al método FDTD (*Finite Difference Time Domain*) y el quinto a los reflectores. El sexto capítulo de este libro realiza un estudio sobre un sistema de antenas inteligentes, en el que se permite realizar diferentes simulaciones y experimentos relacionados con el procesado de la señal. En este nuevo capítulo se han fusionado las facilidades que presenta el *MathCAD*®, con la potencia de cálculo del lenguaje *Matlab*®. Todos los códigos de simulación están escritos en el programa *Matlab*®, pero *MathCAD*® dispone de una herramienta de interacción con otros programas, entre ellos el *Matlab*®, de manera que puede realizar llamadas instantáneas para que el *Matlab*® realice las simulaciones y retorne los resultados de nuevo al *MathCAD*®, siendo este quien los muestra por pantalla, ya sea numéricamente o gráficamente.

## II. ESTRUCTURA DEL LIBRO ELECTRÓNICO

Todos los capítulos siguen una estructura común, como se observa en la figura 1. Cada capítulo contiene un índice y una breve introducción sobre su contenido. Si se accede al capítulo se puede encontrar toda la explicación temática seguida de un conjunto de ejemplos numéricos y visuales, con una guía para seleccionar los experimentos más adecuados que mostrarán con la máxima claridad posible la teoría expuesta. Finalmente se proporcionan los enlaces de toda la bibliografía utilizada, así como referencias a otros capítulos.



Fig 1. Estructura del libro interactivo.

### III. INTRODUCCIÓN A LAS SMART ANTENNAS

Para introducir el sistema de antenas inteligentes se parte de un receptor habitual de antenas inteligentes, formado por un *array* de antenas conectadas a un procesador. Se dispone también de un escenario del que no se tiene más información que los datos que proporciona el receptor, digitalizados en forma de vectores de datos. El objetivo es, básicamente, recibir una señal de una fuente emisora puntual, donde la información de esta señal se encuentra escondida entre el conjunto de datos recibidos. Por tanto, el trabajo del procesador será tratar los datos de alguna manera para extraer la información deseada.

El sistema que se genera para el tratamiento de los datos se puede dividir en tres bloques fundamentales, como se muestra en la figura 2. El motivo de esta división es que cada bloque necesita cierta información para poder ejecutar su algoritmo eficientemente, información que suministra el bloque anterior.

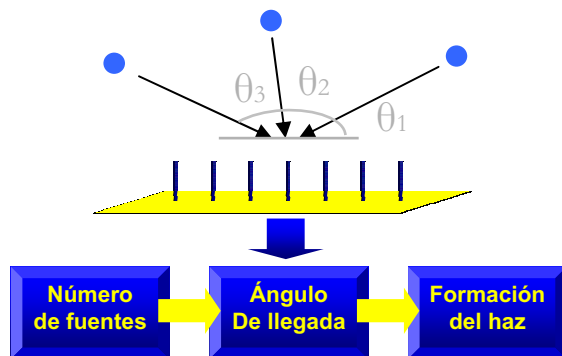


Fig. 2. Diagrama de bloques de un sistema *smart antenna*. El *array* de antenas conectado a un procesador, el cual realiza los tres bloques de procesado.

Así, para formar el haz del *array* de antenas apuntando hacia la fuente de la que se quiere captar la emisión, se necesita conocer el ángulo de llegada de esta fuente. Y los algoritmos que detectan los ángulos de llegada, necesitan a priori conocer el número de fuentes presentes en el escenario.

#### a. Detección del número de fuentes

Conocer el número de fuentes es imprescindible antes de continuar con cualquier otro tipo de procesado de datos. En un escenario dinámico es posible que este número de fuentes vaya variando a medida que pasa el tiempo, no siendo posible establecer un número fijo de señales presentes. Por lo tanto, se tendrá que encontrar un método fiable y con buenas prestaciones que puedan proporcionar este dato. Este será, por tanto, el primer paso en el proceso de adquisición del señal.

En el libro se muestran tres métodos. El criterio *AIC* (“*Akaike Information Criteria*”), y el *MDL* (“*Minimum*

```
L := 10      número de antenas
M := 2      número de fuentes emisoras
array_angulos := (90 50 78 30 100 120 130 150 170 0)
d := lambda/4  distancia entre antenas
Pruido := 0.5 [W]  Potencia de ruido
```

```
num_fuentes_AIC = 2
num_fuentes_MDL = 2
num_fuentes_MDLB = 2
SNR = 5.626      Relación S/N dada en dBs
```

Fig. 3. Imagen del libro electrónico del apartado de detección del número de fuentes.

```
L := 10      número de antenas
M := 2      número de fuentes emisoras
array_angulos := (80 100 120 150 155 120 130 160 170 45) ángulos de las fuentes
d := lambda/2  distancia entre antenas
Pruido := 0.1 [W]  Potencia de ruido
Aseñal := 1    Amplitud del primer señal
```

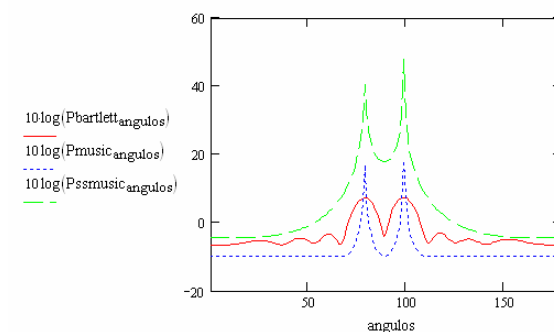


Fig. 4. Imagen del libro electrónico del apartado de detección del ángulo de llegada.

*Description Length*”), propuestos en [9] y [10], estiman el número más probable de fuentes presentes, utilizando la *Estimación de Máxima Similitud*. En la figura 3 se puede observar que las variables de color verde son las que puede modificar el alumno, y las de color azul las que retorna el programa después de procesar los datos.

#### b. Detección del ángulo de llegada

Existe una gran variación de algoritmos de detección de llegada. Es importante conocer el ángulo de llegada, no solo de la señal de interés, sino también de las interferentes, para poder anularlas.

En este apartado se proponen también tres métodos, el método *Bartlett*, el método *MUSIC* y el *Spatial Smoothing MUSIC*, propuestos en [4], [6], [7], [8] y [13]. En la figura 4 se muestra una imagen de este

apartado del libro. El usuario puede modificar cualquiera de las variables de color verde y comprobar como afectan estas a la convergencia de los diferentes algoritmos, en la gráfica situada debajo. Los picos muestran los ángulos de llegada de las fuentes.

c. Formación del haz

Para formar el haz del *array*, cada antena será ponderada por un peso complejo para determinar su influencia en la salida total de señal, siguiendo el esquema de la figura 5.

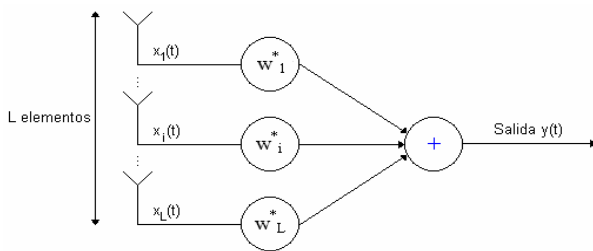


Fig. 5. Esquema de la metodología de formación del haz.

A partir de la información que aportan los algoritmos de las fases anteriores, el número de fuentes y los ángulos de llegada de estas fuentes, estos algoritmos buscan el vector de pesos adecuado para conformar el haz de radiación del *array* de antenas. En este apartado se estudian dos tipos de técnicas, conocidas como *Null Steering Beamformer* y *Postbeamformer Interference Canceller*, propuestas en [4] y [12]. Si se observa la figura 6 se pueden ver las diferentes variables modificables por el usuario, como en los apartados anteriores, y el resultado del haz normalizado del *array* de antenas.

IV. CONCLUSIONES

Para comprobar la eficacia del libro se han realizado una serie de pruebas con los alumnos de la asignatura de Antenas del Plan de Estudios Semipresenciales de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Ramon Llull. Estas pruebas realizadas sobre 30 alumnos consistieron en realizar un test genérico sobre antenas a estos alumnos, donde la mitad de ellos habían estudiado el temario únicamente con la bibliografía tradicional (grupo A), y la otra mitad estudiaron con la ayuda suplementaria del libro electrónico (grupo B). Los resultados muestran una media de 4,4 en los alumnos del grupo A, y una media de 6.8 en los alumnos del grupo B, por lo que demuestran una notable mejoría en aquellos que utilizaron el libro electrónico para estudiar. El éxito de este primer experimento confirma los objetivos que se pretendían al implementar el libro electrónico.

- $L := 10$  Nombre d'antenes a l'array
- $d := \frac{\lambda}{2}$  Distància entre les antenes
- angle\_senyal := 90 Angle d'arribada del senyal desitjat
- angle\_interferent\_1 := 60 Angle d'arribada de la primera interferent
- angle\_interferent\_2 := 120 Angle d'arribada de la segona interferent

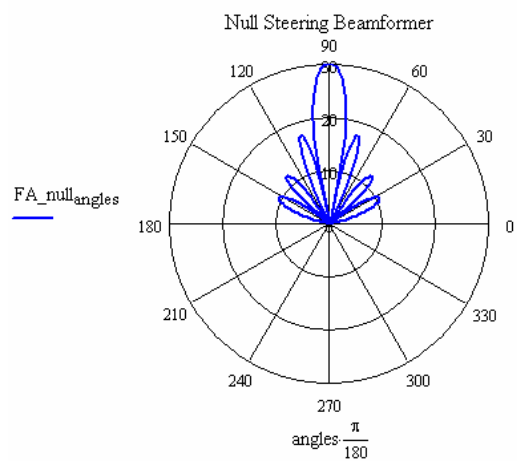


Fig. 6. Imagen del libro electrónico del apartado de formación del haz.

V. REFERENCIAS

- [1] Arnau Cabedo, Daniel Pérez, Lluís Vicent i Jaume Anguera. *Herramienta Educativa Para el Análisis de Antenas Microstrip. Adaptación de Impedancias*. Proceedings of the XX National Symposium of the Scientific International Union of Radio. URSI'05. Valencia, septiembre 2005.
- [2] Daniel Pérez, Arnau Cabedo, Lluís Vicent, Jaume Anguera, *Herramienta educativa para el análisis de antenas microstrip: Impedancia de entrada y diagramas de radiación*. Proceedings of the XX National Symposium of the Scientific International Union of Radio. URSI '05. Valencia, septiembre. 2005.
- [3] Carlos Subías, Jaume Anguera i Lluís Vicent. *Aproximación a la Teoría de Antenas Mediante un Libro Electrónico Interactivo*. Congrés de Tecnologies Electròniques Aplicades a l'Educació (TAEE – Technology Applied to Electronic Education), Valencia, julio 2004.
- [4] Hamid Krim i Mats Viberg. *Two Decades of Array Signal Processing Research. The Parametric Approach*. IEEE Signal Processing Magazine, julio 1996.
- [5] Óscar Moreno Jiménez i Ignacio Javier Franco Martín. *Introducción a la tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UMTS*. Telefónica Investigación y desarrollo, nº 26, junio 2001.
- [6] Lal Chand Godara. *SMART ANTENNAS*. Boca Ratón (Florida): CRC Press, cop. 2004. ISBN: 0-8493-1206-X (versión papel).
- [7] Todd K. Moon i Wynn C. Stirling. *MATHEMATICAL METHODS AND ALGORITHMS for signal processing*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. ISBN: 0-201-36186-8.
- [8] Xavier Gonzalvo, *Detección del ángulo de llegada con un array microfónico*. Trabajo final de carrera de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, Departamento de Comunicaciones i Teoría del Señal, Universidad Ramon Llull, 2001.

- [9] Mati Wax i Thomas Kailath, *Detection of Signals by Information Theoretic Criteria*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-33, NO. 2 Abril 1995.
- [10] Mati Wax i Ilan Ziskind, *Detection of the Number of Coherent Signals by the MDL Principle*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37 NO. 8 Abril 1989.
- [11] Lal Chand Godara, *A Robust Adaptive Array Processor*. IEEE Transactions On Circuits and Systems, volum. CAS- 34, n° 7, julio 1987.
- [12] *A New Approach to the Design of PostBeamformer Interference Canceller*. School of Electrical & Electronic Engineering. Nanyang Technological Institute.
- [13] Frank P. Gross. *SMART ANTENNAS for Wireless Communications*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-144789-X.
- [14] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Republic of Singapore 1982. ISBN: 0-471-60352-X.

## **UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA MICROWAVE OFFICE DE AWR PARA EL APRENDIZAJE DE LOS ERRORES SISTEMÁTICOS EN UN ANALIZADOR DE REDES**

BAQUERO ESCUDERO, MARIANO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
VALENCIA

RODRIGO PEÑARROCHA, VICENT MIQUEL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
VALENCIA

VICO BONDÍA, FELIPE

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
VALENCIA

SÁNCHEZ ESCUDEROS, DANIEL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
VALENCIA

En este artículo se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación, dentro del programa comercial Microwave Office, de un analizador de redes vectorial, que permite evaluar el efecto de los errores sistemáticos y la capacidad de calibración de los mismos. Con esta herramienta el alumno de la asignatura optativa de quinto curso "Circuitos de RF: Diseño e instrumentación", adquiere de forma práctica, conocimientos en el manejo de un analizador de redes y capacidad de interpretación de los errores sistemáticos presentes en toda medida.

# Utilización del programa Microwave Office® de AWR para el aprendizaje de los errores sistemáticos en un analizador de redes.

Mariano Baquero Escudero<sup>(1)</sup>, Vicent Miquel Rodrigo Peñarrocha<sup>(1)</sup>, Felipe Vico Bondia<sup>(1)</sup>,  
Daniel Sánchez Escuderos<sup>(1)</sup>, Daniel Masegoso Plaza<sup>(1)</sup>

mbaquero@dcom.upv.es, vrodrigo@dcom.upv.es, fevibon@teleco.upv.es, dasanes1@iteam.upv.es, dmasegoso@gmail.com

<sup>(1)</sup>Departamento de Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n.

**Abstract**—A practical tool for getting familiarity in systematic errors with a Network Analyzer is presented. A simulation of a Network Analyzer has been realized into a microwave circuit simulator as Microwave Office. The six systematic errors have been included in the network analyzer schematic. These errors may be modified with the tune application and the effect on the measured scattering parameters are presented in real time. The device under test could be chosen selecting its scattering parameters, permitting to know the dependence between systematic errors and the device under test. The ideal, real and calibrated measurements may be shown for each simulated measurement in real time. This tool is being used as a practical work of the subject *RF circuits design*, framed in telecommunication studies at the Polytechnic University of Valencia.

## I. INTRODUCCIÓN

Son cada vez más numerosas la utilización de herramientas informáticas para el aprendizaje en ámbitos de ingeniería. En la teoría de las microondas se encuentran numerosos esfuerzos para facilitar la adquisición de conceptos o procedimientos, [1], [2], [3], [4] y [5]. Simuladores circuitales y electromagnéticos son programas adecuados para la enseñanza práctica de conceptos de microondas. El simulador comercial Microwave Office (MWO) de Applied Wave Research (AWR) está siendo utilizado para prácticas de laboratorio en varias asignaturas de la Escuela de Telecomunicación de la UPV. El programa MWO está principalmente orientado a la simulación circuitual, si bien también permite cierto tipo de simulaciones electromagnéticas.

La adquisición del conocimiento del uso de instrumentos en bandas de microondas resulta imprescindible en la formación de aquellos ingenieros que en su ámbito laboral vayan a necesitar desarrollar dichas capacidades. La medida de parámetros de dispersión resulta una herramienta necesaria en la mayoría de los sistemas que trabajen a frecuencias de microondas. Un analizador de redes vectorial es el instrumento más adecuado para abordar estas medidas. El correcto manejo y entendimiento de este instrumento se hace necesario dentro de la formación de ingenieros de telecomunicación especializados en sistemas de radiofrecuencia. Por ello, en el plan de estudios de la Escuela de Telecomunicación de la Universidad Politécnica se incluyó una asignatura optativa de último curso denominada *Circuitos de RF: diseño e instrumentación*. Esta asignatura se concibió con un marcado carácter práctico. El analizador de redes tiene dentro de esta asignatura una posición importante, y su manejo y conocimiento se ha fijado como básico. Junto a la explicación teórica del funcionamiento y manejo de

un analizador de redes se ha concebido una sesión práctica donde inicialmente se trabaja con un simulador y finalmente se experimenta con medidas realizadas directamente con el analizador de redes del laboratorio. La parte práctica de la simulación es la que se presenta en esta comunicación. La simulación de un analizador de redes se hace dentro del entorno del programa comercial MWO, y se ha concebido de forma que se puedan incluir los seis errores sistemáticos que aparecen en la medida con un analizador de redes, así como la capacidad de comparar medidas ideales, con las reales y con las corregidas mediante calibración.

En primer lugar se presentará la estructura de analizador de redes concebida como un esquemático dentro de un proyecto de MWO, posteriormente se explicará la forma como se ha incluido los errores sistemáticos y finalmente se pondrán algunos ejemplos de simulaciones realizadas en la práctica de la asignatura.

## II. ANALIZADOR DE REDES IDEAL EN MWO

Un esquema simplificado de un analizador de redes es el mostrado en la figura 1

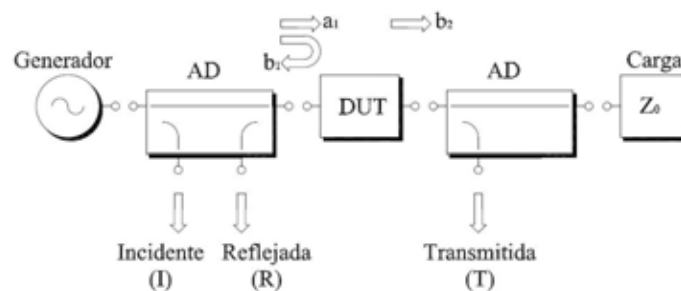


Fig. 1. Diagrama de bloques de un analizador de redes.

En este caso se escenifica la medida de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de un dispositivo de dos accesos (DUT). Para ello el analizador de redes consta de dos acopladores direccionales con los que extrae información de la señal incidente (I), reflejada (R) y transmitida (T). Estas señales son posteriormente detectadas y procesadas para su adecuada presentación. Para analizadores con capacidad para hacer sistemáticamente la medidas de los cuatro parámetros de dispersión de un dispositivo de dos accesos, se repetiría el mismo esquema girando el DUT en su ubicación. Estos dos conjuntos de medidas son las conocidas como reverse y forward en su denominación inglesa.

Una posible implementación de este esquema dentro de MWO es la mostrada en la figura 2.

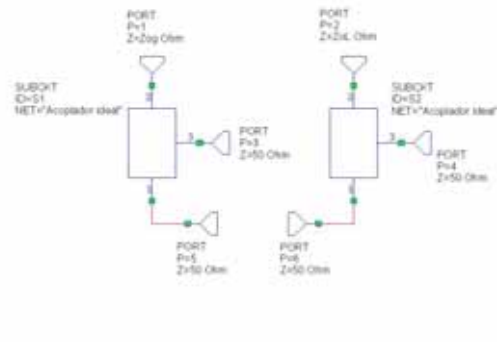


Fig. 2. Esquemático de un analizador de redes en MWO.

Se concibe el analizador de redes como una red de seis accesos donde el acceso 1 representaría el punto donde se conectaría el generador en la medida forward (p.e.), los accesos 5 y 6 representarían los accesos donde se conectaría el dispositivo a medir, los accesos 3 y 4 representan los canales con las señales reflejada (R) y transmitida (T) y el acceso 2 representaría el punto donde se conectaría el generador en la medida reverse (p.e.).

Una vez colocado el dispositivo a medir entre los accesos 5 y 6, la simulación en MWO de los parámetros de dispersión de la red de cuatro accesos resultante daría suficiente información para obtener los parámetros de dispersión del DUT. En el caso de ser los acopladores direccionales ideales, los parámetros de dispersión obtenidos coincidirían con los reales del DUT.

### III. ERRORES SISTEMÁTICOS

En un analizador real aparecen una serie de errores en la medida, errores que tendrán, en algún caso, un comportamiento no determinista y que solo se podrán corregir mediante promediados, y otros que serán deterministas y que se conocen como sistemáticos. Estos últimos, dado su carácter determinista, se pueden corregir mediante un proceso de calibrado. Los errores deterministas, conocidos como errores sistemáticos, en un analizador de redes son seis:

1. Error de directividad ( $E_D$ ).
2. Error de aislamiento ( $E_X$ ).
3. Error de desadaptación de carga ( $E_L$ )
4. Error de desadaptación de fuente ( $E_S$ )
5. Error de respuesta en frecuencia en reflexión ( $E_R$ ).
6. Error de respuesta en frecuencia en transmisión ( $E_T$ ).

A continuación se detalla el procedimiento para incluir estos errores sistemáticos en el entorno de MWO.

#### III-A. Error de directividad ( $E_D$ )

El error de directividad aparece por el hecho de no disponer de acopladores ideales. La directividad finita de un acoplador real hace que aparezcan señales indeseadas junto a las señales deseadas. El efecto de este error dependerá tanto del valor de la directividad como del dispositivo a medir. Para incluir este efecto en la simulación con MWO se deberá sustituir el acoplador ideal por uno real, donde se pueda variar el valor de

la directividad. Una forma de conseguir esto con los elementos de MWO es la mostrada en la figura 3.

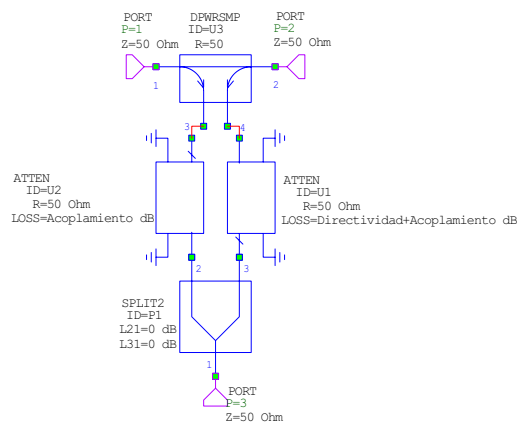


Fig. 3. Esquemático de un acoplador real en MWO.

Para su realización se ha hecho uso de los bloques *DPWRSMP* y *SPLIT2* y de dos atenuadores que seleccionarían el nivel de acoplamiento y de directividad a través de las variables *Directividad* y *Acoplamiento*. Estas variables se podrán posteriormente modificar con la opción *Tune* del MWO para visualizar sus efectos en la medida.

#### III-B. Error de aislamiento ( $E_X$ )

Un acoplamiento entre el camino de excitación y el de respuesta es inevitable, siendo imposible obtener un aislamiento infinito. Una forma de implementar esto dentro del esquema del analizador de redes en MWO consiste en incluir una red de cuatro accesos que conecta ambos caminos. La figura 4 muestra una posible realización de dicha red.

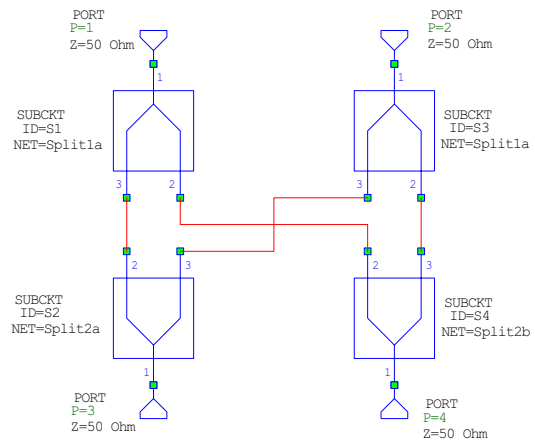


Fig. 4. Esquemático de la red de aislamiento en MWO.

Esta red está compuesta a su vez, por cuatro divisores cuyos valores de división pueden ser variados mediante la variable *X*, que indicaría en dB el nivel de aislamiento.

#### III-C. Error de desadaptación de carga ( $E_L$ ) y fuente ( $E_S$ )

El hecho de que el generador no presente una impedancia exactamente igual a la impedancia de referencia del sistema  $Z_0$ , hace que aparezcan reflexiones indeseadas en el generador y que se produzca un error sistemático. Lo mismo ocurre con

la carga. Para evaluar el efecto del error por desadaptación de carga y fuente en MWO, se definirán como variables la impedancias de referencia de los accesos 1 y 2,  $Z_{0L}$  y  $Z_{0G}$ .

III-D. Error de respuesta en frecuencia en reflexión y transmisión ( $E_R$  y  $E_T$ )

Por último la respuesta en frecuencia de todo el sistema no será plana y esto supondrá la aparición de un cierto rizado en las medidas. Un forma de incluir este efecto en la simulación de MWO consiste en añadir dos bloques que presenten un rizado en la banda de medida del analizador de redes. Para estos bloques se han simulado varios filtros con rizado constante diferente en la banda de paso, que pueden ser sustituidos para observar su efecto en las medidas. La disposición final de todos los bloques que simulan un analizador de redes real en MWO sería la mostrada en la figura 5.

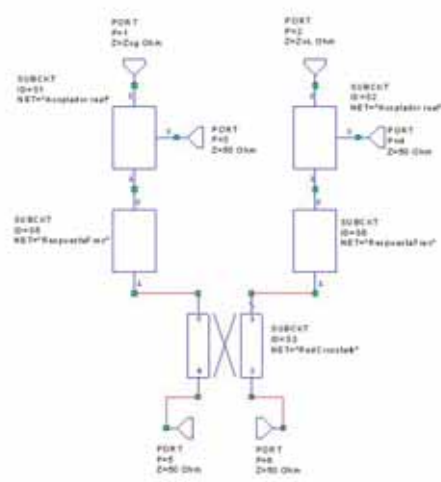


Fig. 5. Esquemático del analizador de redes real en MWO.

IV. DISPOSITIVO A MEDIR

Un vez visto la forma de simular el analizador de redes, se debería colocar el dispositivo a medir (DUT), entre los accesos 5 y 6. Para hacer más versátiles la simulaciones y poder experimentar el efecto que tiene en las medidas la naturaleza del dispositivo a medir, se ha concebido un esquemático que permita modificar los parámetros de dispersión de forma voluntaria. El esquemático de este dispositivo es el mostrado en la figura 6, donde se ha utilizado un circuito equivalente en pi y se ha limitado al caso de dispositivos recíprocos. En el propio esquemático se recogen las ecuaciones con los valores de los elementos del circuito equivalente en función de los parámetros de dispersión del dispositivo.

Una vez escogido un dispositivo a medir y colocado entre los accesos 5 y 6 del esquemático del analizador, se podrán obtener los parámetros de dispersión que mediría el analizador a partir de los parámetros de dispersión de la red de cuatro accesos en que quedaría reducido el esquemático original. Para ello se debe tener en cuenta los niveles de acoplamiento de los acopladores direccionales. Todas estas relaciones se incluyen en la carpeta de Output Equations de MWO. Las medidas obtenidas se pueden contrastar con la conocidas del dispositivo

Parámetros S DUT:

$$\begin{aligned} S11dB &= -15 & \text{angS11} &= 0 * \text{PI} / 180 \\ S22dB &= -15 & \text{angS22} &= 0 * \text{PI} / 180 \\ S21dB &= -2 & \text{angS21} &= 0 * \text{PI} / 180 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S11m &= 10^{(S11dB/20)} & S11 &= S11m * \cos(\text{angS11}) + j * \sin(\text{angS11}) \\ S22m &= 10^{(S22dB/20)} & S22 &= S22m * \cos(\text{angS22}) + j * \sin(\text{angS22}) \\ S21m &= 10^{(S21dB/20)} & S21 &= S21m * \cos(\text{angS21}) + j * \sin(\text{angS21}) \end{aligned}$$

$$Y_0 = 1 / Z_0$$

$$\begin{aligned} Y11 &= Y_0 * ((1 - S11) * (1 + S22) + S12 * S21) / ((1 + S11) * (1 + S22) - S12 * S21) \\ Y12 &= Y_0 * (-2 * S12) / ((1 + S11) * (1 + S22) - S12 * S21) \\ Y21 &= Y_0 * (-2 * S21) / ((1 + S11) * (1 + S22) - S12 * S21) \\ Y22 &= Y_0 * ((1 + S11) * (1 - S22) + S12 * S21) / ((1 + S11) * (1 + S22) - S12 * S21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y1 &= Y11 + Y12 & G1 &= \text{Real}(Y1) & B1 &= \text{Imag}(Y1) \\ Y2 &= -Y12 & G2 &= \text{Real}(Y2) & B2 &= \text{Imag}(Y2) \\ Y3 &= Y22 + Y12 & G3 &= \text{Real}(Y3) & B3 &= \text{Imag}(Y3) \end{aligned}$$

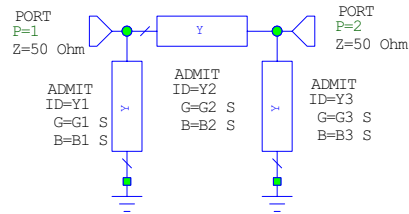


Fig. 6. Esquemático del dispositivo a medir (DUT) en MWO.

a medir y experimentar el efecto que tiene en tiempo real la variación de cada uno de los errores sistemáticos. La figura 7 muestra el resultado del parámetro  $S_{11}$  real y medido, pudiéndose modificar con la opción *Tune* los valores de los errores sistemáticos.

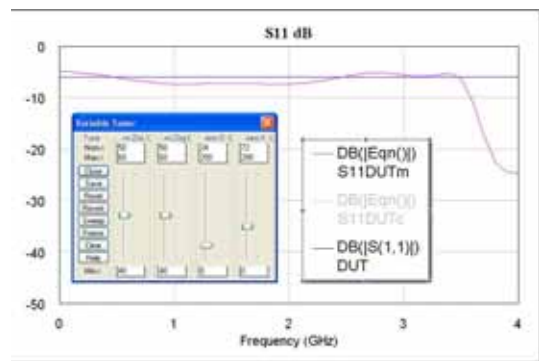


Fig. 7. Parámetro  $S_{11}$  medido y real de un DUT.

V. CALIBRACIÓN

Después de haber visto la forma de simular una medida realizada por un analizador de redes y los efectos de los errores sistemáticos, interesa incluir algún procedimiento de calibración que permita corregir los errores sistemáticos. Para ello se ha escogido la calibración *SOLT* (Shorth Open Load Thru) con cortocircuito, circuito abierto, carga adaptada y thru, disponible en gran parte de los analizadores comerciales. Con el objeto de no tener que estar sustituyendo sucesivamente los dispositivos medidos cada vez, se ha optado por replicar el esquemático del analizador de redes varias veces, e incluir en cada uno de ellos el dispositivo de medida correspondiente. De esta forma habrá un esquemático con el analizador de redes y el DUT conectado, otro con dos cortocircuitos, otro con dos circuitos abiertos, otro con dos cargas ideales y por último uno con los accesos 5 y 6 conectados (*Thru*). Los algoritmos de calibración correspondientes se han incluido también en la carpeta Output Equations de MWO, pudiéndose

visualizar simultáneamente los parámetros reales, los medidos y los calibrados.

Si bien se ha implementado tan solo la calibración conocida como *SOLT*, se podrían añadir también otro tipo de calibraciones, como *TRL*, *LRL*, *TRM* o *LRM*, [6], [7],[8], [9], siendo posible en este caso realizar comparaciones entre diferentes métodos de calibración.

VI. SIMULACIONES

En la sesión práctica de la asignatura se le propone al alumno que visualice las medidas de varios dispositivos con parámetros de dispersión diferente, y que observe el efecto que tienen sobre las medidas los diferentes errores sistemáticos.

Las figuras 8 y 9 muestran una simulación de los parámetros de dispersión  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de un dispositivo cuyos valores reales se habían escogido  $-10\text{ dB}$  y  $-150\text{ dB}$  respectivamente.

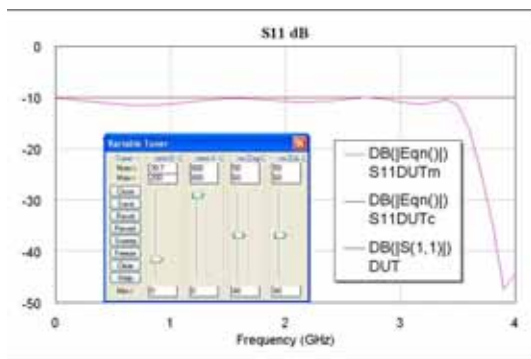


Fig. 8. Parámetro  $S_{11}$  real, medido y calibrado.

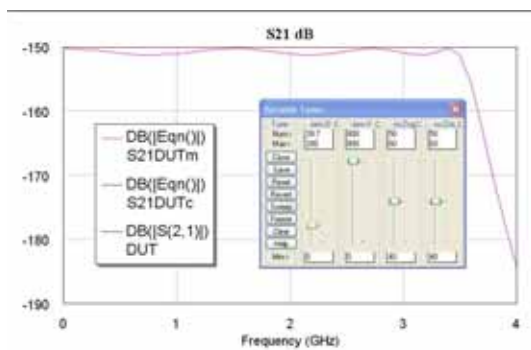


Fig. 9. Parámetro  $S_{21}$  real, medido y calibrado.

Habiendo definido como variables sintonizables tanto la directividad de los acopladores direccionales como el aislamiento y las impedancias de generador y carga, se puede visualizar en tiempo real el efecto que tiene sobre la medida.

Para cuantificar de forma numérica el error cometido en las medidas, se representa el error relativo entre los parámetros de dispersión medidos y reales. Esto permite al alumno rellenar tablas, por ejemplo como las I y II, correspondientes a la medida de un dispositivo con  $20 \log |S_{11}| = -40\text{ dB}$  y otro con  $20 \log |S_{21}| = -120\text{ dB}$  respectivamente.

Con estas tablas el alumno puede percibir la necesidad de directividades grandes cuando las pérdidas de retorno son grandes, o la necesidad de aislamientos elevados cuando las pérdidas de inserción del DUT son grandes.

D(dB)	Error $S_{11}$ (%)
30	316
40	100
50	31,6
60	10
70	3,1

TABLE I

ERROR RELATIVO DE  $S_{11}$  PARA UN DUT CON  $20 \log |S_{11}| = -40\text{ dB}$ .

X(dB)	Error $S_{21}$ (%)
120	35,5
140	3,7
160	0,35

TABLE II

ERROR RELATIVO DE  $S_{21}$  PARA UN DUT CON  $20 \log |S_{21}| = -120\text{ dB}$ .

Un estudio semejante de los errores cometidos se puede hacer una vez calibrado, pudiéndose comparar, en este caso, diferentes procedimientos de calibración.

VII. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta de simulación, dentro del programa MWO, de un analizador de redes vectorial, que permite evaluar el efecto de los errores sistemáticos y la capacidad de calibración de los mismos. Con esta herramienta el alumno de la asignatura *Circuitos de RF: Diseño e instrumentación*, adquiere de forma práctica conocimientos en el manejo de un analizador de redes y capacidad de interpretación de los errores sistemáticos presentes en toda medida.

REFERENCES

- [1] A.Z. Elsherbeni, M.D. Tew, A. Mokaddem, D. Simpson, K. Huang, J. Hao, and R. Windhorst, "The use of multimedia in teaching microwave experiments," *system Theory, 1995., Proceedings of the Twenty-Seventh Southeastern Symposium on 12-14 March 1995.*, pp.342-346, March 1995.
- [2] Mohammed S. Z. Khan, Charles E. Smith, and Darko Kajfez, "NASWAVE-A Program for Display of Standing Waves on Network Analyzers," *IEEE Trans. Education.*, vol. 44, pp.151-157, May 2001.
- [3] R.G. Meyers, and Qiubo Ye, "Incorporation of Zeland's IE3D in the microwave and RF classroom," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE.*, vol. 1, pp.688 - 691, 16-21 June 2002.
- [4] Bruce G. Colpitts, "Teaching Transmission Lines: A Project of Measurement and Simulation," *IEEE Trans. Education.*, vol. 45, pp.245-252, August 2002.
- [5] Kimberley W. Eccleston, "Teaching Microwave Amplifier Design at the Undergraduate Level," *IEEE Trans. Education.*, vol. 47, pp.146-152, February 2004.
- [6] G. Engen and C. Hoer, "Thru-Reflect-Line: An Improved Technique for Calibrating the Dual Six-Port Automatic Network Analyzer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*, vol. 27, pp.987-993, December 1979.
- [7] J. Curran, "Applying TRL Calibration for Noncoaxial Measurements," *Microwave System News.*, March 1988.
- [8] M. Maury Jr., S. March, and G. Simpson, "LRL Calibration of Vector Automatic Network Analyzers," *Microwave Journal.*, May 1987.
- [9] Product Note 8510-8, "Applying the HP 8510B TRL Calibration for Non-Coaxial Measurements," *Agilent Technologies.*

## **HERRAMIENTAS DOCENTES PARA EL ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELÉCTRICAS**

SALGADO LORENZO, YAJAIRA  
GARCÍA UMPIERREZ, RITA  
CABRERA ALMEIDA, FRANCISCO

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Este artículo presenta el desarrollo de dos herramientas docentes implementadas para el estudio de propagación radioeléctrica. Existe en el mercado una gran variedad de herramientas para la gestión de redes y el cálculo de parámetros radioeléctricos. Algunos de ellos tienen fines comerciales y otros están especializados en ayuda a la docencia. Los programas comerciales hacen un estudio exhaustivo y completo. A su vez son muy directos, es decir sólo se muestra el resultado final, pero no los pasos intermedios que pueden tener un interés especial para los entornos académicos. Los programas con fines didácticos están orientados al alumno y no tanto al producto final. Sin embargo, el estudio realizado no es menos riguroso. Dichos programas sirven para poner en práctica los conocimientos del alumno mediante la comparación de los cálculos elaborados por él, con los cálculos de la aplicación. Las herramientas docentes desarrolladas y que se presentan en este artículo tienen dos vertientes. La primera herramienta calcula el campo o potencia recibida para enlaces punto a punto a partir de los modelos determinísticos de reflexión y difracción. Además, se da la posibilidad de obtener representaciones topográficas de una zona, cálculos de distancias mínimas, rugosidad del terreno. La segunda herramienta está orientada al cálculo de coberturas, válido para planificación de coberturas de GSM, FM, PMR, Radio Digital, TDT, etc. En esta parte de la aplicación se ha optado por seguir los modelos de la Recomendación P.1546 de la UIT-R, Okomura-Hata. Ambas herramientas se encuentran ubicadas en asignaturas de propagación dentro de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación. Con estas herramientas docentes desarrolladas dentro del Grupo de Ingeniería de Comunicaciones, se pretende por un lado que el alumno comprenda algunos aspectos vistos en la teoría y por otro, el tener un conjunto de librerías para futuras aplicaciones de mayor relevancia.

# HERRAMIENTAS DOCENTES PARA EL ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELÉCTRICAS

Yajaira Salgado Lorenzo, Rita García Umpierrez, Francisco Cabrera Almeida

Departamento de Señales y Comunicaciones  
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
e-mail: [fcabrera@dsc.ulpgc.es](mailto:fcabrera@dsc.ulpgc.es)

**Abstract-** This article describes the design of a pair of educational software to predict the electric field in links point to point (EREPP) and the coverage in links point-multipoint (PROEM). These educational software have two types of propagation models: deterministic and empirical. Empirical propagation models are those based on observations and measurements alone. Okomura-Hata. Rec. UIT-P. 1546. Cost 231. These models predict mean path loss as a function of various parameters, for example distance, frequency, antenna height, etc. Deterministic models have an analytical solution. Ray Tracing. Diffracted and reflected waves. These educational programs are not guided to the final result. Their main objective is to give the student an useful tool to understand the theoretical concepts of the used models.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen numerosas herramientas para la gestión de redes y el cálculo de parámetros radioeléctricos. Algunos de ellos tienen fines comerciales y otros están especializados en ayuda a la docencia.

Los programas comerciales hacen un estudio exhaustivo y completo. A su vez son muy directos, es decir los pasos intermedios no se especifican, sólo se muestra el resultado que ha dado lugar. Se caracterizan porque su principal objetivo es predecir la viabilidad de un enlace, ocultando los resultados intermedios que pueden carecer de interés en el ámbito profesional pero que pueden tener un interés especial para los entornos académicos.

Los programas con fines didácticos están orientados al alumno y no tanto al producto final. Sin embargo, el estudio realizado no es menos riguroso. Dichos programas sirven para poner en práctica los conocimientos del alumno mediante la comparación de los cálculos elaborados por él, con los cálculos de la aplicación. Este tipo de programas aporta, además del resultado final, los parámetros que han tenido que ver en su cálculo. De este modo, se facilita al alumno el camino que debe seguir para llegar a la solución correcta.

Las herramientas docentes desarrolladas y que se presentan en este artículo tienen dos vertientes. La primera herramienta calcula el campo o potencia recibida para

enlaces punto a punto a partir de los modelos determinísticos de reflexión y difracción [1][2]. Además, se da la posibilidad de obtener representaciones topográficas de una zona, cálculos de distancias mínimas, rugosidad del terreno.

La segunda herramienta está orientada al cálculo de coberturas, válido para planificación de coberturas de GSM, FM, PMR, Radio Digital, TDT, etc. En esta parte de la aplicación se ha optado por seguir los modelos de la Recomendación P.1546 de la UIT-R, Okomura-Hata

Ambas herramientas se encuentran ubicadas en asignaturas de propagación dentro de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación. Con estas herramientas docentes desarrolladas dentro del Grupo de Ingeniería de Comunicaciones, se pretende por un lado que el alumno comprenda algunos aspectos vistos en la teoría y por otro, el tener un conjunto de librerías para futuras aplicaciones de mayor relevancia.

## II. MODELOS DE PROPAGACIÓN

### A. Modelos de propagación punto a punto.

Existen una amplia gama de modelos dedicados a la predicción de campo en los enlaces punto a punto. En [3], se muestra mediante un cuadro de información los diversos métodos aplicables en función de la frecuencia, tal y como se muestra en la figura 1.

La recomendación P.368 es útil para caracterizar la propagación por onda de superficie que se da desde las bandas de VLF hasta parte de la banda de HF. Las recomendaciones P.533 y P.534 nos sirve para las comunicaciones por onda ionosférica. La recomendación P.530, predice el nivel de campo para los radioenlaces del servicio fijo con visibilidad. En este tipo de enlaces, la onda directa es la predominante, aunque también debe considerarse las posibles ondas difractadas (P.526) y reflejadas (P.527).

Las ondas difractadas provocan una atenuación en exceso en el receptor si dichas ondas llegan en contrafase

con respecto a la onda directa. Para determinar dicha atenuación, se aplica el método propuesto por la recomendación P.526, empleando para ello el polígono funicular entre los obstáculos dominantes dentro del vano.

Para caracterizar las posibles ondas reflejadas debido a reflexión especular, es necesario aplicar el modelo de tierra curva o plana dependiendo de la longitud del trayecto, caracterizando el coeficiente de reflexión del terreno mediante la conductividad y constante dieléctrica del terreno. Si el terreno no es liso, se debe alisar el perfil mediante la recta de regresión.

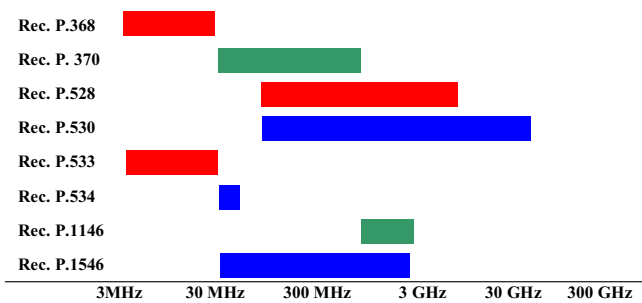


Fig. 1. Traslación de Frecuencias

### B. Modelos de propagación punto a zona.

La modelización de los obstáculos resulta una tarea difícil cuando un terreno es irregular o es de tipo urbano, ya que el trayecto de propagación es muy variable. Para este tipo de casos, se han ido desarrollando modelos empíricos de predicción de propagación, lo cuales se basan en amplias campañas de mediciones para la posterior correlación de los resultados.

La predicción y modelado de los canales de radiocomunicación son una de las partes más complicadas que intervienen en el diseño de sistemas de comunicación, por lo general esta parte se hace de manera estadística, tomando como base mediciones realizadas en una zona específica.

Para este fin, se ha propuesto varios modelos, los cuales apuntan a predecir la potencia de la señal en un punto específico de recepción dentro de un área. De entre estos modelos, cabe destacar las recomendaciones P.370, P.1146, P.529, P.528 y P.1546. Cada uno de estos métodos o modelos están orientados a diversos servicios tales, como móvil aeronáutico, móvil marítimo, móvil terrestre y tienen además diferentes rangos de frecuencias en los que su predicción de nivel de campo eléctrico es válida, tal y como se muestra en la figura 1.

De entre ellos, el más genérico, aunque ello no quiere decir que el más exacto es el P.1546 que da cabida a los servicios de radiodifusión, móvil terrestre y móvil marítimo.

### • Recomendación UIT-R P.1546

La recomendación P.1546 es útil para la predicción de servicios de radiodifusión, servicio móvil terrestre y servicio móvil marítimo. Esta recomendación reemplaza a la UIT-R P.370 y, al igual que ésta, es un instrumento fruto de un consenso internacional. Se presenta en forma de familia de curvas de propagación normalizadas para valores nominales de distancia, altura, frecuencia y tiempo. Dichos valores quedan expuestos en la Tabla 1.

Rango de Frecuencias:	30 a 3000 MHz
Rango de Distancias:	1 a 1000 Km
Frecuencias Nominales:	100, 600, 2000 MHz
Alturas Efectivas:	10 a 1200 m
Altura del Terminal:	10 m
Porcentaje de Tiempo:	1, 10 y 50 %
Porcentaje de Ubicaciones:	50 %
PRA:	1 Kw

Tabla 1. Valores Normalizados de la Recomendación

Una vez determinados los valores nominales de todos los parámetros que se encuentran por debajo y por encima del valor real, se procede a realizar la interpolación en tres niveles. El primer nivel se encarga de realizar las interpolaciones en función de la distancia y de la altura efectiva. El segundo nivel se encarga de recoger dos valores de campo de nivel 1 y realizar el valor de interpolación en función de la frecuencia. Por último el nivel 3 interpola dos valores de nivel 2 para realizar la interpolación en función del tiempo. Una vez realizado las interpolaciones, se debe realizar una serie de correcciones, como:

- Trayectos mixtos: Se efectúa el procedimiento de cálculo para cada tipo de propagación (mar y tierra).
- Corrección para la altura de la antena receptora/móvil: Si la altura de la antena receptora no coincide con el valor de referencia, 10m.
- Corrección por ángulo de despejamiento del terreno: La intensidad de campo se predice con mayor exactitud si se tiene en cuenta el terreno próximo a la antena receptora.
- Corrección para trayectos cortos urbanos y suburbanos: Distancias inferiores a 15 Km.
- Corrección por ubicaciones: Para el caso de antenas receptoras situadas junto al terreno rebasada un porcentaje de ubicaciones distinto del 50%.
- Campo máximo: Si es necesario se limita la intensidad de campo resultante al campo máximo posible.

Los valores finales tienen una correlación alta con los valores medidos para alturas efectivas altas. A medida que van bajando las alturas efectivas, dicha correlación va bajando.

- *Método Okomura-Hata*

Esta es una recomendación ampliamente usada. Es un método empírico desarrollado en ciudades japonesas y que ha servido de base para la planificación de sistemas móviles en la banda GSM. Posteriormente, se han realizado ampliaciones para poder usar dicho método en la banda DCS.

La sencillez de este método lo hace bastante atractivo para la explicación docente del mismo. Sin embargo, como todo modelo simplificado, hace que sólo valga para casos muy específicos, careciendo por tanto de generalidad. Los resultados de este método son parecidos a la recomendación P.1546 para distancias de hasta 10 Km y en los casos donde no haya correcciones.

### III. HERRAMIENTAS DE PREDICCIÓN

Las aplicaciones desarrolladas son PROEM (PROpagación Empírica [4]) y EREP (Estudio Radioeléctrico de Enlaces Punto a Punto [5]). Estas dos herramientas desarrolladas mediante el lenguaje de programación Delphi [6], son válidas en cualquier entorno gráfico Windows 95/98/ME/2K/NT/XP. Las principales funciones que permite realizar estas aplicaciones son:

- Captura y Estructura de Datos topográficos: uno de los principales potenciales que tiene una herramienta de predicción de coberturas de campo eléctrico es contar con un potente y fiable mapa topográfico. Dicho mapa topográfico se ha dispuesto mediante una estructura tipo *raster* de tipo matricial regular con coordenadas UTM con un paso de resolución de 160 m, al que se le ha añadido los puntos singulares.
- Elección del modelo. Las aplicaciones desarrolladas permiten por un lado elegir los estudios de reflexión y difracción a través de los modelos de tierra plana, tierra curva, difracción por obstáculo redondeado, múltiples obstáculos. Para los estudios de cobertura se da la elección de los modelos 1546, Okomura Hata y COST231.
- Gestión de los parámetros de los puntos transmisores y receptores. En cualquier momento, se pueden añadir, borrar y modificar cualquier parámetro concerniente con la ubicación de los transmisores y receptores. Los parámetros más comunes son: Coordenadas UTM, altura, potencia, frecuencia, tipo de antena, ganancia, ancho de haz.
- Obtención de gráficas de perfiles de terreno. Se puede acceder a visualizar cualquier perfil, donde da las características de distancia, rugosidad,

desnivel. De forma adicional, se puede realizar *zooms* en las zonas de más interés.

- Visualización de las zonas de cobertura. Una vez establecido el punto transmisor y elegido la distancia máxima de estudio, se establece un estudio de paso 160 m y un paso angular de 30 grados. Este paso angular depende del número de radiales. Este número es configurable, llegando a pasos de hasta 1 grado.
- Trabajar sin mapa digital. Otra opción válida y contemplada en las aplicaciones es la de realizar los cálculos sin el mapa digital. Los parámetros físicos del terreno han sido obtenidos mediante programas comerciales y con ellos se rellena un formulario donde obtenemos el campo previsto.

### IV. RESULTADOS

Para mostrar los resultados que pueden dar dichas herramientas, se presenta el mapa digital del norte de la Isla de Tenerife tal y como se ve en la figura 2. Se ha situado un punto transmisor en el municipio de San Cristóbal de La Laguna. En dicha figura, se puede observar un mapa de cobertura, en la que cada color indica el nivel de campo recibido. A la izquierda se observa la leyenda donde se ubica el color con el campo recibido.



Fig. 2. Mapa de cobertura

En el punto transmisor, se ha colocado un transmisor en la banda comercial de FM con una antena cuyas características radiantes se encuentran en la parte izquierda de la figura 3. En la parte derecha de dicha figura se observa el perfil correspondiente al radial de cero grados cuyo vano tiene una distancia de 3.6 Km. En dicha figura, se observa que existe un obstáculo dominante y único que será vértice del polígono funicular entre el transmisor y receptor para el cálculo de las pérdidas por difracción.

V. CONCLUSIONES

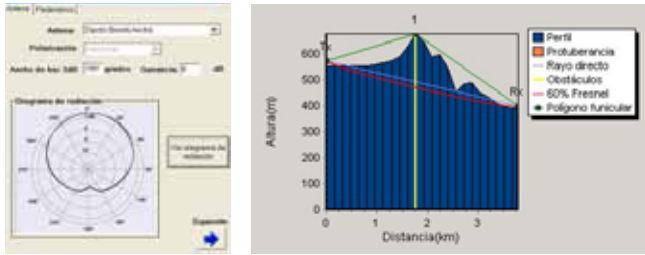


Fig. 3. Características de antena y perfil.

A partir de este perfil, se ha realizado el cálculo del campo previsto a través de los métodos determinísticos que nos lo proporciona la herramienta EREPP y los métodos empíricos que lo proporciona la herramienta PROEM.

En la figura 4 se observa en la parte izquierda el perfil de estudio y el nivel de campo previsto usando para ello la recomendación 1546. En la parte derecha se observa el mismo perfil pero ahora el campo previsto usando el método de Okomura-Hata. Se observa claramente como las correcciones debidas a despejamiento negativo, hacen que en las zonas de sombra próximas a las cimas, el nivel de campo decae. Sin embargo el método de Okomura-Hata al no tener en cuenta dichas correcciones hace que el nivel de campo decaiga más gradualmente.

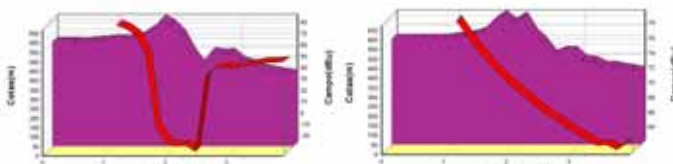


Fig. 4. Perfil y Nivel de Campo.

La aplicación EREPP nos da el valor de campo para puntos específicos usando para ello las recomendaciones 526 y 527 dando un valor de 68 dBμV/m. Para validar dichos modelos en el entorno de estudio queda por realizar una campaña de medidas mediante un medidor de campos y verificar la verosimilitud de los cálculos previstos.

En la tabla 2 están los valores de campo de cada uno de los métodos citados. Se observa que el error cometido en el modelo 1546 es del 8.5% en el de Okomura del 28.5% y de los determinísticos del 3%. Como era de esperar los modelos empíricos son los que cometen un error mayor frente al previsto por el determinístico.

Modelos	Nivel de Campo (dBμV/m)
P.1546	64
Okomura-Hata	50
P.526-527	68
Campo Medido	70

Tabla 2. Comparación de Niveles de Campo

Se ha conseguido desarrollar dos herramientas complementarias en las que se realiza por un lado, un estudio por modelos determinísticos y por otro con modelos empíricos. El uso de estas dos herramientas provee al alumno la posibilidad de corroborar por un lado los resultados realizados hechos en papel para dar así una seguridad en el resultado final. Por el otro lado, se dispone al alumno de realizar un estudio de planificación de coberturas mediante un entorno agradable y sencillo.

Además de estas dos herramientas, el Grupo de Ingeniería de Comunicaciones se provee de las librerías realizadas para ponerlas como módulos en nuevas aplicaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos del MCyT TEC2004-09615-C03, TEC2005-08377-C03 y TEC2005-07010-C02.

REFERENCIAS

- [1] Rec. UIT-R P.526, “Propagación por Difracción”.
- [2] Rec. UIT-R P.527, “Características eléctricas de la superficie terrestre”.
- [3] Rec. UIT-R P.1144-2, “Guía para la aplicación de los métodos de propagación de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones”.
- [4] Y. Salgado Lorenzo, “Implementación de una herramienta para los modelos de propagación empíricos en señales de radiodifusión”. Grupo de Ingeniería de Comunicaciones. PFC-EUITT. ULPGC. 2005
- [5] R. García Umpierrez, “Aplicación para la ayuda a la docencia de los modelos determinísticos de Propagación Radioeléctrica”. Grupo de Ingeniería de Comunicaciones. PFC-EUITT. ULPGC. 2005
- [6] Francisco Charte Ojeda, “Guía Práctica para usuarios: Delphi 7”, editorial Anaya Multimedia, 1996.

## **SOFTWARE DIDÁCTICO DE SIMULACIÓN DE UN ANALIZADOR ESCALAR DE REDES**

RIVAS REDONDO, ROBERTO RIVAS REDONDO  
CORTÉS ALCALÁ, CARLOS  
ARQUÉS OROBÓN, FRANCISCO JOSÉ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

En la presente ponencia se presenta el software didáctico realizado en la E.U.I.T. de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid en el que se simula el funcionamiento de un analizador escalar de redes. El resultado final que se pretende obtener es un programa cuyo interface de usuario sea similar al panel frontal de los analizadores presentes en los el laboratorio de electrónica de Comunicaciones de la mencionada escuela. De esta forma, el interface de usuario del software desarrollado, contiene los mismos botones y cada uno de ellos realiza las mismas funciones que el analizador real, lo que ofrece grandes posibilidades como software de aprendizaje del manejo de este equipo. Adicionalmente el software contiene dos partes dedicadas al estudio de la teoría de funcionamiento del analizador, una genérica y otra acerca del simulado.

# SOFTWARE DIDÁCTICO DE SIMULACIÓN DE UN ANALIZADOR ESCALAR DE REDES

Roberto Rivas Redondo, Carlos Cortés Alcalá<sup>(1)</sup>, Francisco José Arqués Orobón<sup>(2)</sup>.

ccortes@diac.upm.es<sup>(1)</sup>, fjarques@diac.upm.es<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid.

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid.

**Abstract-** This paper shows a software made in the E.U.I.T. Telecomunicación of the Technical University of Madrid (U.P.M.), in witch is simulated the working of network analyzer. The result is a programme that his interface is similar than the frontal panel of a real and concrete analyzer. The interface contents the same keys that achieve exactly the same function as in the real analyzer, consequently it offers great possibilities like learning software to learn the management of the analyzer. Furthermore, this software show the internal working besides you can also see how it works.

## I. INTRODUCCIÓN

En la presente ponencia se presenta el software didáctico realizado en la E.U.I.T. de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid en el que se simula el funcionamiento de un analizador escalar de redes. El resultado final que se pretende obtener es un programa cuyo interface de usuario sea similar al panel frontal de los analizadores presentes en los el laboratorio de electrónica de Comunicaciones de la mencionada escuela. De esta forma, el interface de usuario del software desarrollado, contiene los mismos botones y cada uno de ellos realiza las misma funciones que el analizador real, lo que ofrece grandes posibilidades como software de aprendizaje del manejo de este equipo. Adicionalmente el software contiene dos partes dedicadas al estudio de la teoría de funcionamiento del analizador, una genérica y otra acerca del simulado.

## II. OBJETIVOS DEL PROGRAMA

El principal objetivo del de este programa es facilitar y completar el aprendizaje del funcionamiento de un equipo de medida ampliamente utilizado en telecomunicaciones, buscando ofrecer no solo el manejo del aparato sino la posibilidad de estudiar la estructura interna a nivel de bloques, comprensión del proceso que, a nivel de bloques, se realiza sobre la señal de entrada hasta su presentación final en pantalla. El conocimiento del funcionamiento interno permitirá al usuario decidir con mayor certeza acerca de la configuración idónea de los parámetros y la realización de medidas con una mayor fiabilidad y precisión. Así mismo se plantea como objetivo el poder seleccionar distintas dispositivos para poder visualizar y medir su comportamiento, tal y como se realizaría en un analizador

real. De esta forma el software puede aportar ayuda académica a la explicación del funcionamiento de circuitos como amplificadores, filtros, atenuadores...

Dado los objetivos marcados, el programa se ha desarrollado íntegramente en Visual Basic por su sencillez de en el desarrollo de pantallas gráficas lo que ha ofrecido una gran versatilidad en la elaboración, consiguiendo por ejemplo gran similitud entre el software y el equipo real, tanto en el frontal del aparato como sobretodo en la pantalla de medida.

Cabe indicar que se han implementado fundamentalmente la casi totalidad de las funcionalidades de medida y visualización. Existen determinadas funciones en el equipo real tales como la configuración de los buses de comunicación externa que tiene sentido implementar, por al acceder a todas estas, el programa ofrece una ventana con la descripción de la función correspondiente.

Por último indicar que la realización del programa se ha basado en el analizador escalar de redes **HP 8713C**, disponible en los laboratorios del departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

## III. EL PROGRAMA

La estructura general del programa según se muestra en la figura 1, muestra una pantalla inicial, que simplemente realiza la presentación de éste para a continuación pasar a una pantalla en la que se nos presentarán las distintas opciones disponibles, por tanto desde esta pantalla se podrá acceder a alguna de las tres opciones que permite el programa, que serán, una pantalla con el analizador de redes HP 8713C virtual, otra que contiene la información teórica de éste, y otra que en la que se puede acceder a la información del funcionamiento interno del analizador expresada como diagrama de bloques (figura 2).

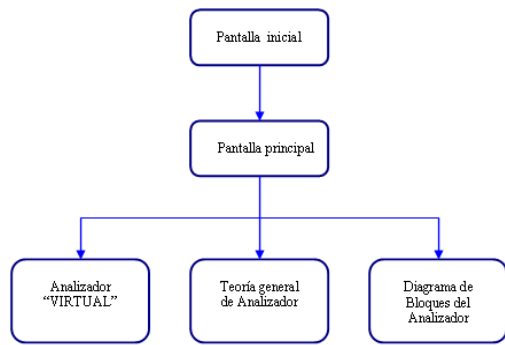


Fig. 1. Estructura del Programa.



Fig. 2. Pantalla Principal.

Desde la pantalla Analizador “Virtual” se pueden manejar las funciones más utilizadas el Analizador de Redes, de forma que da opción de medir sobre tres dispositivos: amplificador, filtro paso-banda y atenuador.

Una vez cargado el dispositivo a medir, se puede interactuar con la aplicación, de forma que se realicen las funciones de escalado, frecuencia y potencia. Sobre la media que aparece en la pantalla, se puede, al igual que se hace con un analizador real, activar los marcadores con todas sus funciones.



Fig. 3. Pantalla Analizador “Virtual”.

Otra de las funciones que ofrece el programa, es la de Teoría, del Analizador, en la que se presenta una pantalla donde se describe el sistema, de forma que pueda servir de

apoyo para el correcto entendimiento del funcionamiento del aparato. Se acompaña de unos diagramas de bloques sencillos.



Fig. 4. Pantalla Teoría del Analizador.

Por último, la función “Diagrama de Bloques” del Analizador, ofrece la posibilidad de acceder a los distintos elementos que forman el analizador, pudiendo observar, al hacer clic sobre alguna de las partes más interesantes desde el punto de vista didáctico, la señal en ese punto.

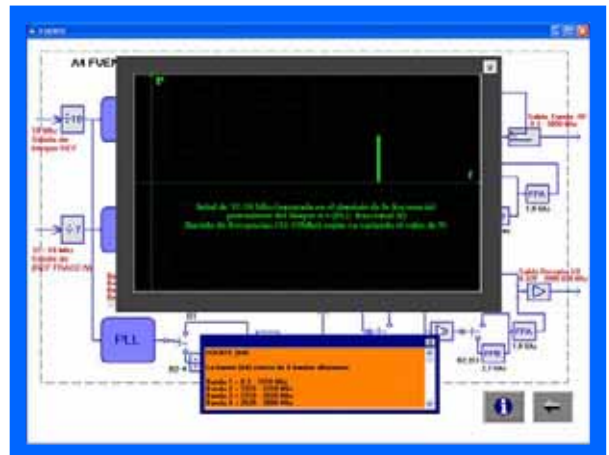


Fig. 5. Pantalla Diagrama de Bloques.

#### IV. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este programa se continúa la línea de desarrollo orientado al aprendizaje del funcionamiento y operación de los equipos de medida utilizados en laboratorios docentes. Dada la experiencia acumulada, este tipo de programas, se muestran como una herramienta útil y eficaz como apoyo didáctico, permitiendo el estudio y familiarización de los alumnos con los sistemas de medida propios de su futura profesión ni la necesidad de disponer de éstos físicamente. Como ampliación al presente trabajo, se pretende crear una línea en la que se desarrollen distintos dispositivos “virtuales” que permitirían tanto el estudio del equipamiento de medida como el trabajo y estudio de distintas disciplinas relacionadas con la electrónica y circuitos.

REFERENCIAS

- [1] David Ballo, "Network Analyzers Basics", Hewlett-Packard Company, 1992
- [2] "HP8711C/13C User's Guide.", Hewlett-Packard Company, 1992
- [3] "HP 8711C/12C/13C/14C Service Guide.", Hewlett-Packard Company, 1992"
- [4] "Understanding The Fundamental Principles Of Vector Analysis", Hewlett-Packard Application note 1287-1
- [5] "Exploring The Architectures Of Network Analyzers", Hewlett - Packard Application note 1287-2

## **FORMULACIÓN DE LA MATRIZ DE DISPERSIÓN EN EL MÉTODO TLM USANDO MATHEMATICA**

SALINAS EXTREMERA, ALFONSO  
MORENTE CHIQUERO, JUAN ANTONIO  
PORTÍ DURÁN, JORGE ANDRÉS  
BLANCHARD, CEDRIC  
RODRÍGUEZ SOLA, MARGARITA

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
UNIVERSIDAD DE GRANADA  
UNIVERSIDAD DE GRANADA  
UNIVERSIDAD DE GRANADA  
UNIVERSIDAD DE GRANADA

In this communication the derivation from charge, potential and energy conservation principles of the scattering properties in a generic symmetrical condensed node with capacitive, inductive and lossy (electric and magnetic) stubs is presented. A new matrix equation for energy conservation is derived. Using Mathematica as a symbolic program language the three-dimensional scattering matrix node, represented by three shunt and three parallel circuits, is obtained solving the linear and quadratic equations system formed applying conservation principles. Other less order scattering matrix nodes can be obtained using the algorithm.

# FORMULACIÓN DE LA MATRIZ DE DISPERSIÓN EN EL MÉTODO TLM USANDO *Mathematica*

A. Salinas<sup>(1)</sup>, J. A. Morente Chiquero<sup>(2)</sup>, J. Portí Durán<sup>(2)</sup>, C. Blanchard<sup>(2)</sup>, M. Rodríguez-Sola<sup>(2)</sup>

asalinas@ugr.es jmorente@ugr.es jporti@ugr.es cedric@ugr.es

<sup>(1)</sup>Departamento de Electromagnetismo y Física de la Materia . Universidad de Granada

<sup>(2)</sup>Departamento de Física Aplicada . Universidad de Granada

**Abstract-** In this communication the derivation from charge, potential and energy conservation principles of the scattering properties in a generic symmetrical condensed node with capacitive, inductive and lossy (electric and magnetic) stubs is presented. A new matrix equation for energy conservation is derived. Using *Mathematica* as a symbolic program language the three-dimensional scattering matrix node, represented by three shunt and three parallel circuits, is obtained solving the linear and quadratic equations system formed applying conservation principles. Other less order scattering matrix nodes can be obtained using the algorithm.

## I. INTRODUCCIÓN

El método TLM (transmission line modeling) es un método numérico en el dominio del tiempo y basado en una formulación diferencial [1], pero a diferencia del método de diferencias finitas, TLM efectúa un modelo del problema físico en base a líneas de transmisión interconectadas por las que se propagan y dispersan pulsos de voltaje e intensidad [2].

Desde la formulación del nudo simétrico condensado [3] la dificultad principal del método está en la determinación de la matriz de dispersión (scattering) de los pulsos incidentes para obtener los pulsos reflejados. Para el caso sin pérdidas P.B. Johns obtiene el sistema de ecuaciones a partir de la conservación de la carga, flujo magnético (o conservación del potencial) y energía en el nudo. En los dos primeros casos las ecuaciones obtenidas son lineales, pero la conservación de la energía es equivalente a la condición de unitariedad de la matriz de dispersión:

$$\tilde{S}\tilde{Y}\tilde{S} = \tilde{Y} \quad (1)$$

siendo  $\tilde{S}$  la matriz de dispersión e  $\tilde{Y}$  la matriz diagonal de admitancias de las líneas y stubs implicados en el nudo [1], lo que supone ecuaciones cuadráticas. El procedimiento de solución es añadir el número mínimo de ecuaciones no lineales para resolver las incógnitas que quedan tras resolver las ecuaciones lineales.

La generalización del nudo simétrico condensado a medios con pérdidas [4], [5] se hace añadiendo stubs de pérdidas. La matriz de dispersión se obtiene incluyendo la impedancia y admitancia de dichos stubs en las expresiones obtenidas en el caso sin pérdidas.

En esta comunicación se obtiene una expresión equivalente a 1 para la conservación de la energía en el caso más general

de nudo simétrico condensado. Haciendo uso de *Mathematica* como lenguaje de programación de cálculo simbólico se plantea el sistema de ecuaciones general y se obtiene su solución. A partir de ésta se puede derivar cualquier otro nudo sin más que ir reduciendo en número de variables.

## II. PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN APLICADOS AL NUDO TLM

El nudo simétrico condensado más general se compone de 6 circuitos, en correspondencia biunívoca con cada una de las ecuaciones de Maxwell expresadas en sus componentes generalizadas. La ecuación de Maxwell-Faraday se asocia a circuitos bidimensionales serie con intensidades definidas en el nudo (de las que se calcula  $\vec{H}$ ) y voltajes en las puertas relacionados con flujo de campo eléctrico. De forma dual, la ecuación de Maxwell-Ampère se corresponde con tres circuitos paralelos con voltajes definidos en los nudos (asociados a su vez con las componentes de  $\vec{E}$ ), mientras que las intensidades entrantes por cada puerta se corresponden con flujo de campo magnético.

En la Fig. 1 se muestra el circuito serie asociado con la componente  $i$  del campo magnético. Las líneas principales, y su voltaje e intensidad asociadas, se numeran mediante los índices  $[k, p, j]$ . El primer índice corresponde a la dirección de propagación, el segundo toma como valores  $p$  de positivo o  $n$  de negativo según el sentido de propagación, y por último el tercer índice indica la polarización: el campo eléctrico tiene la dirección  $j$ .

Este circuito también tiene un stub cortocircuitado que añade autoinducción al circuito y permite modelar la permeabilidad del medio. El voltaje en la puerta del stub es cero y la intensidad la hemos notado con  $I[i]$ , siendo  $i$  la componente del campo magnético definido. Las pérdidas magnéticas del medio tienen su equivalente en un stub infinito de impedancia característica  $Z[i]$ .

Si consideramos que las líneas de transmisión están alimentadas en las puertas por pulsos rectangulares de duración  $\Delta t$  y amplitud unidad, y dado que no hay acumulación de flujo magnético se tendrá que verificar en centro del nudo:

$$(V[j, p, k] - V[j, n, k]) - (V[k, p, j] - V[k, n, j]) - VL[i] = -Z[i]I[i] \quad (2)$$

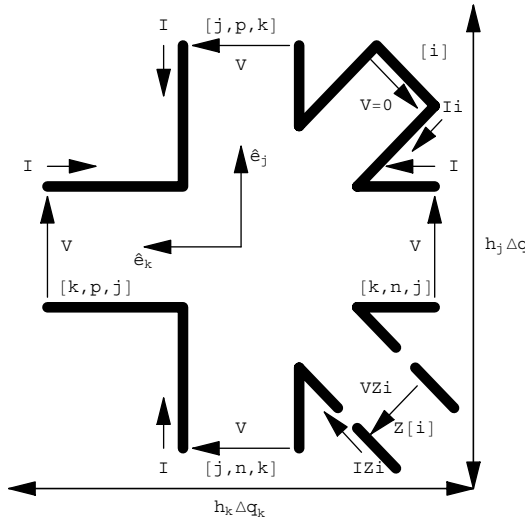


Fig. 1. Nudo serie

para cada instante de tiempo  $m\Delta t$ .

De forma análoga tendremos un stub paralelo que corresponde a la componente  $i$  de la ecuación de Maxwell-Ampère y que nos determina la componente  $i$  del campo eléctrico a partir del voltaje definido en centro del nudo (Fig. 2).

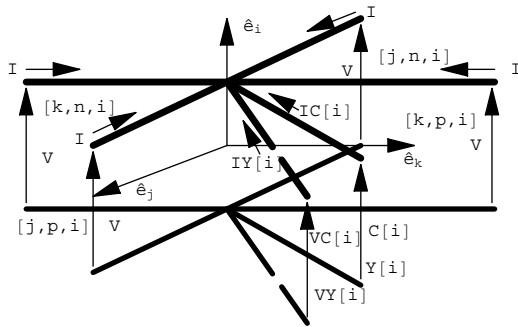


Fig. 2. Nudo paralelo

La conservación de la carga genera la siguiente ecuación:

$$I[j, p, i] + I[j, n, i] + I[k, p, i] + I[k, n, i] + IC[i] = Y[i] * V[i, m] \quad (3)$$

Los voltajes se evalúan a partir de la suma de voltaje incidente desde el nudo vecino más el voltaje reflejado en el nudo. Para evaluar las intensidades transformamos éstas en voltajes a partir de su relación con la impedancia de la línea:

$$\begin{aligned} V &= V^i + V^r \\ I &= I^i + I^r = V^i Y - V^r Y \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $Y$  es la admitancia característica de la línea. Para obtener los voltajes reflejados aplicamos la matriz de dispersión a los voltajes incidentes. Los coeficientes que hay que obtener son:

- Coeficiente de reflexión en la propia línea:  $r[i, \pm, j] \equiv r_{ij}$

- Coeficiente de transmisión a través de la línea:  $t[i, \pm, j] \equiv t_{ij}$
- Coeficientes de dispersión en el nudo serie  $k$  a través de líneas principales mutuamente perpendiculares:  $psk$
- Coeficientes de dispersión en el nudo serie  $k$  a través de líneas principales y pulsos provenientes del stub inductivo:  $ifk$
- Coeficientes de dispersión en el nudo serie  $k$  por el stub inductivo de pulsos provenientes de alguna línea principal:  $itk$
- Coeficientes de dispersión en el nudo paralelo  $k$  a través de líneas principales mutuamente perpendiculares:  $ppk$
- Coeficientes de dispersión en el nudo paralelo  $k$  a través de líneas principales y pulsos provenientes del stub capacitivo:  $cfk$
- Coeficientes de dispersión en el nudo paralelo  $k$  por el stub capacitivo de pulsos provenientes de alguna línea principal:  $itk$
- Coeficientes de reflexión en los diferentes stubs inductivos y capacitivos:  $irko$   $crk$

Tenemos por tanto 12 líneas principales, 3 stubs inductivos en los circuitos serie, 3 stubs capacitivos en los circuitos paralelo, junto con otros 6 stubs de pérdidas en cada circuito correspondiente a las pérdidas eléctricas (circuitos paralelo) y magnéticas (circuitos serie). La numeración del 13 al 18 corresponde a stubs capacitivos (13 al 15) e inductivos (16 al 18), mientras que del 19 al 24 corresponde a stubs de pérdidas eléctricas (19 al 21) y magnéticas (22 al 24).

Para la conservación de la energía en el nudo utilizaremos magnitudes definidas en el centro del nudo, y por tanto en instantes enteros. Puesto que alimentamos con pulsos de amplitud constante en todo el intervalo temporal  $\Delta t$  tendremos:

$$\sum_{j=1}^{18} V_j^i I_j^i + V_j^r I_j^r = \sum_{j=19}^{21} Y_j (V^i + V^r)_{j-6}^2 + \sum_{j=22}^{24} Z_j (I^i + I^r)_{j-6}^2$$

donde hemos tenido en cuenta que los voltajes en los stubs de pérdidas eléctricas son iguales a los voltajes en los stubs capacitivos, mientras que las intensidades en los stubs de pérdidas magnéticas son iguales a las intensidades (cambiadas de signo, pero al estar elevadas al cuadrado no afecta) en los stubs inductivos. Haciendo uso de las matrices introducidas en (1):

$$\begin{aligned} \tilde{V}^i T (\tilde{Y} - \tilde{S}^T \tilde{Y} \tilde{S}) \tilde{V}^i &= \sum_{j=13}^{15} Y_{j+6} \left( \sum_{m=1}^{18} (\delta_{j,m} + S_{j,m}) V_m^i \right)^2 + \\ &\sum_{j=16}^{18} Z_{j+6} Y_j^2 \left( \sum_{m=1}^{18} (\delta_{j,m} - S_{j,m}) V_m^i \right)^2 \end{aligned}$$

Definimos:

$$Y'_j = \begin{cases} Y_{j+6} & 13 \leq j \leq 15 \\ Z_{j+6} Y_j^2 & 16 \leq j \leq 18 \\ 0 & 1 \leq j \leq 12 \end{cases}$$

$$D_{j,m} = \begin{cases} \delta_{j,m} + S_{j,m} & 13 \leq j \leq 15 \\ \delta_{j,m} - S_{j,m} & 16 \leq 18 \\ 0 & 1 \leq 12 \end{cases}$$

tendremos:

$$\tilde{V}^i{}^T (\tilde{Y} - \tilde{S}^T \tilde{Y} \tilde{S}) \tilde{V}^i = \sum_{j=1}^{18} Y_j' \left( \sum_{m=1}^{18} D_{j,m} V_m^i \right)^2 = \tilde{V}^i{}^T (\tilde{D}^T \tilde{Y}' \tilde{D}) \tilde{V}^i$$

y por tanto (1) se escribe para el caso general con pérdidas:

$$\tilde{V}^i{}^T (\tilde{Y} - \tilde{S}^T \tilde{Y} \tilde{S} - \tilde{D}^T \tilde{Y}' \tilde{D}) \tilde{V}^i = 0 \quad (5)$$

### III. SISTEMA DE ECUACIONES CON *Mathematica*

Para obtener el sistema de ecuaciones apropiado a partir de (2),(3) y (5) tenemos que introducir pulsos de voltaje por puertas y stubs. En el caso tridimensional podemos reducir el número de circuitos necesarios a uno serie y otro paralelo y luego generalizar el resultado con los valores pertinentes de admitancias e impedancias. Los seis circuitos se utilizan para casos donde haya simetría en una o más variables, eliminando las líneas principales correspondientes y manteniendo el resto.

Volviendo al caso que nos ocupa, tenemos un total de 10 incógnitas en la matriz de dispersión. De las condiciones (2) y (3) se obtienen 4 ecuaciones independientes alimentando por cualquiera de las líneas principales y por el stub en los circuitos serie y paralelo. El resto de ecuaciones necesarias se obtiene a partir de (5) introduciendo pulsos de voltaje por una de las líneas principales, y por cada uno de los stubs. También hay que acoplar incógnitas introduciendo sendos pulsos por línea y stub simultáneamente [6].

Resolviendo el sistema se obtiene un conjunto de 32 soluciones que contiene los casos bidimensionales y monodimensionales así como las soluciones tridimensionales analizadas en [7], convenientemente generalizadas para incluir las pérdidas eléctricas y magnéticas [1].

### IV. CONCLUSIONES

Se ha obtenido la matriz de dispersión del nudo simétrico condensado con stubs de pérdidas eléctricas y magnéticas a partir de los principios de conservación de carga, flujo magnético y energía, siguiendo el mismo método que P. B. Johns en [3], para lo que ha sido necesario obtener una ecuación matricial 5 que generaliza para medios con pérdidas eléctricas y magnéticas la condición 1. Se ha desarrollado un programa en *Mathematica* para la formación y resolución del sistema de ecuaciones. El algoritmo desarrollado también permite obtener la matriz de dispersión para cualquier nudo (tridimensional, bidimensional o monodimensional) en coordenadas generalizadas.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España dentro del proyecto FIS2004-03273, cofinanciado con fondos FEDER de la Unión Europea.

### REFERENCIAS

- [1] C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modelling Method*. New York: IEEE Press., 1995.
- [2] P. B. Johns, "The art of modelling," *Electronics & Power*, pp. 565-569, Aug. 1979.
- [3] —, "A symmetrical condensed node for the TLM method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 35, pp. 370-377, Apr. 1987.
- [4] P. Naylor and R. A. Desai, "New three dimensional symmetrical condensed node for solution of EM wave problems by TLM method," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 492-494, 1990.
- [5] F. J. German, G. K. Gothard, and L. S. Riggs, "Modelling of materials with electric and magnetic losses with the symmetrical condensed TLM method," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1307-1308, Aug. 1990.
- [6] J. A. Portí, J. A. Morente, and A. Salinas, "On the circuit description of TLM nodes," *International Journal of Electronics*, to be published.
- [7] J. A. Portí, "Contribución al estudio del nudo simétrico condensado en el método numérico TLM," Ph.D. dissertation, Univ. de Granada, Granada, Spain, 1993.