

# Caracterización en Banda Ancha de la Constante de Propagación de Materiales de Impresión 3D

Mario Pérez-Escribano<sup>(1)</sup>, Enrique Márquez-Segura<sup>(2)</sup>  
 {mpe<sup>(1)</sup>,ems<sup>(2)</sup>}@ic.uma.es

Dpto. Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, Boulevard Louis Pasteur, 35, 29010 Málaga (España)

**Resumen**—In this work, a method for the characterization of the relative permittivity in broadband of 3D printing materials is proposed. It uses microstrip lines of different lengths covered with the material to be characterized. Once S-parameters of the structure are obtained, some transformations are performed, using transmission parameters and the line length differences, in order to obtain the propagation constant of the lines, from which it is possible to extract the characteristics of the material to be studied. The method has been tested by manufacturing and measuring lines covered with ABS material, showing results very close to those of electromagnetic simulation and those shown in the literature for this material.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las tecnologías de fabricación aditiva están cada vez más presentes en muchos ámbitos de la sociedad. Prueba de ello son las numerosas aplicaciones en el ámbito industrial, sanitario o científico donde los dispositivos construidos con impresión 3D están teniendo actualmente. Concretamente, en el ámbito de los circuitos para la banda de microondas se han propuesto diversas estructuras [1], [2]. Sin embargo, existe una problemática asociada a la gran cantidad de materiales para la fabricación disponibles en el mercado, debido a la escasa información de las propiedades electromagnéticas que sus hojas de características suelen aportar. Es por ello que son muy necesarias técnicas de caracterización de los citados materiales para que estos puedan ser utilizados en diseños y simulaciones. Por ello, cada vez son más las investigaciones centradas en la propuesta de métodos para la caracterización [3].

En este trabajo se propone un método de caracterización basado en la medida de líneas de transmisión no homogéneas. En general, los métodos presentes en la literatura se dividen en dos grandes tipos: métodos resonantes y métodos de banda ancha. Por un lado, los resonantes [4] están basados en estudiar el comportamiento de las estructuras en las resonancias de las mismas. Son muy exactos en los valores de las resonancias, permiten estimar pérdidas con gran precisión, además de mostrar una mayor independencia respecto a las transiciones de la estructura. Por otro lado, los métodos de banda ancha [5] permiten estimar el comportamiento en un número de puntos idealmente infinito (aunque en la práctica esté limitado por la resolución de los analizadores vectoriales). Este tipo de métodos pueden presentar resultados menos exactos en lo que a la estimación de pérdidas se refiere, pero, por el contrario, permiten estimar los valores de la constante de fase en banda ancha.

El método propuesto en este trabajo para la caracterización de materiales es de banda ancha, y está basado en [6]. La idea principal consiste en colocar un sustrato de permitividad desconocida sobre varias líneas microstrip de distinta longitud

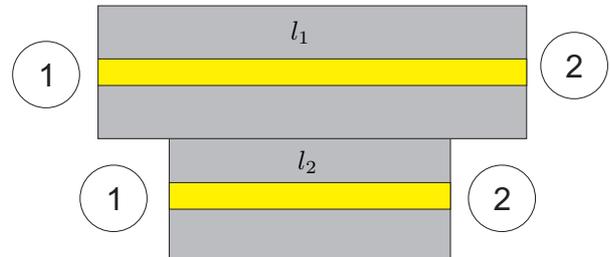


Fig. 1. Líneas microstrip para la caracterización de la permitividad de materiales de impresión 3D.

sobre un sustrato de permitividad conocida, de esta forma se puede estimar su permitividad relativa efectiva y la constante de atenuación. Así, se puede estudiar la constante de propagación del conjunto y obtener posteriormente las características del sustrato superior. El método que se presenta ha permitido caracterizar materiales hasta 67 GHz, frecuencia máxima del analizador de redes que se ha empleado. La sección II describe el método empleado, así como los pasos a seguir para poder realizar las medidas. En la sección III se exponen resultados experimentales sobre el material ABS, empleado de forma intensiva en el desarrollo de dispositivos con tecnología e deposición de filamento (FDM). Por último, en la sección IV se detallan las conclusiones obtenidas.

## II. MÉTODO DE BANDA ANCHA PROPUESTO

El método que se propone en este trabajo para la extracción de la constante de propagación de la estructura parte de la idea propuesta por Bianco-Parodi [5]. Es muy similar al método planteado en [7]. Para ello, es necesario tener la medida de los parámetros S de dos líneas de transmisión de distinta longitud. En la Fig. 1 se muestra el esquema de la medida. Para utilizar el método será necesario hacer una transformación de parámetros S a parámetros T (o de transmisión). Se debe tomar la matriz  $M_n = R_1 L_n R_2$ , siendo  $M_n$  la matriz de transmisión de la línea  $n$ , la cual considera los efectos de la propia línea de transmisión ( $L_n$ ) y de las transiciones ( $R_1$  y  $R_2$ ). En este caso,  $L_n$  es una matriz diagonal que viene determinada para cada línea por

$$L_i = \begin{pmatrix} e^{-\gamma l_i} & 0 \\ 0 & e^{+\gamma l_i} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Posteriormente, se considera la suma de dos matrices de líneas de distinta longitud

$$M_1 + M_2 = R_1 \begin{pmatrix} 1 + e^{-\gamma \Delta l} & 0 \\ 0 & 1 + e^{+\gamma \Delta l} \end{pmatrix} R_2, \quad (2)$$

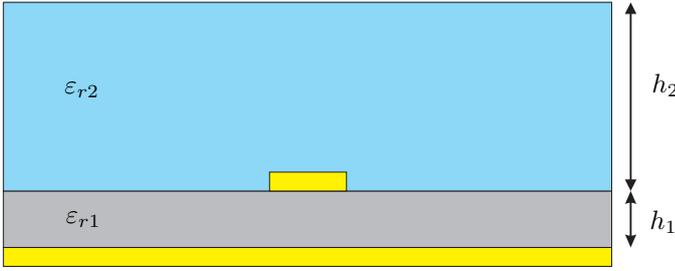


Fig. 2. Estructura de capas de las líneas microstrip para la caracterización de la permitividad de materiales de impresión 3D.

siendo  $\Delta l = l_1 - l_2$ . Si el determinante de la matriz de la suma se divide entre el determinante de una de ellas, por ejemplo  $M_2$ , el resultado

$$\frac{|M_1 + M_2|}{|M_2|} = (1 + e^{-\gamma\Delta l}) (1 + e^{+\gamma\Delta l}) \quad (3)$$

nos permite despejar la constante de propagación como

$$\gamma = \frac{1}{\Delta l} \cosh^{-1} \left( \frac{|M_1 + M_2|}{2|M_2|} - 1 \right). \quad (4)$$

Este procedimiento es la forma general de obtener la constante de propagación a través de la medida de dos líneas de transmisión. La ecuación plantea problemas de discontinuidades cuando se tienen diferencias de longitudes eléctricas múltiplo de  $\pi/2$  debido a la presencia de infinitas soluciones posibles. Este problema se ha solventado satisfactoriamente resolviendo la ecuación no lineal (4) empleando un método numérico iterativo, en este caso el método de Newton.

La técnica de caracterización de materiales planteada en este trabajo tiene en cuenta una estructura de capas como la mostrada en la Fig. 2. En ella, se parte de una línea microstrip en la que la permitividad relativa del sustrato inferior ( $\epsilon_{r1}$ ) es conocida. A partir de la medida de la permitividad relativa efectiva de la estructura completa ( $\epsilon_{reff}$ ), es posible obtener la permitividad del sustrato superior ( $\epsilon_{r2}$ ) usando el método planteado en [8].

El proceso de caracterización, por tanto, sigue el siguiente orden:

1. Se monta la estructura según el esquema propuesto en la Fig. 2 y se toman las medidas de los parámetros S.
2. A partir de las medidas se estima la constante de propagación ( $\gamma$ ) y se extrae la permitividad relativa efectiva de la estructura ( $\epsilon_{reff}$ ).
3. Con la permitividad relativa efectiva obtenida, se aplica el método planteado en [8], conociendo  $\epsilon_{reff}$  y  $\epsilon_1$ , de tal manera que se obtiene la permitividad del sustrato superior ( $\epsilon_2$ ).

### III. RESULTADOS

Se ha desarrollado un experimento donde se han tomado un conjunto de líneas microstrip de ancho  $w = 1,65$  mm sobre el sustrato Rogers 4350B, el cual tiene una permitividad relativa nominal, según el fabricante, de  $\epsilon_{r1} = 3,66$ , una altura de  $h_1 = 30$  mils y una metalización de  $t = 17$   $\mu\text{m}$ . La longitud elegida para las líneas es de  $l_1 = 20$  mm y  $l_2 = 80$  mm. Sobre ellas se ha colocado una pieza de ABS Ultimaker de altura  $h_2 = 3$  mm, construida con la

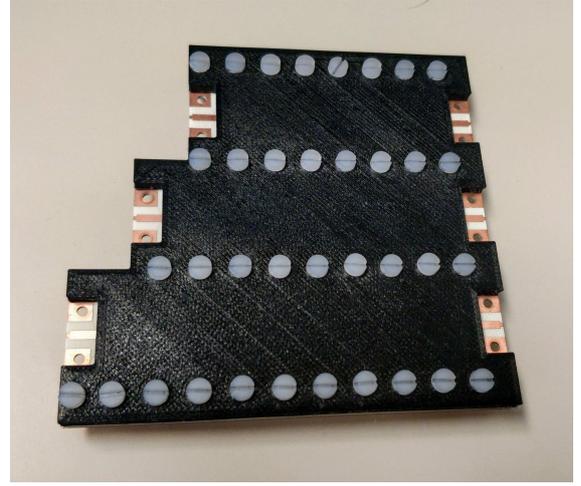


Fig. 3. Fotografía del prototipo construido.

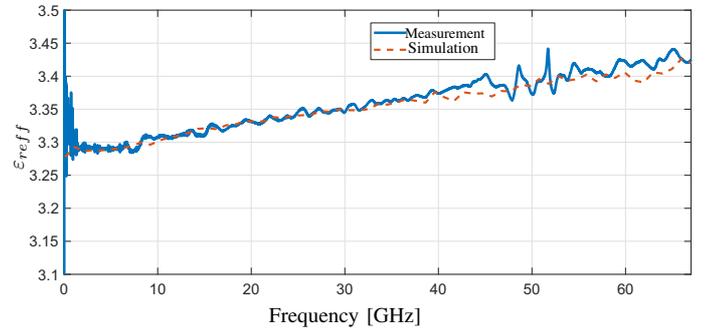


Fig. 4. Permitividad relativa efectiva medida y simulada de la estructura.

impresora Ultimaker 3, con un relleno del 100%. La unión de la pieza con el sustrato se ha realizado mediante tornillos de Nylon. En la Figura 3 se puede ver una fotografía del prototipo construido. El conjunto de líneas se han medido entre 0.1 y 67 GHz empleando un analizador de redes Agilent PNA-X (N4257A). La permitividad relativa efectiva ( $\epsilon_{reff}$ ) obtenida varía entre 3.25 y 3.45, como muestra la Fig. 4. A esta permitividad efectiva se le aplica el método para la extracción de la permitividad efectiva de una microstrip multicapa. Tras este proceso se obtiene que la permitividad del sustrato superior es 2.67. Respecto a la tangente de pérdidas obtenida, esta es  $\tan \delta = 0,01$ . Este valor es introducido en el simulador ANSYS HFSS, simulando la estructura de la misma forma que ha sido medida. Tal y como se muestra en la Fig. 4, los resultados calculados a través de la simulación y los medidos muestran una gran semejanza, mostrando las excelentes prestaciones de la metodología propuesta.

### IV. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha planteado una técnica para la caracterización de materiales de impresión 3D. Esta técnica consiste en colocar una pieza del material a caracterizar cubriendo una línea microstrip sobre un sustrato de permitividad conocida y caracterizada con precisión previamente. Con el fin de poder conocer la permitividad relativa efectiva del conjunto, se plantea un método para la extracción de la misma. Una vez conocida la permitividad efectiva del conjunto, se extrae la permitividad del material a caracterizar a partir de una

simulación electromagnética de la estructura en su conjunto. El método ha sido probado con el material ABS, mostrando una permitividad resultante medida con valores casi idénticos a los de la simulación electromagnética, por lo que se puede concluir que el método ha funcionado correctamente.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España, con el Proyecto ADDMATE TEC2016-76070-C3-3-R (AEI/FEDER, UE), y por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España, con la beca FPU16/00246.

#### REFERENCIAS

- [1] P. I. Deffenbaugh, T. M. Weller, and K. H. Church, "Fabrication and microwave characterization of 3-d printed transmission lines," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 823–825, Dec 2015.
- [2] M. M. Abdin, J. Castro, J. Wang, and T. Weller, "Miniaturized 3d printed balun using high-k composites," in *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, April 2015, pp. 1–3.
- [3] P. I. Deffenbaugh, R. C. Rumpf, and K. H. Church, "Broadband microwave frequency characterization of 3-d printed materials," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 2147–2155, Dec 2013.
- [4] L. Catarinucci, R. Colella, P. Coppola, and L. Tarricone, "Microwave characterisation of polylactic acid for 3d-printed dielectrically controlled substrates," *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 11, no. 14, pp. 1970–1976, 2017.
- [5] B. Bianco and M. Parodi, "Measurement of the effective relative permittivities of microstrip," *Electronics Letters*, vol. 11, no. 3, pp. 71–72, February 1975.
- [6] G. A. Ramírez Arroyave and J. L. Araque Quijano, "Broadband characterization of 3d printed samples with graded permittivity," in *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Sep. 2018, pp. 584–588.
- [7] M. D. Janezic and J. A. Jargon, "Complex permittivity determination from propagation constant measurements," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 76–78, 1999.
- [8] M. Barbuto, A. Alù, F. Bilotti, and A. Toscano, "Characteristic impedance of a microstrip line with a dielectric overlay," *COMPEL: Int J for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng.*, vol. 32, 11 2013.