

Low Cost Metallization of Microwave Devices Implemented with 3D Printers

Ángel J. García-Collado, *Member, IEEE*, Gregorio J. Molina-Cuberos, Fernando Ruiz Arróniz, Salvador Zaragoza Sánchez

Abstract—In the present paper, several techniques for microwave devices metallization made by 3D printing are analyzed with the aim of developing a low cost process. Our goal is to define the best technique for making passive microwave devices from standard 3D printing (FDM, *Fused Deposition Modeling*) to achieve low cost devices for prototypes, laboratory teaching and experimentation in general. The device response has been studied as a function of frequency and it has been found a metallization technique which is able to produce microwave devices fully operative from elements made of polymers (ABS, *Acrylonitrile Butadiene Styrene* and PLA, *Polylactic Acid* o *Poly lactide*). The work presents result with simple microwave devices (short-circuits in X-band), but can be generalized to more complex ones by adapting the techniques exposed. Thank to this, an interesting line of research is opened to obtain microwave devices and prototypes at lower cost than the traditional metal-based fabrication methods.

Index Terms—3D printing, ABS, FDM, metallization, microwave devices, PLA, polymers.

I. INTRODUCCIÓN

DESDE las primeras propuestas presentadas a comienzos de los años 80 del siglo pasado [1]-[2], la impresión 3D está viviendo grandes avances [3], dando lugar a nuevos procesos de fabricación más flexibles, rápidos y económicos que facilitan enormemente el desarrollo de prototipos y dispositivos completamente operativos que anteriormente requerían de procesos de fabricación más complejos y costosos. En la actualidad existen muchas tecnologías de impresión 3D, cada una de ellas con sus ventajas e inconvenientes, y se siguen desarrollando novedosos dispositivos que combinan sistemas alternativos de impresión con materiales que revolucionarán sobremano el mundo de la fabricación tal y como hoy lo conocemos [4].

Este trabajo ha sido subvencionado por Fundación Séneca, Región de Murcia, proyecto de Referencia 19432/PI/14.

Ángel J. García-Collado, Dpto. Ciencias Politécnicas. Grupo de Teledetección, Geomática y Sistemas de Información Geográfica Aplicados Universidad Católica de Murcia, Avda. de los Jerónimos 135, E-30107 Guadalupe, Murcia, España. (e-mail: ajgarcia@ucam.edu).

Gregorio J. Molina-Cuberos, Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica, Universidad de Murcia, E-30100 Espinardo-Murcia, España. (e-mail: gregomc@um.es).

Fernando Ruiz Arróniz, Universidad Católica de Murcia, Avda. de los Jerónimos 135, E-30107 Guadalupe, Murcia, España. (e-mail: farroniz@ucam.edu).

Salvador Zaragoza Sánchez, Universidad Católica de Murcia, Avda. de los Jerónimos 135, E-30107 Guadalupe, Murcia, España. (e-mail: szaragoza@ucam.edu).

Así, técnicas como la estereolitografía (SLA), el sinterizado selectivo por láser (SLS, *Selective Laser Sintering*), la fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC, *Solid Ground Curing*), el sinterizado selectivo por calor (SHS, *Selective Heat Sintering*), el sinterizado directo de metal por láser (DMLS, *Direct Metal Laser Sintering*), etc., son cada vez más accesibles. En el desarrollo de nuevos materiales de impresión con características, en muchos casos, sorprendentes los avances son incontables: nuevos polímeros biocompatibles, adición de compuestos cerámicos y otros aditivos con características de interés, e incluso metales [5]-[12]. Ello abre las puertas a nuevos avances tecnológicos basados en la libertad de diseño, costes reducidos y accesibilidad global.

En la actualidad, las técnicas más extendidas para la impresión 3D son las basadas en el modelado por deposición de fundente (FDM, *Fused Deposition Modeling*), con dispositivos de impresión relativamente sencillos, muy accesibles por su reducido coste y de manejo fácil. La tecnología FDM fue patentada en los años 80 por la empresa *Stratasys Ltd.*, pero por derechos de *copyright* la comunidad acuñó el término FFF (*Fused Filament Fabrication*) para poder usarla libremente. Actualmente cualquiera de los dos términos se usa indistintamente y existe una potente comunidad de usuarios de código abierto tanto para el *software* como para el *hardware* de estos dispositivos de impresión, lo que ha facilitado el uso extensivo de esta tecnología, [13]-[14].

FDM es un sistema aditivo por el cual se deposita material en forma de filamento siguiendo secciones transversales del objeto 3D que se desea construir, [4]. El material suele ser un termoplástico, tal como ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), [15], o PLA (*Polylactic Acid* o *Poly lactide*), [16], que licúan a relativamente altas temperaturas (230-245 °C para ABS y 190-200 °C para PLA), [17]-[18]. Evidentemente, estos materiales no son conductores de la electricidad.

Aplicar todas estas técnicas al desarrollo de dispositivos electrónicos y de circuitería de microondas es un campo de trabajo novedoso e innovador, y son muchos los grupos de investigación que están llevando a cabo propuestas de diseño y fabricación basados en la impresión 3D con diferentes objetivos y técnicas [19]-[24]. El objetivo de este trabajo es presentar y analizar distintas técnicas para la obtención de dispositivos para uso en tecnologías de microondas (cortocircuitos, filtros, antenas, guías de onda, etc.) impresos en 3D mediante técnica FDM, con materiales estándar (ABS y PLA), y su posterior procesado a fin de conseguir una capa

conductora en las regiones de interés (proceso de metalización) que permita su completa operatividad. Se plantea alcanzar la fabricación de modelos plenamente funcionales de bajo coste, por lo que se descarta el uso de técnicas y dispositivos de impresión directa de metales, cuyos costes de operación son actualmente muy elevados.

II. IMPRESIÓN 3D Y METALIZACIÓN DE SUPERFICIES

A. Dispositivos y Materiales de Impresión

Con el objetivo de minimizar los costes en el proceso de fabricación se recurre a dispositivos de impresión fácilmente accesibles y de coste relativamente asequible. Se ha hecho uso de diferentes modelos de impresoras, imprimiendo con cada una de ellas los mismos objetos, a fin de valorar el efecto sobre la calidad final de las características propias de cada una de estas impresoras. De menor a mayor coste, se han utilizado las siguientes impresoras: Prusa i3, desarrollada dentro del proyecto *RepRap* (<http://reprap.org/>), y distribuida como 'open source', el grosor de su filamento es de 2.85 mm (ABS/PLA), con un diámetro de la boquilla de extrusión de 0.40 mm y una resolución de capa de 100 μm . El modelo Witbox del fabricante *bq*[®], con un grosor de filamento de 1.75 mm (PLA), diámetro de boquilla de 0.40 mm y una resolución de capa configurable de 100-200-300 μm . El último modelo de impresora empleado es el uPrint SE Plus de *Stratasys*, con una resolución de capa de 254 μm o 330 μm , en este caso con material específico de la marca (ABSplus).

Cada impresora ha sido adecuadamente configurada para lograr la máxima calidad de impresión en función del material empleado. En todos los casos, los objetos se imprimirán con un relleno del 100% a fin de evitar huecos en su interior que puedan producir resultados no deseados, especialmente a altas frecuencias.

En general, cuando se imprimen elementos con superficies planas existe una diferencia apreciable entre la cara del objeto impreso posada sobre la superficie de impresión y la cara superior. Este efecto es especialmente destacable en impresoras, de bajo coste, como la Prusa i3 o la Witbox. En el caso de la uPrint SE Plus hay una sutil diferencia de textura entre sus caras, pero la diferencia en su rugosidad no es relevante, Fig. 1.

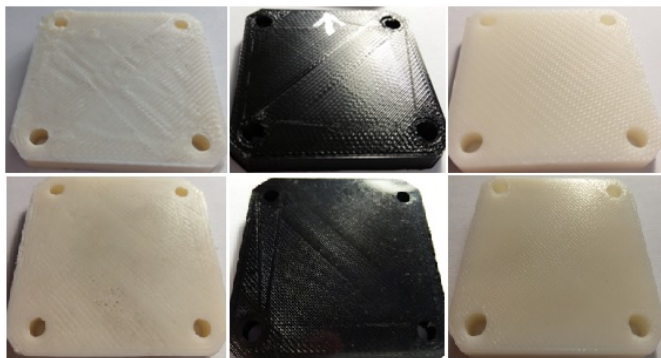


Fig. 1. Acabado de superficies planas con diferentes modelos de impresora 3D. De izquierda a derecha Prusa i3, Witbox y uPrint SE Plus. Las imágenes

inferiores se corresponden con la superficie en contacto con la base de impresión.

En las impresoras que lo permiten, se ha experimentado con diferentes materiales de impresión, tales como ABS, PLA y termoplásticos con aditivos conductivos (PLA conductivo de *Protopasta Inc.*) o metálicos (Copperfill de *colorFabb*[®]). A pesar de que este tipo de materiales pudieran ser una solución directa a la conductividad de las piezas impresas, se ha observado que la conductividad de las mismas es muy baja o inexistente, lo que está motivado por el hecho de que se trata de microscópicas partículas de un material conductor que quedan envueltas en material plástico aglutinante que constituye la estructura del objeto en cuestión, y que las aísla entre sí. Recientes desarrollos (Filamet[™], de *The Virtual Foundry Inc.*) han superado los inconvenientes de estos materiales eliminando el material plástico y fusionando las partículas metálicas entre sí mediante un proceso de horneado. El coste de este material es significativamente elevado en comparación con los empleados para la elaboración de este trabajo, por lo que inicialmente ha sido descartado.

B. Metalización de Superficies: Impregnación Superficial

La metalización de las superficies sobre las que incidirán las ondas electromagnéticas es el elemento clave para que un proceso de impresión 3D basado en polímeros pueda dar lugar a dispositivos operativos. Descartados los filamentos de impresión que contienen partículas conductoras por su baja efectividad, se establecen diversas estrategias de metalización.

El proceso de metalización más simple planteado ha consistido en la impregnación superficial de una sustancia adhesiva de secado lento (cola vinílica) y la deposición homogénea de materiales metálicos de forma que se garantice la conectividad entre las partículas aplicadas. Se ha llevado a cabo pruebas con tres materiales con tamaño de partículas diferente: limadura de hierro, cobre en polvo micro granulado y grafito en polvo, Fig. 2. Si bien se consigue una metalización de la superficie tratada, ésta muestra una rugosidad acorde con el tamaño de las partículas depositadas, mayor en el caso de las limaduras de hierro, que requiere ser tratada mediante técnicas de lijado para un adecuado acabado. En este caso, el ABS tiene importantes ventajas sobre el PLA ya que su mayor resistencia le permite soportar, sin alterar sus características, ciertos tratamientos químicos o mecánicos tales como pulidos o limados, [10].

Con el fin de conseguir una superficie adherente más uniforme se ha experimentado con adhesivos en aerosol (Spray Mount 3M, adhesivo 3M 76, adhesivo S90 Scotch Weld, pegamento Maurer Spray), pero en general, tras la aplicación presentan una textura excesivamente gruesa y, pese a ser aerosol, falta de uniformidad en la aplicación, lo que dificulta mucho la consecución de una capa uniforme de material conductor sobre la superficie tratada.

La necesidad de un tratamiento a posteriori, manual y complejo de llevar a cabo en zonas en ángulo o interiores, impide un acabado metalizado acorde con los requisitos de calidad exigibles. Por ello se ha experimentado con técnicas menos artesanales basadas en la impregnación mediante

aerosol de pinturas o sustancias con alto contenido en metal o grafito

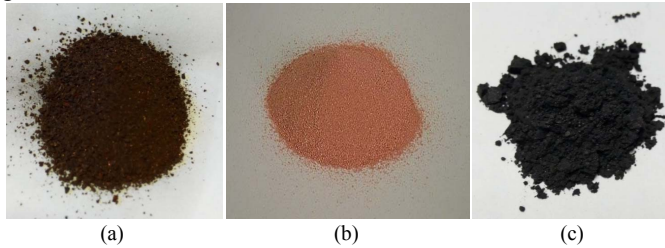


Fig. 2. Partículas de sustancias empleadas para los procesos de metalización mediante capa adhesiva. (a) Limadura de hierro. (b) Cobre en polvo micro granulado. (c) Grafito en polvo.

(Zingroup-B, Galva ZN+, pasta de cobre Bardahl, Kontakt Chemie Graphit 33, etc.), con aplicación de un número controlado de capas y su medida para determinar la aplicación idónea.

Este proceso consigue una buena cobertura de las superficies, recubriendo incluso las zonas interiores o de más difícil acceso de los objetos tratados, y una excelente uniformidad en las superficies. Sin embargo, la aplicación sigue siendo manual, por lo que el proceso no está exento de fallos. Los mejores resultados han sido obtenidos con aerosol de grafito (Kontakt Chemie Graphit 33), con un acabado suave de las superficies tratadas (Fig. 3). Pese a ser un proceso de fácil aplicación, el aerosol de grafito presenta algunos inconvenientes como fragilidad en el recubrimiento, lo que puede producir desperfectos en la superficie, y la necesidad de aplicar varias capas para conseguir una conductividad aceptable.

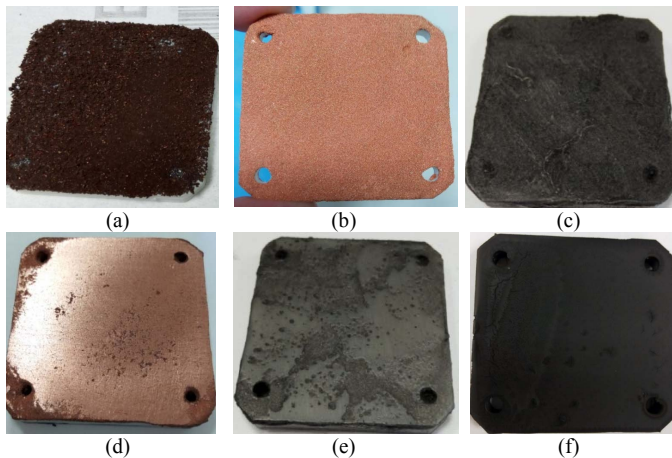


Fig. 3. Superficies tratadas con diferentes procesos de metalización. (a) Capa adhesiva con limaduras de hierro sin procesado posterior. (b) Capa adhesiva con cobre en polvo micro granulado sin procesado posterior. (c) Capa adhesiva con grafito en polvo sin procesado posterior. (d) Capa adhesiva con cobre en polvo micro granulado con procesado posterior. (e) Capa adhesiva con grafito en polvo con procesado posterior. (f) Superficie tratada con diez capas de aerosol de grafito.

C. Metalización de Superficies: Cobreado Electrolítico

Para lograr una mejora en la respuesta metálica de las superficies tratadas, se ha llevado a cabo un proceso de metalización mediante electrólisis. La electrólisis se basa fundamentalmente en un proceso de oxidación-reducción

(RedOx) no espontáneo, es decir, requiere un aumento de energía para realizar una serie de transformaciones, y, por tanto, requiere de una aportación externa de energía. En el proceso tiene lugar la captura de electrones por los cationes, reducción, que ocurre en el cátodo, y la liberación de electrones por los aniones, oxidación, que tiene lugar en el ánodo.

Para este trabajo se hizo uso del cobreado electrolítico (Cobre(II) Sulfato 5-hidrato, 124.8 – 249.7 g/mol), proceso por el cual a un objeto metálico se le aplica una capa de cobre superficial. El grosor de dicha capa puede variar según las necesidades o el fin que se le vaya a dar al objeto.

Cuando se aplica un cobreado mediante ácido con sulfatos, se requiere de un control exigente del baño ya que hay que mantener los parámetros en el rango óptimo. Mediante el sulfato de cobre se consigue una fuente de iones de cobre que se depositarán en la superficie de interés. Cuanto más puro sea el sulfato de cobre, mejor será el proceso del baño electrolítico. Si bien se ha experimentado con diferentes configuraciones eléctricas, tiempos de exposición y concentraciones químicas, los resultados más interesantes tienen lugar cuando se emplea una fuente de tensión que proporciona 9 V y 3 A de forma constante, una disolución compuesta por 400 ml de agua destilada y 50 gramos de sulfato de cobre con molaridad de 0.5 M, y un rango de tiempo de exposición que va desde los 60 a los 120 minutos, Fig. 4(a).

El proceso implica un incremento del grosor de las paredes tratadas, que se ha estudiado de forma que la impregnación de grafito en polvo aumenta en 0.06 mm dicho grosor y la deposición electrolítica lo incrementa en un rango comprendido entre 0.18 y 0.20 mm. El resultado obtenido permite un tratamiento de lijado suave de la superficie que mejora su aspecto general sin hacer perder sus características de metalización, Fig. 4(b).

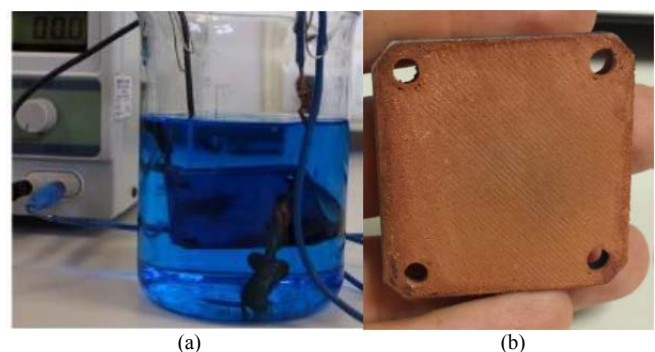


Fig. 4. Proceso de electrólisis sobre superficies tratadas con aerosol de grafito. (a) Cobreado electrolítico. (b) Superficie cobreada resultante.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como primera aproximación para conocer el comportamiento de los procesos descritos y conseguir dispositivos válidos para operar en circuitos de microondas, se opta por trabajar con cortocircuitos de banda X (8.2-12.4 GHz). Se trata de elementos muy simples, con superficies planas muy fáciles de trabajar, y que permitirán discriminar de

forma sencilla entre las diferentes técnicas con las que se va a experimentar. Con posterioridad se procederá con dispositivos más complejos, tales como tramos de guía de onda o antenas de bocina.

A. Medidas en Continua

Para el caso de los cortocircuitos, y a fin de hacer una consideración preliminar sobre la conductividad lograda tras los procesos propuestos, se ha medido la resistencia eléctrica en continua. Se han considerado cuatro direcciones de medida con objeto de observar la dependencia con la dirección de extrusión de la impresión (Fig. 5). Los valores adquiridos en dichas medidas serán promediados para tener un valor representativo en cada trazado de la pieza metalizada, mostrando el error una indicación de la dispersión obtenida en las cuatro medidas.



Fig. 5. Puntos de medida de un cortocircuito (izquierda). Medida de resistencia eléctrica en baja frecuencia de un cortocircuito (derecha).

Los cortocircuitos metalizados mediante aplicación de material adhesivo y grafito en polvo, tratados a posteriori con un proceso de lijado suave presentan un comportamiento resistivo en continua con los valores promediados indicados en la Tabla I. Se observa cierta variabilidad de los valores de resistencia medidos en función de la dirección en la que se realiza la medición, lo que viene a indicar que el proceso de impresión afecta al resultado final. La dirección de la extrusión de la última capa de la pieza impresa presenta los valores más bajos de resistencia eléctrica. Así mismo, los elementos impresos con la Prusa i3 son los que mejor comportamiento muestran, si bien esta impresora es, a priori, la que da lugar a impresiones de menor calidad. Esto pone de manifiesto que esta técnica de metalización no se ve afectada por la precisión de la impresora 3D. Por el contrario, el elemento decisivo es el acabado superficial del proceso de metalización. Hay que tener presente que esta técnica no es reproducible al 100% debido a la cantidad de variables que intervienen en el procesado de la misma.

En la Tabla II se recogen las medidas de resistencia obtenidas cuando se sustituye el grafito por cobre en polvo micro granulado. Vemos que los valores de resistencia disminuyen en casi tres órdenes de magnitud y que, de nuevo, se aprecia que existen diferencias en función de la dirección en la que se toma la medida. La disminución en la resistencia es coherente con el hecho de que la conductividad del cobre es $\sim 5.85 \cdot 10^6$ S/m frente a la del grafito de $\sim 0.012 \cdot 10^6$ S/m.

La metalización mediante aplicación de aerosol de grafito arroja valores más uniformes para cada tipo de impresora

(Tabla III). Ello se debe a que el proceso de aplicación mediante aerosol es más homogéneo. Los mejores resultados se han logrado con trece capas de impregnación. Los valores medidos mejoran la respuesta obtenida mediante capa adhesiva con grafito en polvo, y son ligeramente más altos que los obtenidos mediante capa adhesiva con cobre en polvo micro granulado.

Como consecuencia de todo lo anterior, se aprecia que la calidad de la impresión afecta a los resultados. La precisión de la impresora y la calidad final de la impresión de la superficie son factores de gran importancia en este caso. De las tablas anteriores se deduce que la respuesta más homogénea y reproducible se obtiene para los cortocircuitos impresos mediante la impresora uPrint SE Plus, que presenta las mejores características de impresión, y que no requiere de tratamientos a posteriori. La aplicación de grafito mediante aerosol mejora los resultados respecto a la capa adhesiva, aun sin llegar al punto de mejorar los valores de resistencia de la impregnación con cobre. Tiene la ventaja añadida de una aplicación mucho más sencilla y con menos variables en el proceso de aplicación manual. Es por ello por lo que se va a utilizar esta técnica sobre muestras impresas en la uPrint SE Plus como primer paso en un proceso cuya segunda etapa es la del cobreado electrolítico. Esta segunda parte tiene el objetivo de mejorar los resultados obtenidos, y alcanzar valores de conductividad muy próximos a los de los metales.

Los valores de resistencia eléctrica medidos en este caso se sitúan en $\sim 25 \Omega$ en todos los casos como consecuencia de la uniformidad de las técnicas indicadas y la mejora de la conductividad resultado del proceso de electrólisis. Como vemos, esta resistencia es similar a la obtenida con cobre en polvo micro granulado, Tabla II.

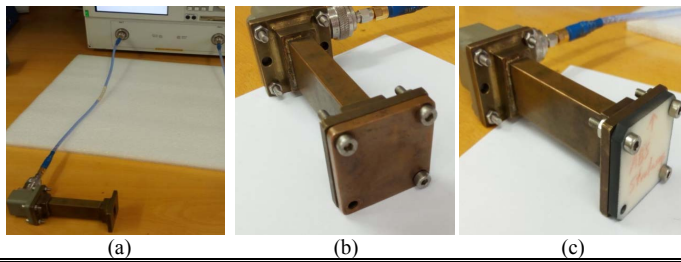
TABLA I
METALIZACIÓN DE CORTOCIRCUITO - CAPA ADHESIVA CON GRAFITO EN POLVO CON PROCESADO POSTERIOR

	Impresora 3D y material		
	uPrint SE Plus (ABS)	Prusa i3 (ABS)	Witbox (PLA)
Traza 1	$13.8 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$	$7.4 \pm 0.1 \text{ k}\Omega$	$8.9 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$
Traza 2	$8.4 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$	$6.5 \pm 0.1 \text{ k}\Omega$	$9.8 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$
Traza 3	$9.0 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$	$4.5 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$	$11.2 \pm 0.8 \text{ k}\Omega$
Traza 4	$6.3 \pm 0.5 \text{ k}\Omega$	$5.8 \pm 0.6 \text{ k}\Omega$	$8.4 \pm 0.6 \text{ k}\Omega$

TABLA II
METALIZACIÓN DE CORTOCIRCUITO - CAPA ADHESIVA CON COBRE EN POLVO MICROGRANULADO CON PROCESADO POSTERIOR

	Impresora 3D y material		
	uPrint SE Plus (ABS)	Prusa i3 (ABS)	Witbox (PLA)
Traza 1	$35 \pm 2 \Omega$	$15 \pm 3 \Omega$	$47 \pm 2 \Omega$
Traza 2	$60 \pm 9 \Omega$	$7.2 \pm 0.2 \Omega$	$80 \pm 10 \Omega$
Traza 3	$100 \pm 20 \Omega$	$20.9 \pm 0.7 \Omega$	$220 \pm 30 \Omega$
Traza 4	$23 \pm 2 \Omega$	$14 \pm 2 \Omega$	$31 \pm 3 \Omega$

TABLA III
METALIZACIÓN DE CORTOCIRCUITO - AEROSOL DE GRAFITO



	Impresora 3D y material		
	uPrint SE Plus (ABS)	Prusa i3 (ABS)	Witbox (PLA)
Traza 1	$0.50 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$	$1.06 \pm 0.03 \text{ k}\Omega$	$0.91 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$
Traza 2	$0.53 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$	$1.09 \pm 0.04 \text{ k}\Omega$	$1.06 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$
Traza 3	$0.50 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$	$1.02 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$	$0.86 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$
Traza 4	$0.51 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$	$0.80 \pm 0.01 \text{ k}\Omega$	$0.95 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$

Fig. 6. (a) Sistema experimental de medida para cortocircuitos. (b) Medida de cortocircuito metálico. (c) Medida de cortocircuito impreso metalizado.

B. Medidas en Microondas

Las medidas en la banda de frecuencias de las microondas han sido realizadas mediante un analizador de redes vectorial Agilent N5230A PNA configurado para medir el coeficiente de reflexión (S_{11}) de los cortocircuitos. El sistema es convenientemente calibrado mediante el módulo de calibración electrónico (ecal) Keysight N4691B, a fin de eliminar el ruido no deseado procedente de los elementos intermedios. La configuración del sistema de medida, Fig. 6(a), consiste en un tramo de cable coaxial, un adaptador coaxial a guía rectangular (en banda X) y un tramo de guía de cobre tras el cual se sitúa el cortocircuito bajo prueba, Fig. 6(b) y Fig. 6(c).

La Fig. 7 muestra las medidas del parámetro S_{11} realizadas para diferentes cortocircuitos considerados en este trabajo. Se observa que los cortocircuitos sin proceso de electrólisis presentan valores $|S_{11}| < 0.7$, Fig. 7(a), y que apenas hay diferencias en alta frecuencia entre un cortocircuito impreso en ABS sin tratamiento de metalización (línea de color negro) y un cortocircuito impregnado en polvo de grafito sin proceso de electrólisis posterior (línea naranja). Por contra, el módulo de S_{11} se aproxima a 1 en los cortocircuitos tratados con aerosol de grafito y electrólisis. Como se puede comprobar, los resultados son altamente satisfactorios y, en el mejor de los casos, equiparables a los de un cortocircuito metálico, también mostrado en la figura (línea de color rojo), si bien es observable que los resultados obtenidos presentan diferencias debidas al proceso manual de fabricación (líneas verde y magenta).

En la Fig. 7(b) se observa la respuesta en fase para estos mismos cortocircuitos. Se comprueba la existencia de un pequeño desplazamiento en fase, especialmente en frecuencias altas, para los cortocircuitos sin tratamiento electrolítico, siendo despreciable para el resto de los cortocircuitos analizados.

Para poder comparar mejor los resultados obtenidos en nuestro proceso de metalización, la Fig. 8 muestra los

resultados obtenidos con dos cortocircuitos de cobre junto con las muestras impresas en ABS, metalizadas con aerosol de grafito y electrólisis. Se puede observar la existencia de variación en los valores del parámetro de reflexión para dos cortocircuitos fabricados en cobre y aparentemente iguales (líneas azul y roja). Un comportamiento similar tiene lugar entre cortocircuitos fabricados mediante el proceso de aerosol de grafito y tratamiento electrolítico, donde además hay que tener en cuenta que se llevan a cabo con realización de parte de los procesos de forma manual. Cabe destacar que la respuesta en frecuencia para todos los casos responde a un mismo patrón.

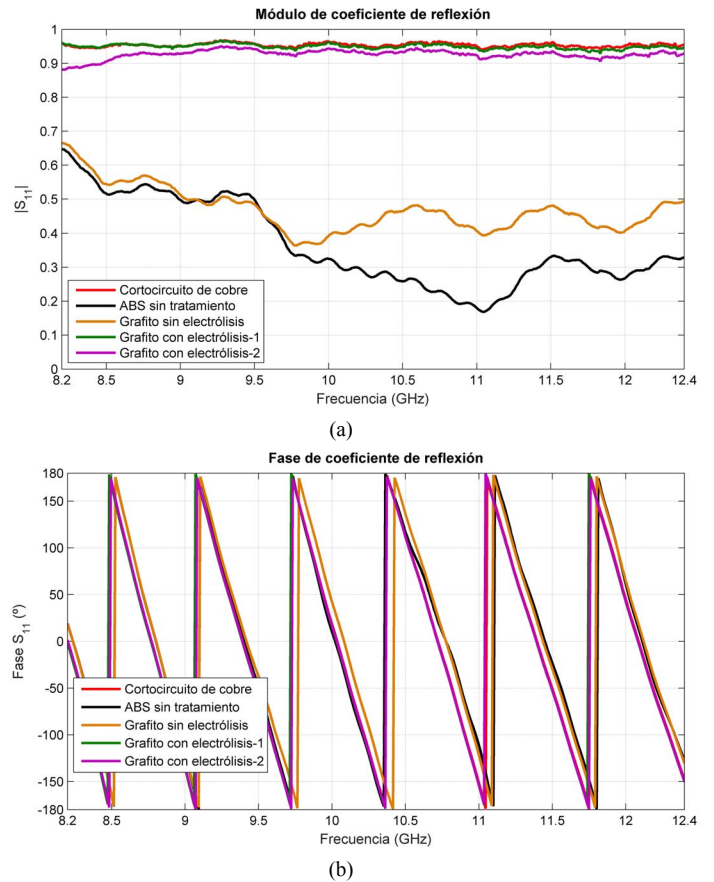


Fig. 7. (a) Medida del módulo del parámetro S_{11} en diferentes cortocircuitos estudiados. (b) Medida de la fase del parámetro S_{11} .

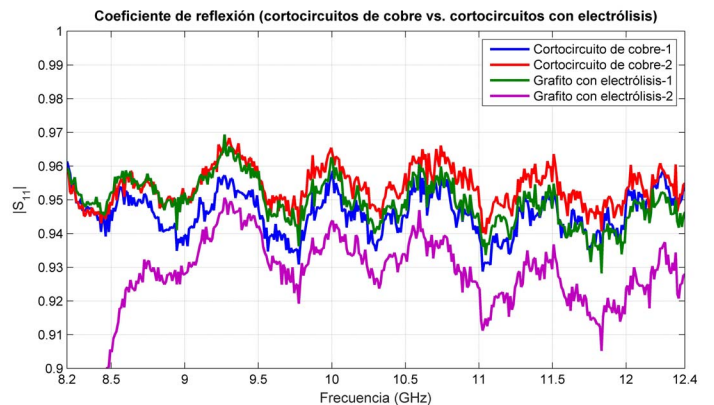


Fig. 8. Medida del módulo del parámetro S_{11} de cortocircuitos metálicos fabricados en cobre y de cortocircuitos metalizadas con aerosol de grafito y electrólisis.

Como consecuencia de los resultados obtenidos, el proceso de metalización de bajo coste propuesto en este trabajo es satisfactorio para dispositivos pasivos simples, tales como son los cortocircuitos, y es susceptible de ser empleado en otros elementos más complejos y en el diseño de nuevos elementos y prototipos.

Para valorar su aplicación en elementos más complejos, como guías de onda, filtros o antenas de bocina, caracterizados por tener superficies internas que requieren ser metalizadas y superficies en ángulo de acceso más complicado, será necesario realizar un proceso previo de segmentación e imprimir en partes que dejen expuestas superficies accesibles y de fácil tratamiento, tanto del impregnado mediante aerosol como de electrólisis.

El empleo de la técnica de metalización propuesta puede reducir significativamente el coste de los dispositivos de microondas. Si bien el precio de éstos depende en gran medida de su complejidad y su banda de uso, y es complicado generalizar, en el caso de los cortocircuitos analizados en este trabajo se consigue una reducción de su coste comprendido entre el 60-70% frente al precio de productos comerciales destinados al mismo fin.

Se considera que la técnica de metalización será especialmente interesante en dos casuísticas concretas. Por un lado, en la implementación de prototipos y nuevos diseños, para los que el coste de construcción a través de técnicas tradicionales suele ser muy elevado. Por otro lado, en el equipamiento de elementos estándar para uso en laboratorios destinados a la docencia.

Además, otra ventaja interesante de la técnica propuesta es la reducción del peso final de la estructura, lo que puede ser de gran interés en determinados usos.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un conjunto de técnicas de bajo coste destinadas a la metalización de elementos fabricados en material plástico mediante impresión 3D. Se ha demostrado que el proceso basado en la impregnación de superficies con aerosol de grafito y su posterior cobreado electrolítico da lugar a elementos con características conductivas similares a las logradas con cobre en un amplio rango de frecuencias. Los dispositivos así tratados pueden ser empleados en montajes de circuitos de microondas con un buen comportamiento general.

Estas técnicas de metalización de bajo coste, unidas a la cada vez más accesible impresión 3D y las herramientas de diseño CAD, abren un interesante camino para la fabricación de nuevos elementos y prototipos destinados a la tecnología de las microondas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por Fundación Séneca, Región de Murcia, proyecto de Referencia 19432/PI/14.

REFERENCIAS

- [1] Kodama, H. (1981). A scheme for three-dimensional display by automatic fabrication of three-dimensional model. *J. IEICE*, 64, 1981-4.
- [2] Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three dimensional plastic model with photo hardening polymer. *Review of scientific instruments*, 52(11), 1770-1773.
- [3] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- [4] ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Subcommittee F42. 91 on Terminology. (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International.
- [5] Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2), 155-162.
- [6] Dimas, L. S., Bratzel, G. H., Eylon, I., & Buehler, M. J. (2013). Tough composites inspired by mineralized natural materials: computation, 3D printing, and testing. *Advanced Functional Materials*, 23(36), 4629-4638.
- [7] Frazier, W. E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *J. Mater. Eng. Perform.*, 23, 1917-1928.
- [8] Haselhuhn, A. S., Wijnen, B., Anzalone, G. C.; Sanders, P.G., & Pearce, J. M. (2015) In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing. *J. Mater. Process. Technol.*, 226, 50-59.
- [9] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 81, 465-481.
- [10] Anzalone, G. C., Zhang, C., Wijnen, B., Sanders, P. G., & Pearce, J. M. (2013) A Low-Cost Open-Source Metal 3-D Printer. *IEEE Access*, 1, 803-810.
- [11] Laureto, J., Dessiatoun, S., Ohadi, M., & Pearce, J. (2016). Open Source Laser PolymerWelding System: Design and Characterization of Linear Low-Density Polyethylene Multilayer Welds. *Machines*, 4, 14.
- [12] Anzalone, G. C., Wijnen, B., & Pearce, J. M. (2015). Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta RepRap 3-D printer. *Rapid Prototyp. J.*, 21, 506-519.
- [13] Kasture, P. V., Deole, P., & Irwin, J. L. (2015). Case Study Using Open Source Additive Manufacturing (AM) Technology for Improved Part Function. In ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers.
- [14] Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246.
- [15] Kulich, D. M., Gaggari, S. K., Lowry, V., & Stepien, R. (2002). Acrylonitrile-butadiene-styrene polymers. John Wiley & Sons, Inc..
- [16] Martin, O., & Averous, L. (2001). Poly (lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer*, 42(14), 6209-6219.
- [17] Galina, D. M., Garcia, D. P., de Souza, G. G., da Silva, L. R. R., & Maziero, R. (2016). Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba ABS confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3D. *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 17(6), 303-309.
- [18] Laureto, J., Tomasi, J., King, J. A., & Pearce, J. M. (2017). Thermal properties of 3-D printed polylactic acid-metal composites. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1-2), 57-71.
- [19] Ahmadloo, M., & Mousavi, P. (2013). A novel integrated dielectric-and-conductive ink 3D printing technique for fabrication of microwave devices. In *Microwave Symposium Digest (IMS)*, 2013 IEEE MTT-S International (pp. 1-3).

- [20] Ahmadloo, M. (2013). Design and fabrication of geometrically complicated multiband microwave devices using a novel integrated 3D printing technique. In *Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*, 2013 IEEE 22nd Conference on (pp. 29-32). IEEE.
- [21] Azucena, O., Kubby, J., Scarbrough, D., & Goldsmith, C. (2008). Inkjet printing of passive microwave circuitry. *Microwave Symposium Digest, 2008 IEEE MTT-S International*, pp. 1075-1078.
- [22] McKerricher, G., Gonzalez, J., & Shamim, A. (2013). All inkjet printed 3D microwave capacitors and inductors with vias. *Microwave Symposium Digest (IMS)*, 2013 IEEE MTT-S International, pp. 1-3.
- [23] Paulsen, J. A., Renn, M., Christenson, K., & Plourde, R. (2012). Printing conformal electronics on 3D structures with Aerosol Jet technology. *Future of Instrumentation International Workshop (FIW)*, 2012, pp. 1-4.
- [24] Rojas-Nastrucci, E. A., Nussbaum, J., Weller, T. M., & Crane, N. B. (2016). Metallic 3D printed Ka-band pyramidal horn using binder jetting. *2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC)*, Puerto Vallarta, 2016, pp. 1-3.



Ángel J. García-Collado was born in Murcia, Spain. He received the degree in Ingeniería de Telecomunicación from the Universidad Politécnica de Valencia, Spain, in 1998, and the Ph.D. degree in physics from the Universidad de Murcia in 2012. From

1998, works like researcher in the Universidad Católica de Murcia. From 2000 to 2003, he worked in different companies in the telecommunications sector. From the year 2003, devote exclusively to teaching practice and investigation in this University. Currently, he is part of the research group Teledetection, Geomatics and Applied Geographic Information Systems of this university. His current research activities include electromagnetic propagation in complex media and numerical methods in electromagnetism applied to chiral media.



Gregorio J. Molina-Cuberos was born in Ronda (Málaga), Spain. He received the B.S. degree in applied physics from the Universidad de Granada, Spain, in 1994 and the MS and Ph.D. degrees in physics from the same university in 1998. From 1994 to 1999

he was at the Instituto de Astrofísica de Andalucía, in Granada, Spain, and from 1999 to 2001 at the Institut für Weltraumforschung in Graz, Austria. In 2001, he joined the Physics Department at Universidad de Murcia, where he became a Professor of Electromagnetism in 2008. His research interests are the electromagnetic characterization of planetary atmospheres and chiral media. He has been involved in several instruments onboard ESA and NASA space missions for solar system exploration.



Salvador Zaragoza Sánchez was born in Murcia, Spain, in 1994, received the Engineering degree in System of Telecommunication engineering from the Universidad Católica de Murcia, Spain, in 2017. He is currently attending a master's degree in Big Data Analytics at the European

University of Madrid, Alcobendas, Madrid.



Fernando Ruiz Arróniz was born in the city of Murcia, Spain, in 1989, received the Engineering degree in System of Telecommunication from the Universidad Católica de Murcia in 2016. His interest includes cryptocurrencies, blockchain technologies and smart contract, and at this moment is getting formation in that area of expertise through various courses.