

Técnicas de Fabricación de Medios Quirales Basados en Manivelas Metálicas

Gregorio J. Molina-Cuberos¹, Angel J. García-Collado², José Margineda¹, María J. Núñez¹, Ernesto Martín¹, Ismael Barba³, Ana C. López-Cabeceira³, J. Represa³

gregomc@um.es, ajgarcia@pdi.ucam.edu, jmargi@um.es, maripepa@um.es, ernesto@um.es

⁽¹⁾ Grupo de Electromagnetismo, Facultad de Química, Universidad de Murcia, Campus Espinardo, 30100, Murcia.

⁽²⁾ Dpto. de Ciencias Politécnicas, Universidad Católica San Antonio, Guadalupe, 30107, Murcia.

⁽³⁾ Dpto. Electricidad y Electrónica. Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, 47071, Valladolid.

Abstract—A review of the manufacturing techniques for developing chiral media based on the inclusion of cranks is presented. Chirality is usually obtained by a random distribution of helices in a host medium. Here the chiral elements are obtained by bending thin metal-wires in three segments. We will show that a random distribution of cranks is able of rotate the polarization angle of the transmitted linearly polarized wave at microwave frequencies. This effect can be enhanced by the precise location of cranks forming a 2D periodic lattice. Several structures are analyzed looking for isotropy, reciprocity and homogeneity.

I. INTRODUCCIÓN

Se conoce como actividad electromagnética a la propiedad que presentan algunos materiales de poder rotar el ángulo de polarización de una onda linealmente polarizada. Estos medios se fabrican usando elementos con simetría quiral, cuyo tamaño determina la banda de frecuencias a la que se produce el giro. En el interior del material, comúnmente denominado medio quiral, los campos eléctrico y magnético están acoplados, lo que puede ser descrito macroscópicamente mediante las relaciones constitutivas [1]:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} - j\kappa \vec{H} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} + j\kappa \vec{E}$$

donde $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ es la permitividad del material, $\mu = \mu_0 \mu_r$ es la permeabilidad y κ el parámetro de quiralidad.

Una onda linealmente polarizada, no sólo sufre rotación, además cambia su polarización de lineal a elíptica, lo que se conoce como dicroísmo. Esto se debe a las diferencias en la velocidad de fase y absorción de las componentes con polarización circular a derecha e izquierda. Las constantes de propagación de las ondas con polarización circular vienen dadas por

$$k_{\pm} = \omega \sqrt{\mu \epsilon} (1 \pm \kappa_r)$$

donde los subíndices + y - indican las ondas polarizadas a derecha e izquierda, respectivamente, y κ_r es la quiralidad relativa, que viene dada por: $\kappa_r = (\epsilon_r \mu_r)^{-1/2}$.

En un medio homogéneo e isótropo, la quiralidad es un parámetro complejo, cuya parte real se puede relacionar con el ángulo de rotación mediante:

$$\theta = 2d\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \kappa_r}$$

por tanto, la determinación experimental del ángulo de rotación proporciona información directa de la parte real de la quiralidad.

El método más habitual para conseguir la actividad electromagnética a frecuencias de microondas consiste en distribuir pequeñas hélices metálicas en un medio dieléctrico [8]. Las hélices deben orientarse aleatoriamente, sin que existan direcciones privilegiadas, con el objetivo de asegurar la isotropía, de lo contrario el resultado es un material que se comporta macroscópicamente como anisótropo.

En trabajos previos, se presentó un nuevo elemento en forma de manivela que presenta simetría quiral y se mostró que una distribución aleatoria de manivelas presentan actividad electromagnética. Además, el ángulo de rotación depende con la frecuencia siguiendo un modelo de Condon, resonando en una única frecuencia [2]. Las manivelas tienen la ventaja de ser más fáciles de fabricar que las hélices, sin embargo presentan algunas desventajas, ya que las hélices tienen una estructura mucho más compacta. Para la misma longitud total de hilo, las hélices son más pequeñas que las manivelas, lo que permite que se pueda distribuir un mayor número por centímetro cúbico que de manivelas, presentando el material un mayor grado de homogeneidad. Un material compuesto por manivelas puede presentar variaciones locales en la densidad y alineamientos aleatorios, lo que origina fluctuaciones en la onda transmitida cuando la muestra es rotada o cuando se ilumina una zona distinta. Para solucionar el problema y determinar el ángulo de rotación se hizo necesario medir en distintos lugares y calcular un valor medio.

Con el objetivo de aumentar el grado de homogeneidad, se investigó la posibilidad de obtener un comportamiento quiral colocando las manivelas formando estructuras periódicas en dos dimensiones. Tras diseñar varias redes formadas por manivelas con distintas orientaciones y tamaños, llegamos a obtener estructuras con comportamiento quiral, homogéneas e isótropas [4]. En este trabajo presentamos una revisión de las distintas técnicas de fabricación de materiales quirales utilizando manivelas y presentamos los primeros resultados obtenidos a partir de muestras realizadas sobre circuito impreso.

II. DISEÑO DE MEDIOS QUIRALES

La técnica de fabricación más extendida consiste en distribuir de forma aleatoria elementos con simetría quiral en un medio dieléctrico. Siguiendo este procedimiento hemos fabricado materiales quirales utilizando tanto hélices [3] como manivelas [2]. Estas últimas se fabricaron a partir de hilo de cobre de 0.4 mm de diámetro y 12.6 mm de longitud. Los hilos se doblan en tres segmentos mediante dos ángulos de 90 grados, todas con la misma simetría, y se dispersan en una resina de epoxi con una temperatura de fusión baja. Las muestras fabricadas se fabricaron en forma de disco de 30 cm de diámetro, 1.5 cm de grosor y una densidad de 2 cm^{-3} . La densidad resulta ser mucho más pequeña que la obtenida utilizando hélices [3], lo que aumenta el grado de inhomogeneidad. A pesar de tener una densidad muy inferior, la rotación no disminuye proporcionalmente lo que indica que una manivela produce una mayor rotación que una hélice.

Los problemas de homogeneidad se puede resolver localizando las manivelas formando estructuras 2D periódicas. Por ejemplo, introduciendo uno de los segmentos en el medio (una lámina de foam de 5 mm de grosor y permitividad muy próxima a la unidad) quedando los otros dos segmentos en la superficie (ver Fig. 1). Con esta configuración una de las caras de la muestra no contiene elementos metálicos. Una red periódica de manivelas presenta algunas ventajas comparada con la distribución aleatoria de hélices, ya que existen nuevos parámetros para el diseño del material, como son la longitud de los tres segmentos y las distancias de separación entre manivelas. Además, el método de fabricación sobre foam permite realizar muestras de un modo relativamente rápido, se puede implementar fácilmente en el laboratorio y proporciona cierta flexibilidad en el diseño de materiales. Sin embargo, presenta problemas asociados a la falta de precisión en la localización de las manivelas. Con el objetivo de aumentar la calidad de la fabricación, conseguir muestras reproducibles e introducir nuevos parámetros en el diseño de los materiales, hemos mecanizado el procedimiento aplicando tecnologías de circuito impreso [6]. Las manivelas tridimensionales de material conductor se diseñan mediante pistas conductoras y vías. A pesar de las ventajas antes mencionadas, la técnica de circuito impreso nos restringe la longitud del elemento conductor realizado mediante la conexión entre pistas, que ahora queda determinado por el grosor de la placa dieléctrica. Además la permitividad del dieléctrico puede depender de la frecuencia y presentar pérdidas.

La Figura 1 muestra imágenes de cuatro muestras producidas siguiendo las técnicas de fabricación antes descritas: distribución aleatoria de manivelas en una resina de epoxi (M1), distribución en cruz formando una estructura periódica en dos dimensiones (M2), estructuras en forma de cruz realizadas en circuito impreso sobre una cara (M3) y agrupación compacta de cuatro manivelas utilizando ambas caras del circuito impreso (M4). La Tabla I muestra algunos parámetros característicos de las muestras. Las manivelas se diseñaron inicialmente para que la frecuencia de resonancia estuviera

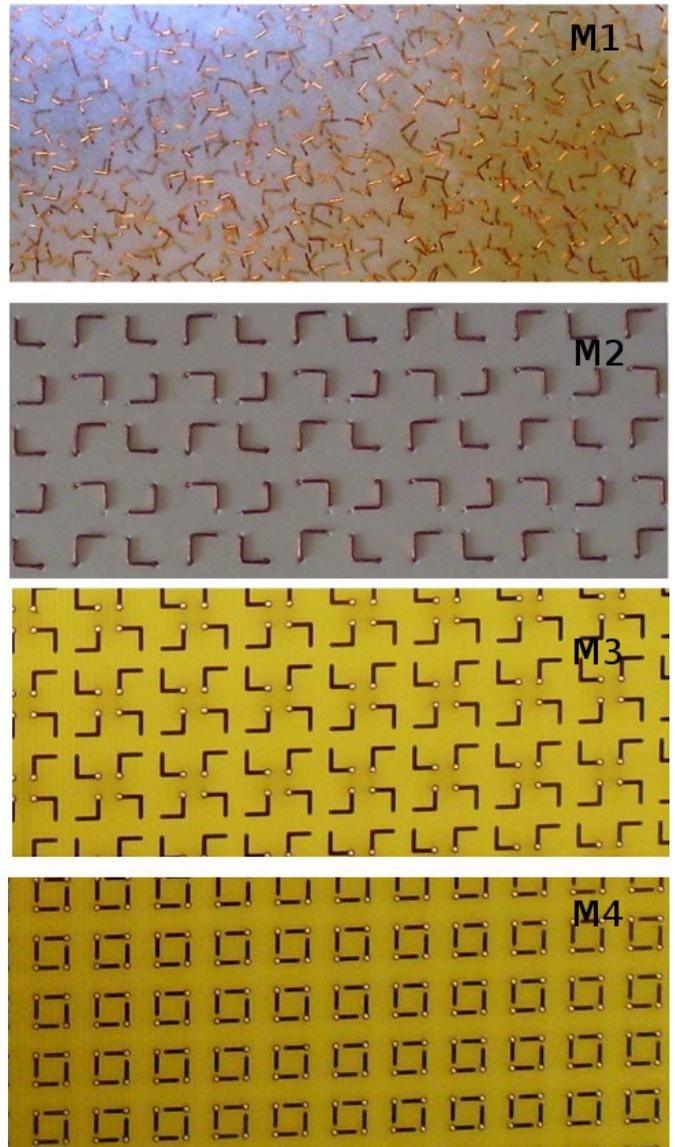


Fig. 1. Imagen real de las muestras: M1 distribución aleatoria de manivelas en una resina de epoxi), M2 distribución en cruz de manivelas formando una estructura periódica en dos dimensiones, M3 estructura en cruz realizada en placas de circuito impreso metalizadas por una sola cara, M4 agrupación compacta de cuatro manivelas realizada en circuito impreso a doble cara. Ver Tabla I y texto para más detalles.

situada en banda X. Para ello aceptamos como válida la relación experimental encontrada cuando se distribuyen aleatoriamente hélices, $L \approx \lambda/2$, donde L es la longitud total del elemento y λ la longitud de onda.

	Tamaño (mm) $l_1 \times l_2 \times l_3$	Separación (mm)	Dieléctrico
M1	4.2 x 4.2 x 4.2		Epoxi, $\epsilon_r \approx 3.2$
M2	5 x 5 x 5	6.9	Foam, $\epsilon_r \approx 1$
M3	2.7 x 2.7 x 1.2	1.8	PCB, $\epsilon_r \approx 4.3$
M4	2.7 x 1.2 x 2.7	3.0	PCB, $\epsilon_r \approx 4.3$

Tabla I. Características de las muestras

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La actividad electromagnética se ha determinado utilizando un sistema experimental en medio libre para la banda X [3], que está basado en un sistema previo diseñado para la medida de permitividad y permeabilidad [9] y adaptado para determinar el ángulo de rotación de una onda linealmente polarizada y la quiralidad de un material. Consta de un espejo cóncavo elipsoidal que enfoca el haz incidente, reduciéndose los efectos de difracción en los bordes de la muestra incluso para muestras relativamente pequeñas (el tamaño mínimo es de unos 10 cm de diámetro). La antena emisora se localiza en uno de los focos del espejo y la muestra en el otro. La antena receptora puede rotar alrededor de su eje longitudinal, lo que permite determinar los parámetros de escáterin (S) para cualquier polarización.

Para contrastar los resultados, se han realizado diferentes simulaciones, utilizando el software comercial CST Microwave Studio. Se trata de un simulador, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, que utiliza el método FIT (Finite Integration Technique). Entre otras características, permite la simulación de la propagación de ondas electromagnéticas a través de estructuras periódicas, como las muestras M2, M3 ó M4.

La Figura 2 muestra el ángulo de rotación del plano de polarización de una onda plana que se propaga a través de la muestra M1, las barras de error indican la desviación estándar para 10 medidas en distintos lugares de la muestra [2]. La línea continua es el valor esperado para el ángulo de rotación obtenido mediante el ajuste a los datos experimentales de un modelo de Condon [5] de una frecuencia. Se observa que el ángulo de rotación depende de la frecuencia siguiendo un comportamiento típicamente quiral, con una frecuencia de resonancia de ≈ 8.5 GHz. Una dependencia similar ha sido observada en compuestos formados por hélices distribuidas aleatoriamente [3], [7] y [8].

Al analizar los resultados obtenidos con distintas estructuras periódicas de manivelas, en 2D, se encontró en la mayoría de los casos que el ángulo de rotación depende de la orientación relativa entre las manivelas y la onda incidente [4]. Por tanto la rotación, en caso de ocurrir, es un efecto no quiral y la posible respuesta quiral queda enmascarada por otros efectos. Sin embargo, es posible cancelar los efectos no quirales mediante la distribución adecuada de manivelas y construir un medio quiral con comportamiento homogéneo e isotropo para incidencia normal. A continuación mostraremos algunos ejemplos de éstos últimos.

La Figura 3A muestra el ángulo de rotación del plano de polarización de una onda plana a través de la muestra M2 [4], formada por manivelas separadas 6.9 mm y quiralidad a derechas. Esta respuesta no depende de la orientación de la muestra ni de la cara sobre la que incida la onda. Por tanto la distribución de manivelas en forma de cruz cancela los efectos no-quirales y responde de manera homogénea e isotropa. Se ha observado también que una muestra formada por elementos con diferente quiralidad produce un cambio en el sentido del

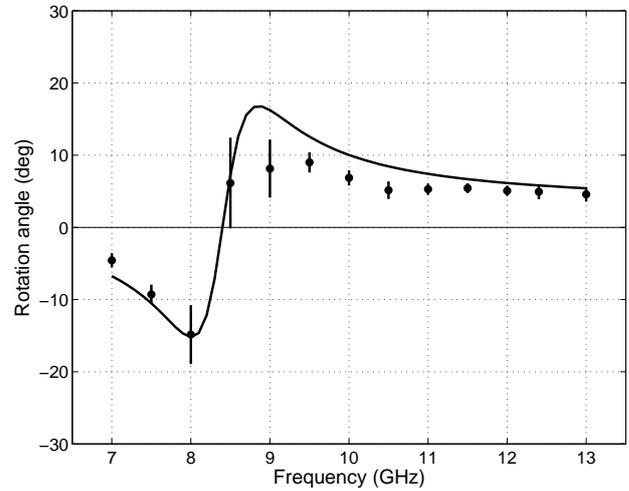


Fig. 2. Ángulo de rotación del plano de polarización de una onda plana a través de la muestra M1. Los puntos y las barras de error muestran, respectivamente, el valor medio y la desviación estándar de 10 medidas realizadas sobre distintas partes de la muestra. La línea continua se ha calculado ajustando un modelo de Condon a los datos experimentales. Reproducido de *IEEE-MCWL 19*, 278-280, 2009 [2].

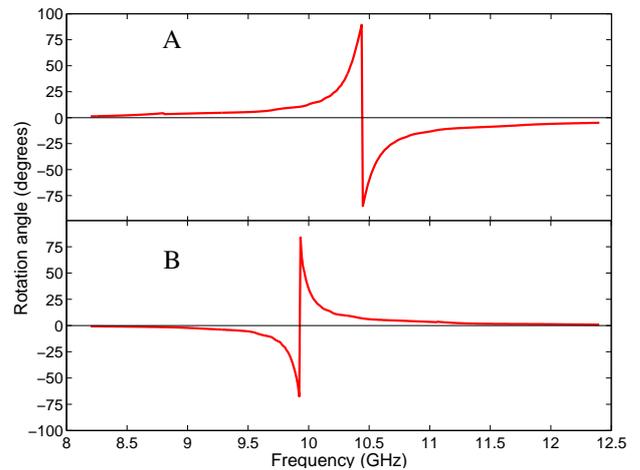


Fig. 3. A) ángulo de rotación producido por la muestra M2 formada por manivelas de $(5 \times 5 \times 5)$ mm, separadas espacialmente 6.9 mm y quiralidad a izquierdas (arriba). B) ángulo de rotación producido por una distribución similar a M2 de manivelas de $(5 \times 5 \times 5)$ mm, separadas 9.1 mm y quiralidad a derechas. Nótese que las manivelas son del mismo tamaño, de distinta quiralidad y difieren en la separación entre las mismas. Reproducido de *IEEE-MCWL 20*, 175-177, 2010 [4].

giro, manteniéndose la magnitud de éste y la frecuencia de resonancia.

La Figura 3B muestra el giro producido por manivelas de las mismas dimensiones que M2, algo más separadas (9.1 mm frente a 6.9 mm) y quiralidad a izquierdas. Se observa que disminuye la frecuencia de resonancia. Por tanto la frecuencia de resonancia de una distribución periódica de manivelas no sólo depende del tamaño de los elementos quirales, tal y como es conocido para hélices distribuidas aleatoriamente, sino que también depende de parámetros típicos de distribuciones periódicas, como la separación entre elementos.

La distribución en cruz realizada sobre circuito impreso, muestra M3, presenta diferencias sustanciales respecto a la distribución sobre foam. Los tres elementos que forman la

manivela no tienen la misma longitud, ya el elemento conductor entre las caras del dieléctrico es significativamente más corto que los otros dos. La Figura 4 muestra que prácticamente no se produce rotación en la banda de medida (representado por puntos en la figura). Aparece un pequeño giro (≈ 5 deg) a 10.7 GHz que podría deberse a un error experimental. Para extender el intervalo de frecuencias desde 5 hasta 15 GHz, se ha simulado el problema utilizando CST. La Fig. 4 muestra los resultados de la simulación (línea azul discontinua), donde se aprecia que la resonancia está alrededor de 12 GHz y una rotación muy pequeña, siendo consistentes con el resultado obtenido experimentalmente.

La Fig. 5 muestra el ángulo de rotación producido por la muestra formada por agrupaciones compactas de cuatro manivelas, M4. Experimentalmente se pudo determinar un aumento del ángulo de rotación con la frecuencia, si bien no se puede apreciar el comportamiento de la muestra alrededor de la frecuencia de resonancia, ni la magnitud de ésta, al encontrarse fuera del intervalo de medida. Los resultados obtenidos con la simulación nos permiten apreciar que el ángulo de rotación depende con la frecuencia de un modo similar al encontrado en la distribución de manivelas en forma de cruz sobre foam, Fig. 3. La Fig. 5 muestra que la simulación parece reproducir el comportamiento encontrado experimentalmente a bajas frecuencias, si bien encontramos un pequeño desplazamiento hacia frecuencias más altas. Las diferencias encontradas podrían explicarse por la aproximación del valor de permitividad del material constituyente de la placa de circuito impreso (FR4) que utiliza el método numérico y la incertidumbre en las dimensiones exactas de las manivelas, a la hora de implementar esos datos en el modelo numérico.

IV. CONCLUSIONES

Se han presentado nuevas técnicas de fabricación de medios quirales basados en la distribución de manivelas metálicas. Se ha encontrado que el ángulo de rotación del plano de polarización de una onda plana en función de la frecuencia sigue un modelo Condon con una frecuencia de resonancia. Se muestra también que una adecuada distribución de elementos permite construir un medio quiral con comportamiento homogéneo e isotrópico con una girotropía muy alta en una banda de frecuencias más estrecha que con distribuciones aleatorias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Investigación del MEC a través del proyecto CYCIT TEC 2006-13268-C03-02 y TEC 2006-13268-C03-01.

REFERENCES

[1] I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, and A.J. Vitanen, "Electromagnetic Waves in Chiral Media". Boston, MA: Artech House, 1994.
 [2] G.J. Molina-Cuberos, A.J. García-Collado, J. Margineda, M.J. Nuñez, E. Martín, "Electromagnetic Activity of Chiral Media Based on Crank Inclusions", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol 19, pp. 278-280, 2009.

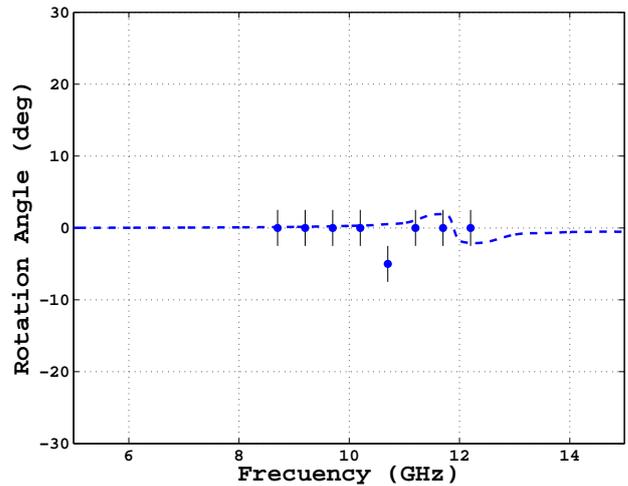


Fig. 4. Ángulo de rotación producido por la muestra M3. Los puntos muestran las medidas experimentales con su error asociado en forma de línea vertical. La línea azul discontinua es el resultado de una simulación con CST.

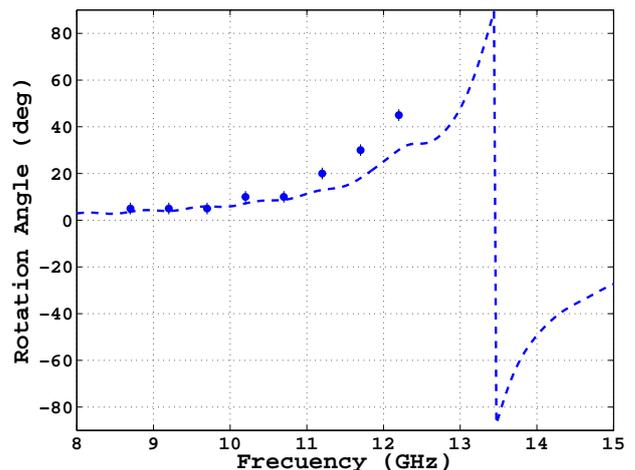


Fig. 5. Ángulo de rotación producido por la muestras M4 determinado experimentalmente y por simulación.

[3] A. Gómez, A. Lakhtakia, J. Margineda, G.J. Molina-Cuberos, M.J. Nuñez, J.S. Ipiña, A. Vegas and M.A. Solano, "Full-Wave Hybrid Technique for 3D Isotropic-Chiral-Material Discontinuities in Rectangular Waveguides: Theory and Experiment", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, num. 12, pp. 2815-2825, 2008. doi: 10.1109/TMTT.2008.2007190.
 [4] A.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, J. Margineda, M.J. Nuñez, E. Martín, "Isotropic and Homogeneous Behaviour of Chiral Media Based on Periodical Inclusions of Cranks", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, pp 175-177, 2010.
 [5] E. U. Condon, "Theories of Optical Rotatory Power", *Rev. of Modern Phys.*, vol. 9, pp.432-457, 1937.
 [6] I. Barba, A.C.L. Cabeceira, A. Gómez, J. Represa, "Chiral Media Based on Printed-Circuit Board Technology: A Numerical Time-Domain Approach", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 45-3, pp. 1170-1173. 2009.
 [7] G. Busse, J. Reinert and A. F. Jacob, "Waveguide characterization of chiral material. Experiment" *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol 47, No 3, 1999.
 [8] C.R. Brewitt-Taylor, P.G. Lederer, F.C. Smith and S. Haq, "Measurements and predictions of helix-loaded chiral composites", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, pp. 692-700, 1999.
 [9] J. Muñoz, M. Rojo, A. Parreño, J. Margineda, "Automatic Measurement of Permittivity and Permeability at Microwave Frequencies Using Normal and Oblique Free-Wave Incidence with Focused Beam", *IEEE Trans on Instrum. and Meas.*, vol. IM-47, n° 4, pp. 886-892, 1998.