

# Metamateriales Quirales Basados en Manivelas de Cinco Segmentos

Iván J. Martínez-Soler<sup>(1)</sup>, Gregorio J. Molina-Cuberos<sup>(1)</sup>, Ángel J. García-Collado<sup>(1,2)</sup>,

José Margineda<sup>(1)</sup>, María J. Núñez<sup>(1)</sup>, Ernesto Martín<sup>(1)</sup>

ivanjesus.martinez@um.es, gregomc@um.es, ajgarcia@pdi.ucam.edu,

jmargi@um.es, maripepa@um.es, ernesto@um.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica, Facultad de Química, Universidad de Murcia, Murcia, España

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ciencias Politécnicas, Universidad Católica San Antonio, Murcia, España

**Abstract-** A new structure formed by five segments cranks is here presented. By using numerical simulations, we show that a material composed by a 2D periodical distribution of a unit cell based on such structures is able to produce electromagnetic rotatory dispersion and circular dichroism. The symmetry requirements on the unit cell are analyzed in order to obtain a material with homogeneous and isotropic behavior for normal incidence. The material can exhibit several resonant frequencies, where the rotation angle reaches a peak of  $\pm 90^\circ$  and the transmitted wave changes from linear to elliptical polarization.

## I. INTRODUCCIÓN

El término metamaterial quiral se usa para designar materiales artificiales que presentan acoplamiento entre el campo eléctrico y el campo magnético. Este acoplamiento produce un momento eléctrico en el material debido al campo magnético y un momento magnético debido al campo eléctrico. Fenomenológicamente, estos materiales se pueden caracterizar incluyendo un nuevo parámetro, denominado quiralidad,  $\kappa$ , en las ecuaciones constitutivas [1],

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} - j\kappa \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{H}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + j\kappa \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{E} \quad (2)$$

La importancia que han adquirido los medios quirales en los últimos años se debe a sus interesantes propiedades electromagnéticas, en general, no presentes en los medios naturales a frecuencias de microondas. Cuando sobre este tipo de materiales incide una onda linealmente polarizada cambia el ángulo de polarización, efecto conocido como *dispersión óptica rotatoria*, y la polarización lineal pasa a ser elíptica, *dicroísmo circular*. Se dice en estos casos que el material presenta actividad electromagnética [1]. También se ha observado que en medios con gran actividad electromagnética, a ciertas frecuencias y en un estrecho ancho de banda, su comportamiento es similar al de un material homogéneo de índice de refracción negativo, sin necesidad de valores de permitividad y permeabilidad simultáneamente negativas [2]. Debido a esto, el interés por este tipo de medios ha crecido.

Tradicionalmente, en el rango de microondas, la técnica más usada para la fabricación de nuevas estructuras que presentan actividad electromagnética ha sido la distribución aleatoria de elementos con simetría quiral en sustratos dieléctricos [3]. Sin embargo los materiales obtenidos por

esta técnica presentan algunos inconvenientes, tales como la falta de homogeneidad y el elevado coste de fabricación [4]. Para solventar estos inconvenientes, y con el objetivo de diseñar nuevos materiales quirales, en este trabajo se propone una nueva estructura con simetría quiral implementada sobre tecnología PCB (*Printed Circuit Board*), y basada en un modelo previo donde se utilizaban manivelas de tres segmentos [5, 6]. Ya ha sido mostrado que una red periódica de manivelas se puede comportar como un material homogéneo e isótropo bajo incidencia normal, con gran actividad electromagnética en la frecuencia de resonancia de la estructura [4].

Las nuevas estructuras que se proponen consisten en una red periódica de inserciones metálicas quirales de cinco segmentos implementadas en un sustrato dieléctrico laminar.

En este estudio se analizan, mediante simulación numérica, dos de estas estructuras, y se comprueban las condiciones geométricas que deben verificarse para que la respuesta de los medios presente isotropía en el plano perpendicular a la dirección de incidencia. El estudio experimental está en vías de realización.

## II. DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS

El primer medio quiral que se propone es una variación del constituido por cuatro manivelas de tres segmentos (estructura 4CR) analizada en [6, 7]. Presenta una celda unidad formada por dos manivelas de cinco segmentos conductores, dos de ellos se distribuyen en la cara superior de la lámina de sustrato dieléctrico, otros dos en la inferior y el quinto segmento es una vía metalizada cilíndrica que comunica las dos caras del sustrato. Los segmentos situados sobre las caras del dieléctrico forman un ángulo recto. La segunda manivela que conforma la celda unidad es igual a la descrita, colocándose de manera que el conjunto tiene forma de paralelepípedo. La Figura 1 presenta un esquema del conjunto, donde se puede apreciar que la celda unidad resultante tiene simetría quiral.

El material empleado como sustrato dieléctrico es FR4 comercial, de bajas pérdidas, con un grosor de 2.4 mm. Se ha modelado el comportamiento de este tipo de estructuras para distintos tamaños de los segmentos que constituyen las manivelas y diferentes distancias de separación entre celdas unidad utilizando un software comercial, CST Studio Suite<sup>TM</sup>.

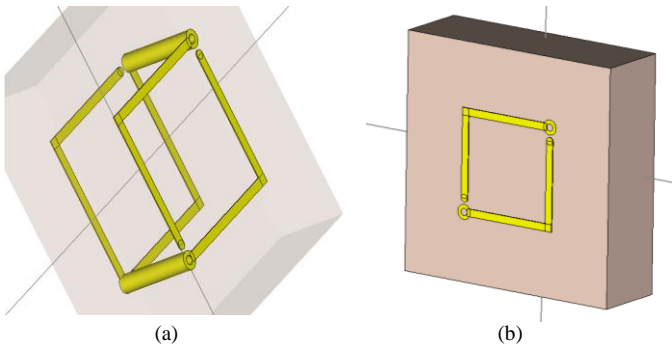


Fig. 1. (a) Esquema de la inserción metálica de cinco segmentos con la que se construye el metamaterial. (b) Aspecto de la celda unidad.

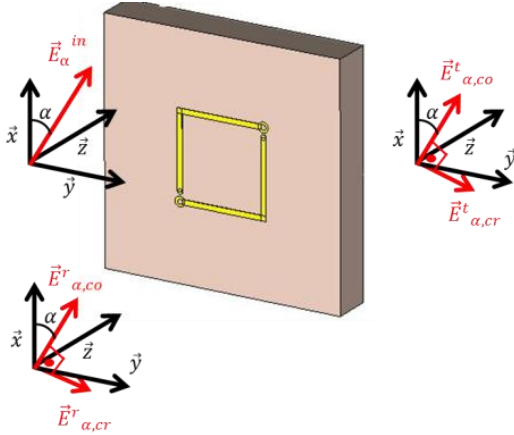


Fig. 2. Esquema de simulación y campos eléctricos que intervienen, donde  $\vec{E}_\alpha^{in}$ ,  $\vec{E}_\alpha^r$  y  $\vec{E}_\alpha^t$  representan a la onda incidente, reflejada y transmitida, respectivamente.  $\alpha$  es el ángulo de la señal incidente respecto al eje- $x$ , y los subíndices  $co$  y  $cr$  representan las componentes en la dirección paralela y perpendicular al campo incidente.

En la Figura 2 se muestra un esquema de la simulación, donde se ha iluminado con un campo eléctrico linealmente polarizado formando un ángulo  $\alpha$  respecto al eje- $x$ . En esta figura también se indican las componentes en la dirección paralela (*copolar*,  $co$ ) y perpendicular (*crosspolar*,  $cr$ ), de los campos reflejados,  $\vec{E}_\alpha^r$  y transmitidos,  $\vec{E}_\alpha^t$ .

La Figura 3 muestra  $|\vec{E}_{co}^t|$  para dos orientaciones del campo incidente,  $\alpha = -45^\circ$  y  $\alpha = 45^\circ$ , así como  $|\vec{E}_{cr}^r|$  para  $\alpha = 0^\circ$ . El valor no nulo del campo reflejado *crosspolar*, línea roja de la figura, indica que la señal reflejada no es linealmente polarizada, algo que no es propio de los medios quirales isotropos. Además, la magnitud de los campos transmitidos depende de la orientación de la señal incidente, curvas verde y azul, lo que confirma un comportamiento bianisotrópico del medio. La respuesta proporcionada por este diseño no es la deseada inicialmente, ya que no es isotrópica y además, el campo eléctrico reflejado no es paralelo al incidente [4, 7].

Analicemos este problema desde el punto de vista de las simetrías existentes [8, 9]. Los efectos citados resultan ser consecuencia de que el medio diseñado posee tres ejes de simetría  $C_2$ , uno en el plano de incidencia, plano  $xy$ ; es decir, la distribución de inserciones es simétrica bajo una rotación de  $180^\circ$  alrededor de un eje que pasa por el centro de la celda unidad y que es perpendicular al plano de incidencia. Esta simetría hace que el material muestre un comportamiento biáxico, presentando dos índices de refracción diferentes a lo largo de dos direcciones conocidas como ejes ópticos. A lo largo de estas dos direcciones el comportamiento del material es isotrópico.

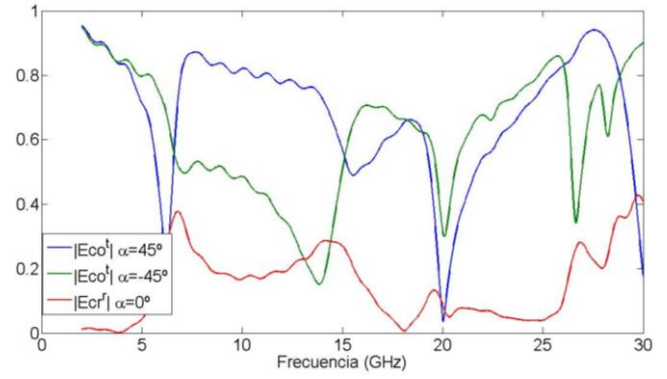


Fig. 3. Componentes  $co$  del campo transmitido para dos orientaciones diferentes del campo incidente,  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = -45^\circ$ . La línea en rojo representa la componente  $cr$  del campo reflejado para  $\alpha = 0^\circ$ .

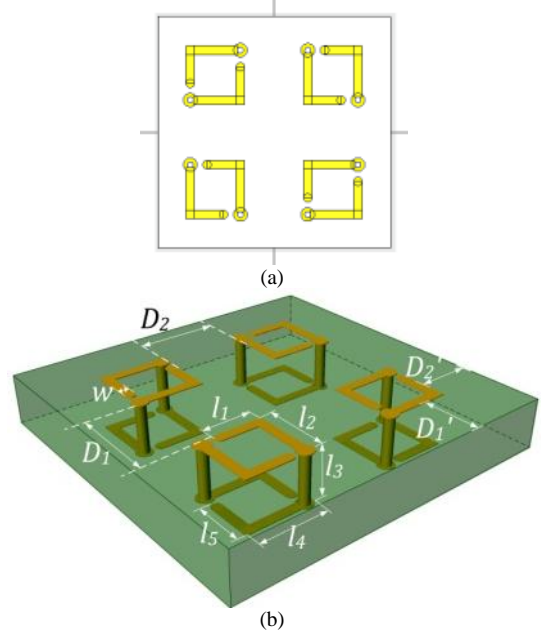


Fig. 4. Esquema del nuevo modelo de metamaterial propuesto. (a) Vista frontal. (b) Vista en perspectiva y dimensiones del modelo.

Para evitar la anisotropía sería necesario que en el plano de incidencia existiera al menos un eje de simetría  $C_3$ , o lo que es lo mismo, que el medio fuera simétrico bajo una rotación de  $120^\circ$ . De esta forma, el material presentaría un comportamiento similar al de un material uniaxial. En este caso, es de esperar que la onda transmitida sea independiente de la orientación del campo incidente. Dada la geometría de nuestro diseño es más sencillo crear una nueva distribución con simetría  $C_4$ . La nueva celda unidad se construye con cuatro pares de manivelas como las mostradas en la Figura 1, de forma que cada par quede rotado un ángulo de  $90^\circ$  respecto a las parejas colindantes. Se constituye así una celda unidad con ocho manivelas de cinco segmentos y simetría  $C_4$ .

Un esquema del modelo descrito se puede observar en la Figura 4. En esta nueva estructura se ha mantenido el grosor y tipo de dieléctrico, modificándose otros parámetros de diseño como la longitud de los segmentos ( $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_4$  y  $l_5$ ), la separación entre pares de manivelas colindantes ( $D_1$  y  $D_2$ ) y la distancia entre celdas unidad vecinas ( $D_1'$  y  $D_2'$ ) a fin de obtener la respuesta de distintos medios basados en esta distribución de inserciones metálicas. Para los resultados que

se van a mostrar a continuación las dimensiones de la celda unidad que se han empleado son  $l_1=l_5=3.5 \text{ mm}$ ,  $l_2=l_4=4.6 \text{ mm}$ ,  $l_3=2.4 \text{ mm}$ ,  $w=0.5 \text{ mm}$ ,  $D_1=D_2=4.4 \text{ mm}$  y  $D_1'=D_2'=D_1/2 \text{ mm}$ .

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5 muestra el módulo de la componente *copolar* del campo eléctrico transmitido para dos valores diferentes del ángulo  $\alpha$ , ( $\alpha=45^\circ$  y  $\alpha=-45^\circ$ ). Con la nueva distribución puede observarse que no aparecen los problemas de anisotropía que se tenía con la anterior, ya que para orientaciones diferentes del campo incidente la componente *co* es similar, de hecho ambas curvas se superponen. Por su parte, el campo reflejado es paralelo a la señal incidente, como prueba el hecho de que su componente *crosspolar* es nula, independientemente del valor del ángulo  $\alpha$  (no mostrado en la figura). Estos resultados muestran que, gracias a la inclusión de condiciones de simetría  $C_4$  en el diseño de la celda unidad, se consigue un material quiral homogéneo e isótropo en incidencia normal. El ángulo de rotación del campo eléctrico, la quiralidad y la elipticidad son parámetros representativos de la actividad electromagnética del medio quiral que se pueden obtener a partir de los valores de campo eléctrico anteriores haciendo uso de las siguientes expresiones. El ángulo de rotación  $\theta$  viene dado por:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2|E_{co}^t||E_{cr}^t|\cos(\phi_{co} - \phi_{cr})}{|E_{co}^t|^2 - |E_{cr}^t|^2} \right) \quad (3)$$

donde  $\phi_{co} - \phi_{cr}$  es la diferencia de fase de los campos eléctricos transmitidos. Se puede definir el coeficiente de transmisión a derechas y a izquierdas,  $T_{++}$  y  $T_{--}$ , en función de las componentes *copolar* y *crosspolar* del campo eléctrico de la forma,

$$\begin{aligned} T_{++} &= E_{co} + jE_{cr} \\ T_{--} &= E_{co} - jE_{cr} \end{aligned} \quad (4)$$

En términos de estas dos nuevas variables se puede calcular el parámetro de quiralidad ( $\kappa$ ) mediante,

$$\kappa = \frac{1}{2k_0L} \phi \left( \frac{T_{--}}{T_{++}} \right) + \frac{j}{2k_0L} \log \left( \frac{|T_{++}|}{|T_{--}|} \right) \quad (6)$$

donde  $k_0$  es el número de onda y  $\phi$  es la fase del cociente de los dos coeficientes de transmisión. Por su parte, la elipticidad ( $\eta$ ) se obtiene como:

$$\eta = \frac{1}{2} \arctang \left( \frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2} \right) \quad (7)$$

La Figura 6 presenta los campos transmitidos y reflejados entre 2 y 18 GHz. Claramente se puede observar tres resonancias en 6.2, 12.7 y 17.3 GHz. A estas frecuencias la componente *crosspolar* del campo transmitido alcanza un valor local máximo, mientras que la componente *copolar* es mínima; en el resto de la banda la componente *cr* disminuye su valor y se encuentra por debajo de los valores determinados para la componente *copolar* de campo eléctrico transmitido.

En la Figura 7 se representa el ángulo de rotación, la quiralidad y la elipticidad para el medio quiral bajo estudio. La actividad óptica del medio, esto es, su *dispersión óptica rotatoria* y su *dicroísmo circular* adquieren valores extremos en las frecuencias de resonancia citadas.

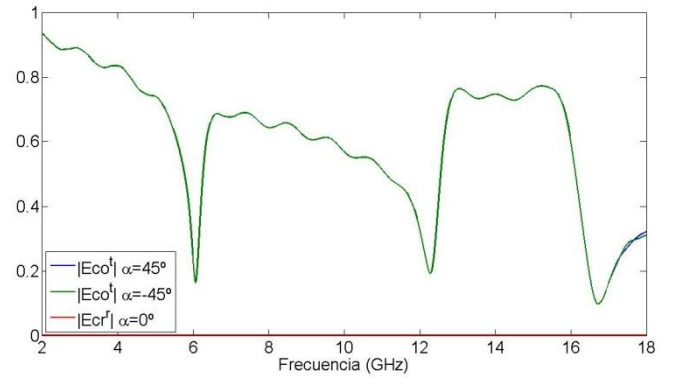


Fig. 5. Componente *co* del campo transmitido para dos valores diferentes del ángulo del campo incidente,  $\alpha=45^\circ$  y  $\alpha=-45^\circ$ , nótese que la línea azul queda oculta tras la línea verde. La línea inferior (color rojo) representa la componente *cr* del campo reflejado para  $\alpha=0$ .

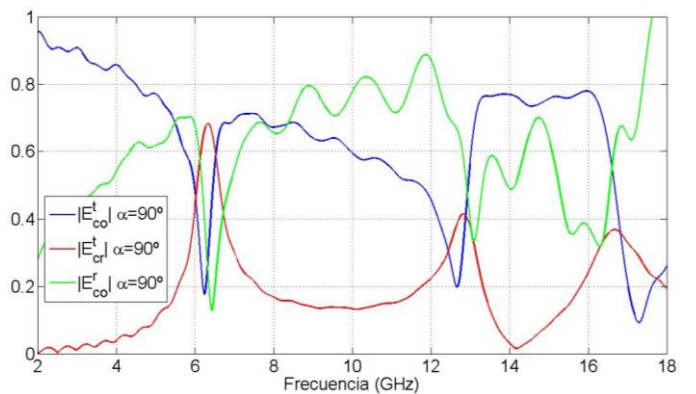


Fig. 6. Módulo de campo eléctrico transmitido y reflejado para  $\alpha=90^\circ$ .  $|\vec{E}_{co}^t|$  y  $|\vec{E}_{cr}^t|$  representan el módulo de la componente paralela y perpendicular del campo transmitido, respecto del campo incidente,  $|\vec{E}_{co}^r|$  es el módulo de la componente paralela del campo reflejado.

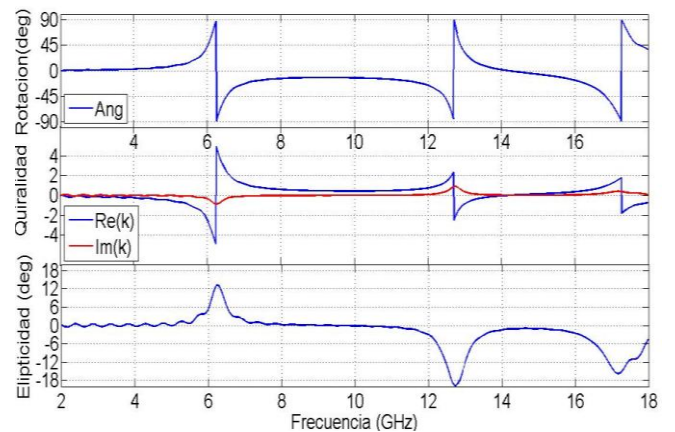


Fig. 7. Ángulo de rotación (superior), quiralidad (en medio) y elipticidad (inferior) para el medio quiral bajo estudio.

El ángulo de rotación llega hasta  $90^\circ$  en todas las resonancias y, además, la quiralidad alcanza un extremo local en estas frecuencias con valor máximo de  $\kappa=4.9-0.9j$  en 6.2 GHz. Por su parte, la elipticidad también alcanza valores máximos en esas mismas frecuencias, donde su valor oscila entre  $15^\circ$  y  $20^\circ$ . Todo ello indica que en las frecuencias de resonancia la onda pasa de ser linealmente polarizada a elíptica. Además, si la onda incidente está linealmente polarizada según la dirección  $x$ , el eje mayor de

dicha elipse se encuentra en la dirección  $y$ , rotada  $90^\circ$  con respecto a la onda incidente.

Si se observa en detalle la gráfica que muestra el ángulo de rotación (Fig. 7, superior), resulta que en la región comprendida entre las dos primeras resonancias el ángulo de rotación no es cero, tras la primera resonancia el campo eléctrico queda rotado un ángulo de unos  $-20^\circ$ . Además, en dicha región la elipticidad es cero (Fig. 7, inferior), por lo el campo queda linealmente polarizado y rotado  $20^\circ$  respecto a la dirección incidente, con una quiralidad prácticamente constante.

Este hecho no ocurre en la banda comprendida entre la segunda y la tercera resonancia, el ángulo de rotación disminuye hasta alcanzar de nuevo los  $0^\circ$  en el rango desde 14.1 hasta 14.3 GHz, en ese intervalo la quiralidad es nula, tanto su parte real como su parte imaginaria, y la elipticidad presenta un valor muy pequeño, pero distinto de cero, en torno a  $2^\circ$ . Esto indica que el campo eléctrico a la salida del medio para ese intervalo de frecuencias vuelve a ser una onda linealmente polarizada y orientada en la misma dirección que la onda incidente. Tras esto, el campo vuelve a aumentar su ángulo de rotación de nuevo hasta los  $90^\circ$ , en una nueva resonancia en 17.3 GHz.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio mediante simulación de estructuras periódicas quirales basadas en manivelas. En primer lugar ha sido analizada una celda unidad con simetría  $C_2$  formada por dos manivelas de cinco segmentos enfrentadas de forma que el conjunto tiene forma de paralelepípedo. A continuación hemos aumentado las condiciones de simetría en la celda unidad agrupando cuatro pares de manivelas, de forma que cada par es rotado  $90^\circ$  con respecto a sus colindantes. Se ha comprobado que para obtener una respuesta quiral e isotropía es necesario que el material posea simetría  $C_4$  en el plano perpendicular a la dirección de incidencia.

Los metamateriales estudiados presentan una gran actividad electromagnética. Se comprueba la existencia de varias frecuencias de resonancia dentro de la banda de estudio. En estas frecuencias la quiralidad presenta un cambio abrupto alcanzando valores extremos, el ángulo de rotación llega a  $90^\circ$  y la elipticidad también muestra valores absolutos máximos.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Investigación del MEC a través del proyecto TEC 2010-21496-C03-02.

#### REFERENCIAS

- [1] I.V. Lindell, A.H. Shivola, S.A. Tretyakov and A.J. Vitanen, "Electromagnetic waves on chiral and bi-isotropic media", Artech House, Norway, 1994.
- [2] J.B. Pendry, "A Chiral Route to Negative Refraction", Science, Vol. 306, pp. 1353-1355, 2004.
- [3] C.R. Brewitt-Taylor, P.G. Lederer, F.C. Smith and S. Haq, "Measurement and Predictions of Helix-Loaded Chiral Composites", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol 47, pp. 692-700, 1999.
- [4] Á.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, J. Margineda, M.J. Núñez and E. Martín, "Isotropic and Homogeneous Behaviour of Chiral Media Base on Periodical Inclusions of Cranks", IEEE Microwave and Wireless Components Let., Vol. 20, pp. 175-177, 2010.
- [5] I. Barba, A.C. López Cabeceira, A. Gómez and J. Represa. "Chiral Media Based on Printed-Circuit Board Technology: A Numerical Time-Domain Approach", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, n.º. 3, 2009.
- [6] G.J. Molina-Cuberos, Á.J. García-Collado, I. Barba, A.C. López Cabeceira, J. Represa and J. Margineda, "Chiral Media Based on Periodic Distribution of Cranks. The four Cranks Resonator", Metamaterials'2011: The Fifth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwave and Optics, Barcelona, Spain, 2011.
- [7] Á.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, M.J. Núñez y J. Margineda, "Caracterización experimental de medios quirales basados en inclusiones periódicas. El resonador de cuatro manivelas", XXVI Simposium Nacional URSI, Madrid, 2011.
- [8] A.N. Serdyukov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A. Sihvola, "Electromagnetics of Bi-Anisotropic Materials: Theory and Applications", Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001
- [9] J. D. Baena, L. Jelinek, and R. Marques, "Towards systematic design of isotropic bulk magnetic metamaterials using the cubic point groups of symmetry," Phys. Rev. B 76(24), 245115 (2007).