

DISEÑO DE MEDIOS QUIRALES BASADOS EN LA DISTRIBUCIÓN ORDENADA DE MANIVELAS

Ángel J. García-Collado⁽¹⁾, Gregorio J. Molina-Cuberos⁽²⁾, José Margineda⁽²⁾,
María J. Núñez⁽²⁾, Ernesto Martín⁽²⁾

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

⁽¹⁾ Dpto. de Ciencias Politécnicas, Universidad Católica San Antonio, Guadalupe-Murcia, España

⁽²⁾ Dpto. de Física, Facultad de Químicas, Universidad de Murcia, Murcia, España

Abstract- In this communication, the experimental results obtained from the measurements of evenly distributed metallic cranks on a dielectric plate substrate is presented. The effect we have analyzed is the rotation of the polarization plane of an electromagnetic wave, both in free space and inside a circular waveguide. It is shown that the rotation of the polarization plane by some distributions of cranks, with specific symmetry properties, can be explicitly ascribed to a chirality effect.

I. INTRODUCCIÓN

Un objeto, figura o grupo de puntos son quirales, y por tanto presentan quiralidad, si la imagen especular de los mismos no se puede hacer coincidir consigo misma mediante operaciones de traslación y rotación [1]. En otras palabras, dicho objeto carece de simetría bilateral o es asimétricamente especular. Por el contrario, el objeto, figura o grupo de puntos será no quiral cuando carezca de la propiedad de quiralidad y, por tanto, se pueda superponer con su imagen especular.

A frecuencias ópticas existen compuestos naturales formados por moléculas quirales que presentan actividad óptica [2]. Esta situación no tiene lugar a frecuencias de microondas ni milimétricas, por lo que estos medios tienen que ser construidos de forma artificial introduciendo elementos con simetría quiral en un sustrato de material dieléctrico, de forma que el compuesto resultante presenta la misma propiedad de actividad pero a frecuencias inferiores. Los medios quirales son medios bi-isótropos recíprocos (RBI) y también son denominados medios de Pasteur.

La mayor parte de los materiales quirales desarrollados se basan en la inserción aleatoria de hélices en el seno de un sustrato dieléctrico de tipo resina epoxy [3]-[4]. Las propiedades mecánicas de la resina permiten cualquier orientación de los elementos quirales, si bien se debe mantener especial cuidado en lograr una distribución sin orientaciones ni posiciones privilegiadas. En anteriores trabajos de nuestro grupo se analizaron este tipo de materiales en medio libre con resultados acordes con lo esperado [5].

Recientemente hemos propuesto como alternativa al empleo de hélices el uso de manivelas metálicas [6] (*crank* en inglés) en un sistema de fabricación similar al desarrollado previamente con hélices [5]. Los resultados obtenidos muestran claramente un comportamiento quiral. Hemos encontrado que el empleo de manivelas presenta ventajas de

fabricación respecto a las hélices, además nos permite estudiar interesantes comportamientos al modificar la longitud de los segmentos que las constituyen [6]. Por contra, la distribución aleatoria de manivelas hace disminuir el grado de homogeneidad de los materiales, lo que nos ha llevado a considerar otras distribuciones que permitiesen la homogeneidad del material. Las nuevas distribuciones propuestas se basan en la colocación de forma ordenada de los elementos individuales lo que permite, además, la implementación de los materiales en circuito impreso [7].

En esta aportación profundizamos en el análisis experimental de este tipo de estructuras y abordamos el estudio de su comportamiento, comprobando que la respuesta de estos materiales complejos es coincidente y acorde tanto en medio libre como en guía de onda. Finalmente, proponemos una estructura que presenta un comportamiento quiral, homogéneo e isótropo.

II. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN Y MEDIDA

A. Técnicas de fabricación

La Figura 1 muestra la estructura analizada [8] junto a su imagen especular respecto al plano XZ. Cada una de estas estructuras por sí misma presenta quiralidad según la definición dada por Lord Kelvin. Estos elementos individuales serán distribuidos ordenadamente en un sustrato dieléctrico plano, por lo tanto, para cada tipo de manivela se implementa un material, con comportamientos simétricos en su respuesta electromagnética. Según el elemento individual insertado se tendrán medios dextrógiros (*righthanded*) o medios levógiros (*lefthanded*) [9].

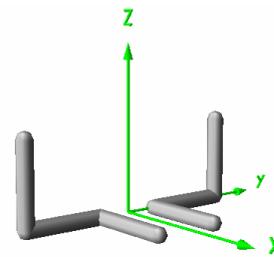


Fig. 1. Estructuras metálicas tipo manivela o crank, simétricas respecto del plano XZ.

La Tabla 1 muestra un esquema de los medios estudiados. Designamos como ML01 y ML02 los materiales que se

analizan en medio libre y como MG01 y MG02 los analizados en medio guiado.

La estructura ML01 es una distribución ordenada de elementos metálicos de 15 mm de longitud, con sus tres segmentos iguales en tamaño (manivela simétrica). La separación entre manivelas consecutivas es de 8.5 mm en sentido vertical y horizontal. La estructura ML02 presenta los elementos individuales de las mismas dimensiones que ML01, en agrupaciones de cuatro elementos, cada uno de ellos girado 90° con respecto a su vecino, y separado de él 3.0 mm. Las agrupaciones en forma de cruz quedan distanciadas entre sí 2.0 mm.

La estructura MG01 tiene forma cilíndrica para adaptarse a la guía circular. El único elemento metálico está centrado en la superficie circular, tiene una longitud total de 18.0 mm y está dividido en tres segmentos iguales. Por último, la estructura MG02 está constituida por cuatro manivelas de 18.0 mm de longitud total dispuestas en cruz, de la misma forma que en la ML02 y con una distancia de 3.0 mm entre las mismas.

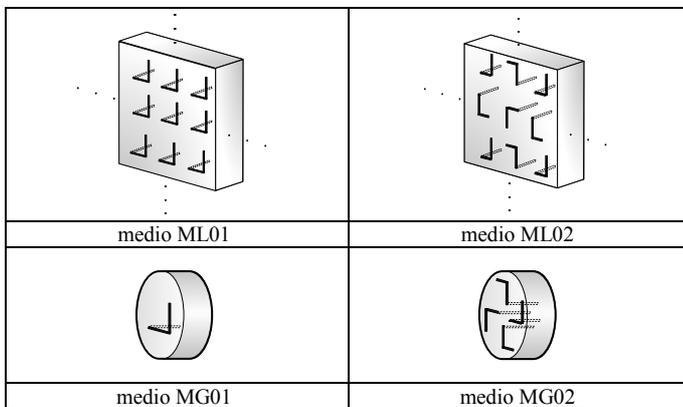


Tabla 1. Esquema de los medios fabricados: ML01, distribución ordenada para medio libre; ML02, distribución en cruz para medio libre; MG01, manivela en medio guiado; MG02, distribución en cruz para medio guiado. Los medios ML01 y ML02 tienen dimensiones de 120 x 120 mm; los medios MG01 y MG02 tienen un diámetro de 23.83 mm.

En todos los casos se han dispuesto las manivelas en un sustrato dieléctrico formado por espuma de poliuretano, sobre el que se disponen dos de los segmentos de la manivela, quedando el tercero introducido en dicho sustrato.

El empleo de espuma de poliuretano como medio dieléctrico es un paso previo para el uso de tecnología de circuito impreso, si bien en ésta última el grosor del sustrato limita la longitud del segmento que queda insertado en el mismo. La técnica de fabricación cuenta con dos grandes ventajas: es muy flexible en el diseño, lo que permite facilidad para experimentar con diferentes distribuciones, y presenta costes de fabricación reducidos.

B. Técnica experimental de medida

Los medios son colocados en la célula de medida sobre la que incide una onda electromagnética en la banda de frecuencias 8.2-12.4 GHz con polarización lineal. El dispositivo de medida está conformado por un analizador de redes de dos puertos conectados a dos tramos de guía rectangular unidos a bocinas exponenciales, para el caso de propagación en medio libre, o a transiciones de guía rectangular-cilíndrica, para el caso de propagación en medio guiado. El banco de experimentación sobre el que analizarán

los medios descritos ha sido expuesto en anteriores trabajos [5] y [10].

En ambos casos, el sistema permite la libre rotación del extremo en el que se encuentra el sensor receptor. Una vez dispuesto y calibrado adecuadamente el dispositivo de medida, se gira de forma manual en incrementos de 5° el tramo de guía rectangular conectado al puerto de recepción del analizador de redes, midiendo y almacenando el parámetro S_{21} para todas las frecuencias de la banda de estudio. Se barre un rango de 90° en ambos sentidos de giro, partiendo de la situación inicial de adaptación entre el sistema emisor y receptor. Por convenio aceptamos que el giro de la estructura a la derecha tenga valores positivos de ángulo de giro y se asignan valores negativos al giro a la izquierda.

Se determina para cada frecuencia el valor del ángulo que hace máximo el parámetro de transmisión S_{21} . La limitación experimental de 5° restringe la resolución con la que se determina el ángulo girado por la onda electromagnética al atravesar la estructura con inserciones metálicas. La quiralidad está relacionada con el giro experimentado por la onda propagante mediante la expresión [11]:

$$\theta = 2d\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\kappa' \quad (1)$$

donde d es el grosor de medio, y κ' la parte real de la quiralidad $\kappa(\omega) = \kappa'(\omega) - j\kappa''(\omega)$ que es la responsable de la rotación. La parte imaginaria implica un factor de pérdidas, cuyo valor presenta un máximo en la zona de resonancia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar hemos comprobado que los resultados obtenidos en medio libre no dependen de la zona del material iluminado, por lo que los medios son homogéneos. Dos son las distribuciones analizadas en este trabajo.

A. Distribución ordenada de manivelas

La distribución más simple consiste en la disposición ordenada de manivelas, todas con idéntica orientación, medio ML01. La Figura 2 (superior) muestra el ángulo de giro obtenido en medio libre cuando la onda incide sobre la cara del material en la que quedan los segmentos en ángulo (cara anterior). Observamos que el mayor giro se produce en torno a los 10.75 GHz y es de signo negativo, lo indica un giro hacia la izquierda con respecto al sentido de avance de la onda. Simulaciones realizadas con software comercial (Mefisto™) producen resultados acordes con los experimentales [12]. La muestra ML01 es, claramente, anisótropa. Al rotarla un ángulo de 90°, figura 2 (inferior), observamos que también se produce un giro en la onda incidente, pero esta vez de signo positivo, manteniendo el valor máximo del giro a la misma frecuencia. Cambios en la orientación relativa de las manivelas respecto a la onda incidente producen curvas similares a las mostradas en la Fig. 2, alcanzándose la máxima rotación aproximadamente a la misma frecuencia de 10.75 GHz.

Al incidir sobre la cara posterior del medio se obtiene un comportamiento similar pero con el giro en sentido contrario, lo que nos indica que el medio no es recíproco y que, por tanto, no es material quiral (RBI). Hemos observado que cambiando la distancia entre los elementos cambia también la

magnitud del ángulo de giro y la frecuencia a la que se produce el máximo.

Los resultados obtenidos muestran que el posible comportamiento quiral de ML01 está enmascarado por otros fenómenos tales como el efecto polarizador de las estructuras y las posibles resonancias que aparecen entre los diferentes elementos metálicos que constituyen las inserciones. Resulta complejo conocer el grado preciso de la influencia de la quiralidad en la respuesta global del medio.

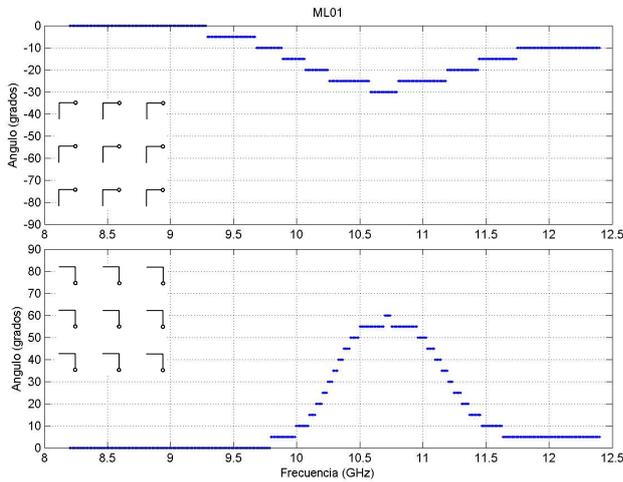


Fig. 2. Giro del plano de polarización en medio libre para ML01. Los esquemas de las estructuras muestran la posición de las distribuciones de manivelas al ser incididas con polarización lineal vertical.

La Figura 3 muestra los resultados medidos en guía de ondas para el medio MG01. El comportamiento es acorde con el mostrado por ML01. El valor máximo del giro del plano de polarización ocurre a 8.5 GHz, con valor y signo que depende de la orientación de la manivela respecto a la señal incidente. Se encuentra además, una segunda frecuencia de resonancia (~ 10.1 GHz).

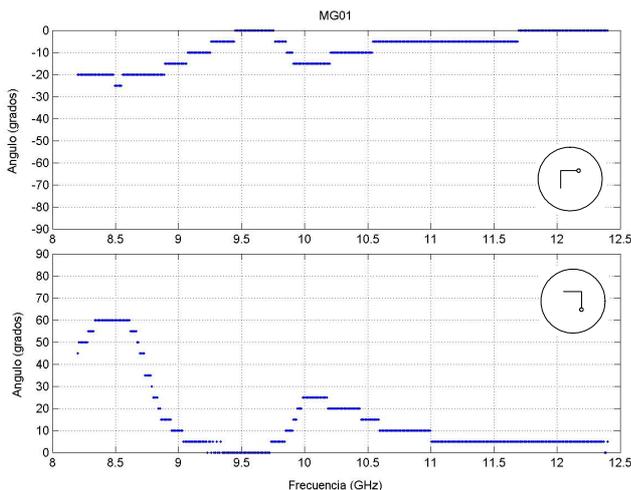


Fig. 3. Giro del plano de polarización en medio guiado para MG01. Los esquemas muestran la posición de las manivelas al ser incididas con polarización lineal vertical.

Al analizar comparativamente los medios ML01 y MG01 se observa que la respuesta es similar. Además, la frecuencia de resonancia a la que se alcanza el valor máximo del giro de polarización depende del tamaño de la inclusión metálica y

de la distancia relativa con respecto a las demás. La frecuencia (f_r) a la que se produce este máximo de giro está relacionada con el tamaño total de la inclusión (L) de forma que $L \cong \lambda_r / 2$ [13].

Si se analizan medios construidos a partir de elementos crank simétricos a los anteriores (Fig. 1) se obtienen resultados experimentales similares a los recogidos en la figura 2, con signos de giro cambiados. La frecuencia a la que se mide el valor máximo del giro y el valor del mismo se mantienen.

B. Distribución de manivelas en cruz

Para evitar que la respuesta del medio dependa de la orientación relativa de la onda incidente, hemos dispuesto las manivelas en forma de cruz. Dada la geometría de la distribución, una rotación de 90° de los materiales no debe suponer variación alguna. Hemos medido otros valores de rotación, obteniendo siempre la misma respuesta. La Figura 4 muestra los resultados de ML02 en los siguientes casos: incidencia sobre la cara anterior sin rotación, con una rotación de 60° e incidencia posterior. Como se puede comprobar, las respuestas en las tres situaciones prácticamente coinciden, encontrándose una frecuencia de resonancia entorno a ~ 10.4 GHz.

La distribución en cruz de los elementos metálicos hace que los efectos de la polarización debidos a los ángulos rectos se compensen [7]. Dado que la rotación no depende de la cara sobre la que incida la onda (reciprocidad), ni del lugar de incidencia (homogeneidad) ni de la orientación relativa de la muestra (isotropía), entendemos que la quiralidad del medio es la responsable del giro experimentado por el plano de polarización al atravesar el medio. Por lo tanto, ML02 es un medio quiral o de Pasteur.

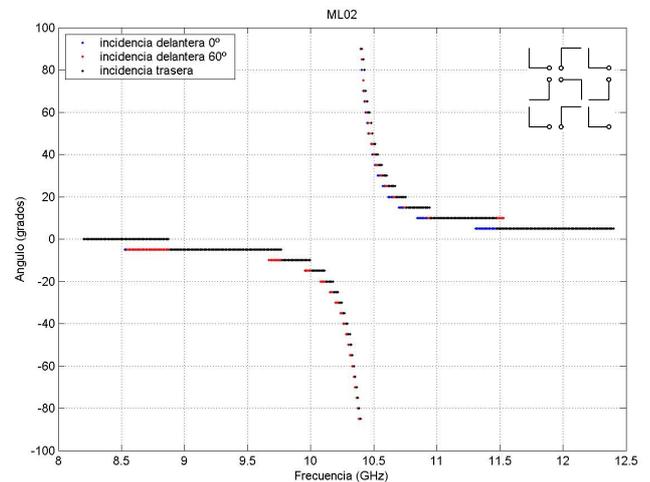


Fig. 4. Giro del plano de polarización en medio libre para ML02. El esquema muestra la posición de las manivelas al incidir por la cara delantera a 0° con polarización lineal vertical.

Hemos comprobado también que el comportamiento de un medio compuesto por manivelas con simetría especular a las empleadas en el medio ML02 (Fig. 1), es similar al descrito, si bien, los signos del giro del plano de polarización son los contrarios (Fig. 5).

Al analizar en guía de onda el medio MG02 (Tabla 1) se observa el mismo comportamiento que el observado para una

distribución similar de manivelas en medio libre (ML02). La frecuencia de resonancia a la cual tiene lugar el cambio en el signo del giro del plano de polarización se desplaza hacia frecuencias inferiores (~ 8.3 GHz) (Fig. 6).

Si se disminuye el tamaño de las manivelas ($5 \times 5 \times 5$ mm), se encuentra que la frecuencia de resonancia es de 9.5 GHz (Fig. 7), que resulta ser ligeramente inferior a la producida por manivelas del mismo tamaño pero en medio libre (ML02). Por tanto encontramos que la frecuencia de resonancia depende de la longitud total de la manivela y de las distancias entre éstas.

En definitiva, tanto en medio libre como en guiado, se ha logrado implementar estructuras basadas en la inclusión de elementos metálicos en forma de manivela, que en su distribución ordenada presentan homogeneidad, isotropía y reciprocidad.

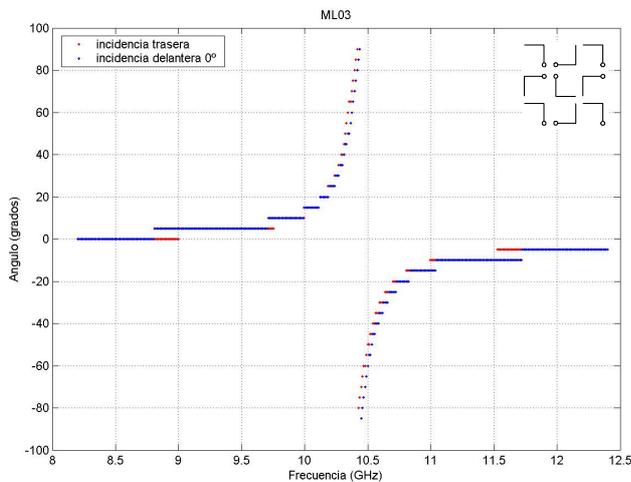


Fig. 5. Giro del plano de polarización en medio libre para ML03 compuesto por manivelas simétricas a las empleadas en ML02. El esquema muestra la posición de las manivelas al ser incididas por la cara delantera a 0° con polarización lineal.

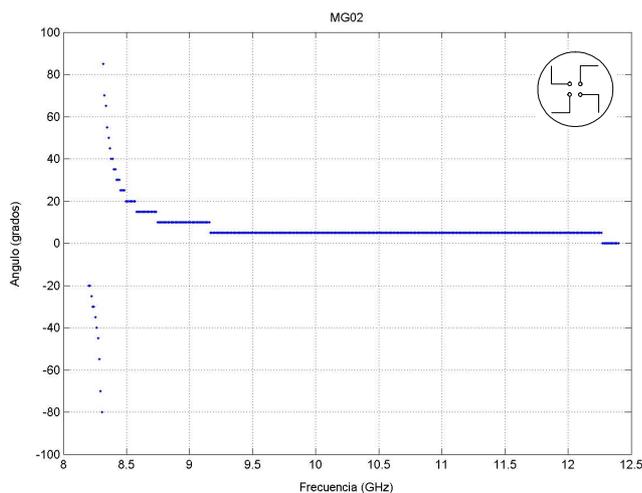


Fig. 6. Giro del plano de polarización en guía de onda para MG02. El esquema muestra la posición de las manivelas al ser incididas por la cara delantera a 0° con polarización lineal.

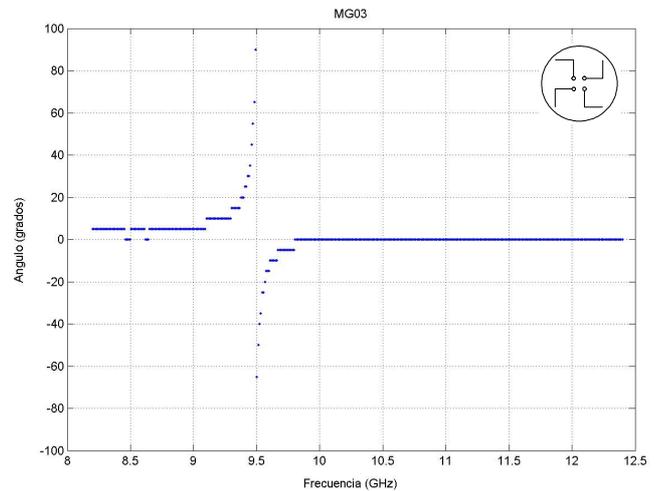


Fig. 7. Giro del plano de polarización en guía de onda para MG03, implementada con manivelas simétricas a las empleadas en MG02. El tamaño de las manivelas es de $5 \times 5 \times 5$ mm, con una distancia entre ellas de 4 mm.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el ángulo de rotación en una onda linealmente polarizada producido por medios fabricados mediante la inclusión de hilos conductores en forma de manivela. Los resultados obtenidos muestran que se puede diseñar un material quiral mediante la distribución ordenada de manivelas. Los materiales son homogéneos e isotrópicos en las condiciones experimentales. Además, en comparación con la inserción aleatoria, la implementación ordenada sobre superficies planas de materiales dieléctricos presenta la ventaja añadida de ser susceptible de fabricación con tecnología de circuito impreso, de forma que se puede tener un dominio completo sobre el proceso constructivo.

Hemos encontrado que la frecuencia de resonancia depende de la longitud de las manivelas y de la posición relativa de estas manivelas entre sí. Queda por determinar con mayor exactitud los efectos debidos a las resonancias que aparecen entre los elementos metálicos que constituyen la estructura, así como los efectos que dichas resonancias introducen en el propio efecto de quiralidad deseado.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] Lord Kelvin, Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light, C.J. Clay and Sons, Cambridge University Press, Warehouse, London, 1904.
- [2] D. F. Arago, Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage a travers certains corps diaphanes, et sur quelques autres nouveaux phenomenes d'optique, Mem. Inst., vol. 1, pp. 93-134, 1811.
- [3] D. L. Jaggard, A. R. Mickelson y C. H. Papas, On electromagnetic waves in chiral media, Appl. Phys., vol. 18, pp. 211-216, 1979.
- [4] G. C. Sun, K. Yao y Z. Liu, Influence of helix parameters on the reflectance of microwave by chiral composites, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 41, pp. 350-353, 1999.
- [5] G. J. Molina-Cuberos, J. Margineda y M. J. Nuñez, Caracterización electromagnética de medios quirales artificiales mediante técnica de onda libre, XX Symposium Nacional URSI, Gandía, 2005.

- [6] G. J. Molina-Cuberos, A. J. García-Collado, J. Margineda., E. Martín, M. J. Núñez, Actividad electromagnética de medios quirales basados en manivelas, XXIII Simposium Nacional URSI, Madrid, 2008.
- [7] A. J. García-Collado et al., Materiales avanzados para frecuencias de microondas: nuevos diseños, técnicas de medida y herramientas de análisis, VI Iberian Meeting on Computational Electromagnetics, Chiclana de la Frontera, 2008.
- [8] J. H. Cloete, M. Bingle y D. B. Davidson, Scattering and absorption by thin metal wires in rectangular waveguide-chiral cranks versus non chiral staples, 8th International Conference on Electromagnetics of Complex Media, Lisbon, Portugal, 2000.
- [9] L. Pasteur, Sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire, Ann. de Chim. et Phy., vol. 24, pp. 442–459, 1848.
- [10] A. J. García-Collado, J. Margineda, E. Martín, G. J. Molina-Cuberos, M. J. Núñez, Estudio experimental de inserciones metálicas quirales en medios guiados, XXII Simposium Nacional URSI, 2007.
- [11] I. V. Lindell, A. H. Shivola, S. A. Tretyakov, A. J. Viitanen, Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media, Artech House, 1994.
- [12] Ana C. L. Cabeceira, et al., Étude numérique et expérimentale des milieux chiraux réalisés sur circuit imprimé, 6^{èmes} Journées Nationales Microondes, Grenoble, 2009.
- [13] G. Busse et al., Waveguide characterization of chiral material: Experiments, IEEE Trans on MTT, MTT-47 (3), pp 297-301, 1999.