

Manto de invisibilidad en microondas

E. Septién y V. Aboites

*Departamento de Fotónica, Centro de Investigaciones en Óptica,
Loma del Bosque 115, 37150 León, México.*

Recibido el 18 de octubre de 2011; aceptado el 23 de noviembre de 2011

Se presentan resultados experimentales de un manto de invisibilidad operando en el rango de las microondas a una frecuencia de 10.525 GHz. El análisis teórico está basado en un análisis por mapeo conforme. Los resultados experimentales se obtuvieron a partir de la construcción de un metamaterial con anillos resonantes en cobre. Se encuentra buen acuerdo entre el planteamiento teórico y los resultados experimentales.

Descriptores: Mapa Conformal; metamateriales; invisibilidad óptica.

We present experimental results of an invisibility cloak operating in the microwave range at a 10.525 GHz frequency. The theoretical analysis is based on a conformal mapping. The experimental results were obtained from the construction of a resonant metamaterial with copper rings. A good agreement is found between both results.

Keywords: Conformal mapping; metamaterial; invisibility.

PACS: 42.25. Bs; 41.20.-q; 81.05.Zx

1. Introducción

En este trabajo se presenta el planteamiento teórico y los resultados experimentales de un manto de invisibilidad operando en el rango de las microondas a una longitud de onda de 2.85 cm. El planteamiento teórico está basado en un análisis por mapeo conforme, mientras que los resultados experimentales se obtuvieron a partir de la construcción de un metamaterial con anillos resonantes en cobre.

Los experimentos realizados para encubrimiento en dos dimensiones en el rango de las microondas han utilizado para su modelado el mapeo conforme euclidiano logrando obtener invisibilidad [1,2]. En el infrarrojo lejano también se logró alcanzar invisibilidad [3] y recientemente en tres dimensiones en el rango de la luz visible se ha reportado invisibilidad recurriendo para su descripción al modelado de mapeo cuasi-conformal [5].

En este trabajo, a partir de un modelo de mapeo conforme basado en pared plana se plantea y construye un prototipo basado en un arreglo de anillos resonadores de cobre que funciona como un desviador de ondas centimétricas, evitando que en la superficie encubierta actúe la ley de Snell de la reflexión, con lo que se logra que el objeto encubierto sea invisible para un sistema convencional de radar operando a dicha frecuencia.

En la segunda sección de este trabajo se mencionan aspectos teóricos básicos del mapeo conforme y se muestra el mapeo conforme utilizado en el prototipo construido. En la tercera sección se presentan los resultados experimentales, y finalmente en la cuarta sección se discuten los resultados y se presentan las conclusiones.

2. Planteamiento teórico

2.1. Mapeo conforme Euclidiano

Para un medio óptico con luz confinada en un plano (x, y) , con índice de refracción $n(x, y)$, la transformación de las

coordenadas para la longitud de camino óptico (L.C.O.) del plano original (x, y) al plano (x', y') de acuerdo al principio de Fermat se le denomina transformación conforme en el espacio bidimensional y tiene la característica de que conserva intacto este principio [4,6]. Para el caso $n' = 1$, se crea un espacio transformado que queda vacío al propagarse la luz alrededor de éste al actuar el perfil del índice de refracción del dispositivo como un medio de transformación. El mapeo conforme Euclidiano se obtiene por medio por medio de la función siguiente, donde $z = x + iy$.

$$W = \frac{z + \frac{1}{z}}{2} \quad (1)$$

en la Fig. 1 se observan las líneas de propagación del vector de Poynting en el espacio original y en el espacio transformado quedando en el centro la zona de invisibilidad.

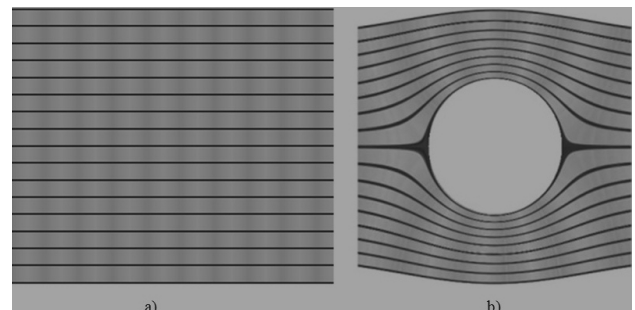


FIGURA 1. Mapa conforme óptico (dispositivo euclidiano) $G(z)=(z+(1/z))/2$ donde la rejilla cartesiana a) es transformada en coordenadas curvas en el espacio b), se muestran los vectores de Poynting del frente de onda (líneas negras), la trayectoria de los rayos de luz sigue las coordenadas curvas, generando un espacio vacío donde un objeto estaría encubierto y es invisible.

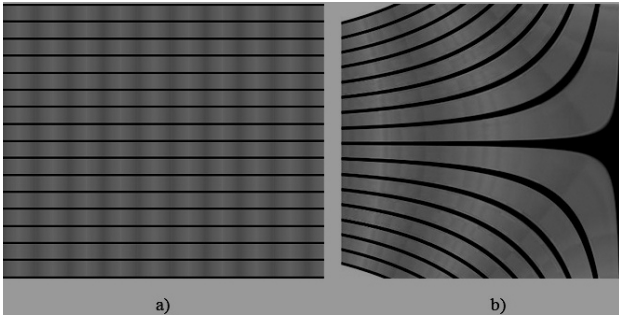


FIGURA 2. Mapeo Conformal para una pared Plana $G(z)=(\cos(1-z))/2$ donde las líneas negras corresponden a los vectores de Poynting. La figura a) indica que la pared está en el lado derecho y que las ondas EM inciden del lado izquierdo hacia el derecho. La figura b) muestra la trayectoria de los vectores de Poynting.

2.2. Mapa Conformal para una pared plana

El mapeo conformal correspondiente a la incidencia de una onda electromagnética plana en una pared plana se modela por medio de la función analítica compleja siguiente:

$$G(Z) = \frac{\cos(1-z)}{2}, \tag{2}$$

La Fig. 2 muestra las líneas de propagación del vector de Pointing en el espacio original y en el espacio transformado. En este mapeo cualitativamente se observa que el frente de onda plano original se transforma siguiendo una trayectoria hiperbólica en las primeras capas del medio de transformación hasta llegar a ser exponencial en las capas más profundas. Nuestro objetivo es construir un metamaterial que reproduzca este efecto en ondas electromagnéticas centimétricas al incidir en una placa metálica. Esta placa metálica hipotéticamente podría ser parte de un vehículo terrestre (e.g. un tráiler) o marino (e.g. un barco).

2.3. Diseño de anillos resonadores en el rango de las microondas

La construcción de un metamaterial para una frecuencia dada de operación en el rango de las microondas se realiza utilizando litografía sobre cobre desnudo de acuerdo a un patrón de diseño de celdas que pueden ser representadas eléctricamente por un circuito inductor-capacitor (LC) como se muestra en la Fig. 3 [7]. Donde los parámetros más importantes son el radio del anillo r , el diámetro del alambre d y la altura del capacitor s [3].

Para una relación r/d realista la inductancia L debe ser mayor o igual que la permeabilidad en el vacío multiplicado por el radio del anillo. Con un arreglo de anillos metálicos cerrados se obtiene respuesta esencialmente al campo eléctrico de un frente de onda por lo que la permitividad eléctrica ϵ es relevante en este tipo de arreglo, mientras la permeabilidad magnética μ es optimizada con la inserción de un capacitor al anillo metálico [7].

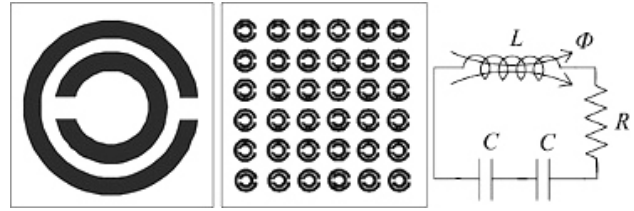


FIGURA 3. Esquema de un circuito LC para un metamaterial y su circuito equivalente.

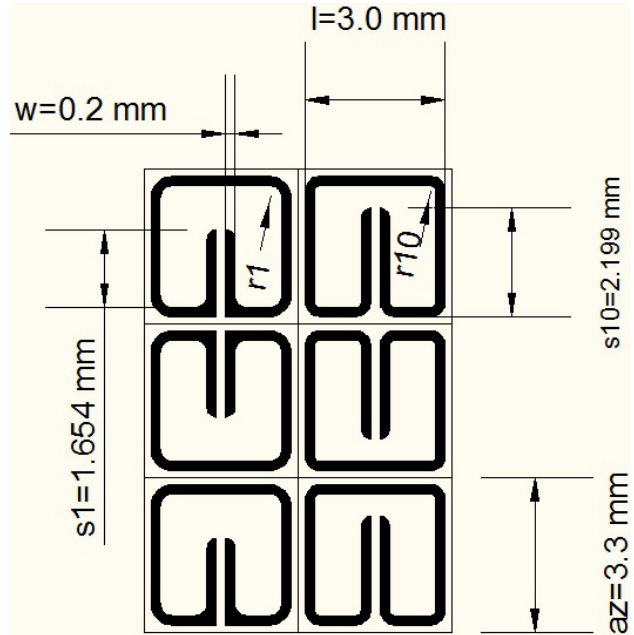


FIGURA 4. Diseño de celdas para metamaterial usado en capa de invisibilidad donde se ven los parámetros de diseño correspondientes a las capas 1 (izquierda) y 10 (derecha).

3. Resultados experimentales

Para un manto de encubrimiento el diseño realizado por Schurig *et al.* [2] consiste en una celda unitaria rectangular (Fig. 4) con dimensión $a = 3.3$ mm en donde la inductancia (L) se ajusta variando el radio r de las esquinas internas de cada celda en cada capa, y la capacitancia (C) se ajusta modificando la altura s . Con esto y empleando el programa COMSOL de elemento finito para problemas de electromagnetismo, se obtienen las propiedades de la permitividad eléctrica ϵ y la permeabilidad magnética μ , que se muestran en la Tabla I. Un elemento potencial de error en el experimento aquí reportado radica en el hecho de que el dispositivo de invisibilidad mostrado en [2] tiene forma cilíndrica mientras que el aquí presentado tiene forma plana. A pesar de esto y como en seguida veremos, los resultados aquí reportados muestran que el dispositivo opera adecuadamente.

La litografía se realizó sobre placa fenólica de cobre siguiendo los parámetros de diseño de una capa de invisibilidad en microondas que funciona para varias frecuencias entre ellas 10.525 GHz [1] que es la frecuencia de nuestro emisor

TABLA I. Parámetros de diseño para material de prototipo de encubrimiento.

Capa	r	s	$\mu_r = \epsilon_r$	$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$
1	0.260	1.654	0.003	0.003
2	0.254	1.667	0.023	0.023
3	0.245	1.718	0.052	0.052
4	0.230	1.771	0.085	0.085
5	0.208	1.825	0.120	0.120
6	0.190	1.886	0.154	0.154
7	0.173	1.951	0.188	0.188
8	0.148	2.027	0.220	0.220
9	0.129	2.110	0.250	0.250
10	0.116	2.199	0.279	0.279

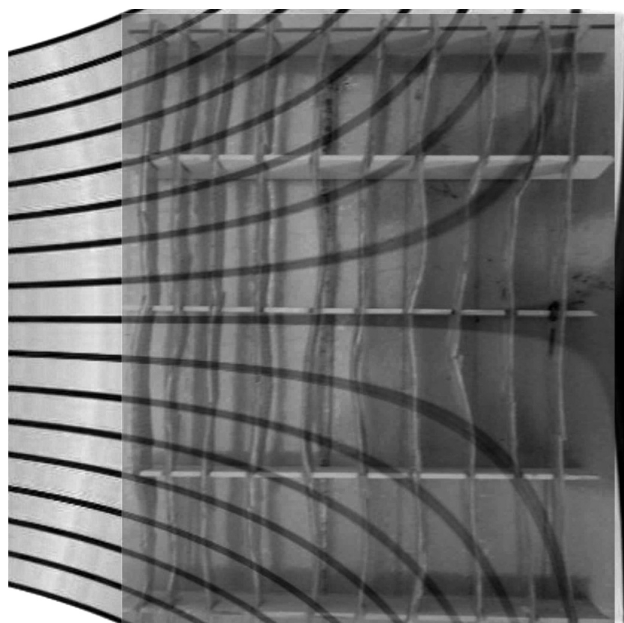


FIGURA 5. Prototipo y mapeo conformal, el prototipo está arreglado de acuerdo al diseño del mapeo, donde se marcan las capas de metamaterial con números de 1 a 10 donde el 10 tiene el mayor índice de refracción $n_{10} = 0.279$ y la capa 1 el menor índice de refracción $n_1 = 0.003$.

de microondas. El prototipo consiste en un arreglo de capas paralelas de metamaterial. La eliminación de la placa base donde el cobre está depositado se hizo mediante lijado, lo cual permite reducir los efectos de este material sobre la onda electromagnética, sin embargo, esto afectó la rigidez mecánica estructura del metamaterial haciendo difícil mantenerlo en placas perfectamente paralelas en el prototipo construido, como es posible apreciar en las Figs. 5 y 6. Se evitó añadir nuevo material base al prototipo que permitiera tener mayor dureza a las capas, al comprobar que el desempeño, dentro de nuestro margen de detección, no se vio afectado con estas irregularidades.

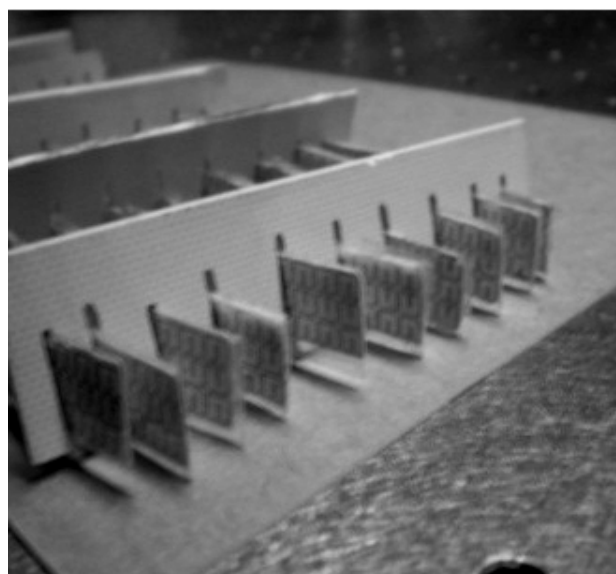


FIGURA 6. Prototipo de metamaterial para mapeo conformal de superficie plana.

Dado que el valor de la permitividad eléctrica radial ϵ_r es igual al valor de la permeabilidad magnética μ_r , ($\epsilon_r = \mu_r$) esto permite variar el índice de refracción (I.R.) en el manto, el cual siempre es menor a 1 (I.R. en el vacío) y menor al I.R. en el aire ($n = 1.033$) obtenido a partir de materiales macroscópicos con I.R. mayor a 1 (óxido de cobre $n=2.705$). En la Fig. 5 se muestra el funcionamiento de la capa de invisibilidad acoplado al esquema del mapeo conformal para pared plana mostrado en la Fig. 2b, un frente de onda incidente es guiado por el dispositivo hacia dos zonas distintas situadas en cada extremo siguiendo una trayectoria hiperbólica en las primeras capas del medio de transformación hasta llegar a ser exponencial en las capas más profundas, aunque una parte mínima es absorbida por el conjunto y por los materiales de que está compuesto el metamaterial, que también tienen efecto sobre la microonda. En la Fig. 6 se puede observar el prototipo físico construido de acuerdo al mapa conforme de pared plana y en primer plano la región donde el frente de onda sale del dispositivo y de donde se obtuvieron las lecturas que confirman la validez del modelo.

La señal del emisor en microondas tiene una potencia de 15 mW y la onda electromagnética es coherente y linealmente polarizada con $\lambda=2.85$ cm generada por un Diodo Gunn en una cavidad resonante a 10.525 GHz.

Cuando se envía un frente de onda del emisor de microondas hacia un objeto de acero que actúa como superficie especular. En las Figs. 7b (zona gris) y 8b (línea plana) se observa como la intensidad normalizada se mantiene en los valores máximos cuando el emisor y el receptor se encuentran a ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie del acero a todos los ángulos de prueba manteniéndose siempre en uno por el amplio frente de onda del emisor y a la cercanía de éste con el objeto de prueba.

Cuando se encuentra de por medio el metamaterial, como se puede observar en las Figs. 7c, 7d, 8c y 8d, éste actúa co-

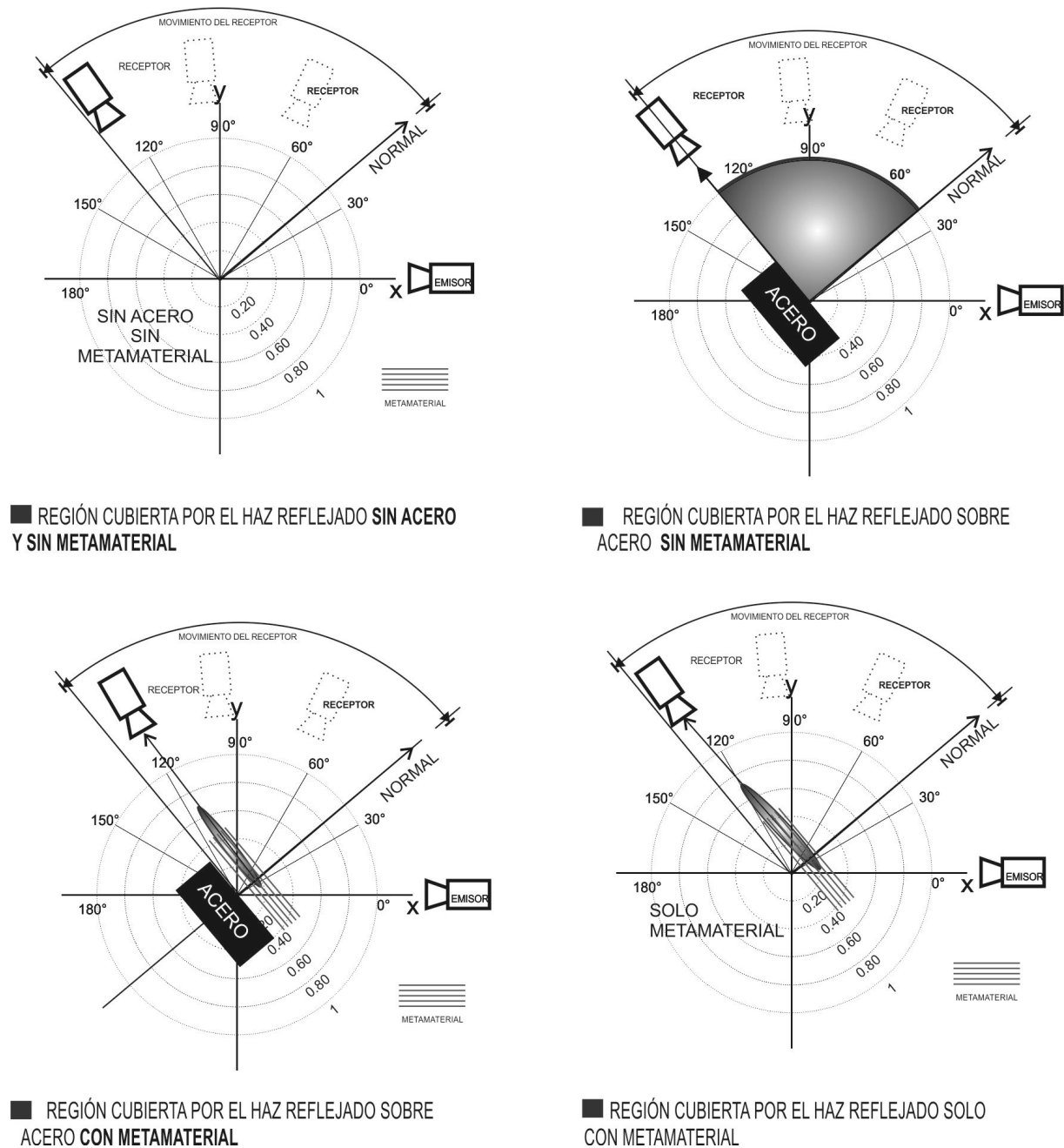


FIGURA 7. Haz reflejado sobre acero, sin y con metamaterial. Donde la intensidad del haz está normalizada y el receptor mide la intensidad al moverse en ángulo con respecto del emisor que se encuentra fijo.

mo guía de onda al confinar el frente de onda dentro de éste, de acuerdo al mapeo conformal propuesto para pared plana en la Ec. (2). Cuando el frente de onda termina de recorrer el metamaterial sale con el camino que ya seguía dentro del prototipo, estas son las lecturas obtenidas a 120 grados con acero y 125 grados cuando se coloca únicamente el metamaterial sin acero y corresponden a la intensidad normalizada de 0.64 y 0.68 respectivamente las cuales se muestran en las citadas figuras. En presencia del metamaterial la señal del emisor sigue el camino óptico de diseño y por tanto se registra una lectura de cero intensidad a los ángulos de reflexión de Snell

con respecto a la normal de la superficie del acero, el prototipo actúa evitando que la onda incidente se alcance a reflejar en el acero al tener un índice de refracción no-homogéneo y menor al índice de refracción del aire.

4. Análisis y conclusiones

Se reporta el encubrimiento de una placa de acero utilizando un metamaterial en el rango de las micro-ondas. Este material se construyó utilizando anillos resonadores para el rango de las microondas.

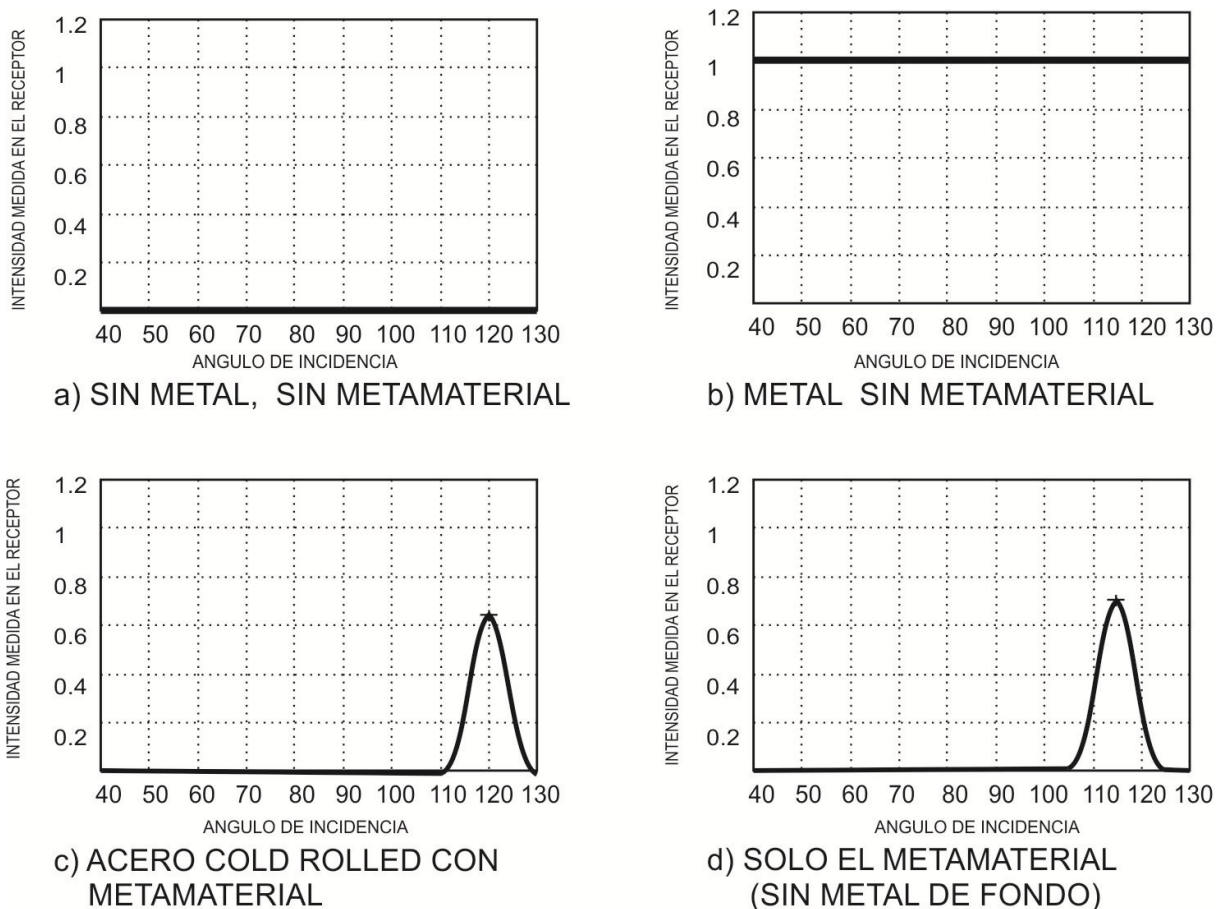


FIGURA 8. Gráfico de Intensidad del haz reflejado sobre acero, sin y con metamaterial, el ángulo de incidencia del emisor con respecto a la normal de la superficie del acero es de 40 grados.

En los resultados obtenidos experimentalmente existe una ligera diferencia de 5 grados en la salida del frente de onda del metamaterial de la radiación incidente cuando se encuentra encubriendo el acero y cuando el metamaterial se encuentra solo (Figs. 7c, 7d y 8c, 8d). Esta diferencia se debe a la cercanía del acero (material ferromagnético) con el metamaterial afectando al frente de onda dentro del prototipo y provocando que el frente de onda salga a 120 grados, este efecto debe ser considerado en un prototipo de grandes dimensio-

nes pues podría afectar la efectividad general del prototipo. Por último, deben considerarse las propiedades físicas de los materiales utilizados en la construcción del metamaterial, ya que éstos interactúan también con el frente de onda reduciendo la efectividad del manto de encubrimiento. Finalmente es importante señalar que el experimento aquí reportado no se realizó en una cámara anecoica de radiofrecuencia. Esto último limita los resultados respecto a los reportados en la Ref. 1.

1. J.B. Pendry, D. Schurig y D.R. Smith, *Science* **312** (2006) 1780.
2. D. Schurig, J.J. Mock B.J., Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr y D.R. Smith, *Science* **314** (2006) 977.
3. X. Xhang, J. Valentine, J. Li, T. Zentgraf y G. Bartal, *Nature Materials* **8** (2009) 568-571.
4. U. Leonhard, *Optical Conformal Mapping. Science* **312** (2006) 1777.
5. J. Fischer, T. Ergin, y M. Wegener, *Optics Letters* June 1 **36** (2011).
6. U. Leonhardt y T.G. Philbin, *Transformation Optics and the Geometry of Light*, (Progress in Optics June 7, 2008).
7. R. Marqués, F. Martín y M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters*, (John Wiley & Sons, Inc 2008).