

ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE CINCO BANDAS BASADO EN GEOMETRÍAS DE RANURAS CONCÉNTRICAS CON CARGAS

Rosalba Martínez López, Lourdes Martínez López
Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería
Departamento de Electrónica, División de Ingeniería Eléctrica
Ciudad Universitaria, Coyoacán C.P. 04510, Ciudad de México, México
Tel. 5556223113
e-mail: lourmart@comunidad.unam.mx

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño de un absorbedor electromagnético de cinco bandas basado en una superficie selectiva de frecuencia (SSF) compuesta por celdas unitarias de tipo ranura con geometrías concéntricas de lazo cuadrado, impresas sobre un sustrato dieléctrico y cargadas con elementos resistivos. Incorpora una placa metálica colocada detrás de la superficie para suprimir la transmisión. La estructura propuesta alcanza altas tasas de absorción del 95.9%, 98.6%, 97.4%, 99.9% y 99.9% en 7.54 GHz, 13.5 GHz, 15.8 GHz, 20.5 GHz y 21.3 GHz, respectivamente, para ondas incidentes con polarización lineal. Estos resultados demuestran el potencial del absorbedor para aplicaciones en las bandas de frecuencia C, Ku y K.

Palabras Clave: Absorbedor electromagnético, Superficies Selectivas de Frecuencia, Arreglos periódicos.

ABSTRACT

This paper presents the design of a five-band electromagnetic absorber based on a frequency-selective surface (FSS) composed of slot-type unit cells with concentric square-loop geometries, printed on a dielectric substrate and loaded with resistive elements. A metallic backplane is incorporated to suppress transmission. The proposed structure achieves high absorption rates of 95.9%, 98.6%, 97.4%, 99.9%, and 99.9% at 7.54 GHz, 13.5 GHz, 15.8 GHz, 20.5 GHz, and 21.3 GHz, respectively, for linearly polarized incident waves. These results demonstrate the absorber's potential for applications across the C, Ku, and K frequency bands.

Keywords: Electromagnetic absorber, Frequency Selective Surfaces, Periodic arrays.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, con el avance de la tecnología de detección en los sistemas de defensa y seguridad, es necesario el diseño de materiales de absorción y protección para el control y la compatibilidad de las ondas electromagnéticas. Por ello, se han desarrollado absorbedores electromagnéticos, que son dispositivos que absorben las ondas electromagnéticas incidentes en una o varias frecuencias para evitar la reflexión y la transmisión a través de ellos y tener un blindaje electromagnético para impedir la interacción de ondas no deseadas con sistemas y dispositivos cercanos. Por lo tanto, es necesario desarrollar absorbedores electromagnéticos de

microondas que cuenten con altos niveles de absorción, insensibilidad a la incidencia oblicua y que presenten características como bajo peso, estructura simple y fácil fabricación para su integración en los sistemas de comunicaciones. Los absorbedores electromagnéticos tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos debido a sus propiedades que impiden la reflexión y transmisión de las ondas incidentes, por lo que se utilizan en tecnología furtiva y de sigilo para defensa, en sistemas para reducir la sección transversal de radar (RCS), para eliminar reflexiones múltiples, reducción de la interferencia electromagnética (EMI) y mejorar la compatibilidad electromagnética (EMC). Se pueden utilizar en cámaras anecoicas, radares meteorológicos y de aviación, estructuras en aeropuertos, pantallas para aviones, proteger instalaciones aeroespaciales, vehículos no tripulados y mejorar la funcionalidad de infraestructuras de comunicación y dispositivos electrónicos.

Existen diferentes métodos y materiales utilizados para diseñar absorbedores electromagnéticos como son el diseño de metamateriales [1]-[3], metasuperficies [4], el empleo de espumas o polímeros de carbono [5], superficies de alta impedancia (HIS) [6]-[8], Superficies Selectivas de Frecuencia (SSF) [9]-[20], entre otros.

Los absorbedores electromagnéticos basados en SSF ofrecen diversas ventajas debido a su bajo perfil y versatilidad, permitiendo la obtención de estructuras con operación en un amplio intervalo o con alta selectividad, también presentan buena estabilidad angular e insensibilidad a la polarización.

Las SSF son arreglos periódicos de elementos resonantes de parches impresos en un sustrato dieléctrico o ranuras en una pantalla metálica que presentan un comportamiento de filtro espacial con respuesta paso banda o rechazo de banda. Una superficie selectiva de frecuencia puede utilizarse para el diseño de absorbedores electromagnéticos que permitan la absorción de ondas en frecuencias específicas. Se han utilizado diferentes técnicas como es el uso de resistencias agrupadas cargadas en los elementos de las SSF o resonantes hechos de materiales resistivos para introducir pérdidas óhmicas en la superficie, también el uso de diversos materiales y sustratos dieléctricos con altas pérdidas, en las que se tenga un valor alto de la tangente de

En este trabajo, se propone el uso de SSF para el diseño de un absorbedor electromagnético de cinco bandas basado en celdas unitarias de ranuras impresas en un sustrato dieléctrico con geometrías concéntricas de lazo cuadrado con cargas resistivas y una pantalla metálica detrás de la estructura, la cual permite la absorción de la onda incidente, evitando la reflexión y la transmisión en cinco bandas de frecuencia para aplicaciones en banda C, Ku y K.

2.1. Diseño de la geometría de la celda unitaria

Diagrama de un resonador de onda en un tubo rectangular. El tubo tiene anchura b y altura h . El interior está dividido en una zona central de cobre (verde) y una zona exterior de dieléctrico (azul). El cobre forma una malla con segmentos horizontales de longitud L_1 , L_2 , L_3 y L_4 , y segmentos verticales de longitud a_1 y a_2 . Hay un radio de curvatura R_L en las esquinas de la malla de cobre. Las flechas indican la dirección de propagación de la onda.

En la Figura 2, se muestra el arreglo periódico con la unión de las celdas unitarias.

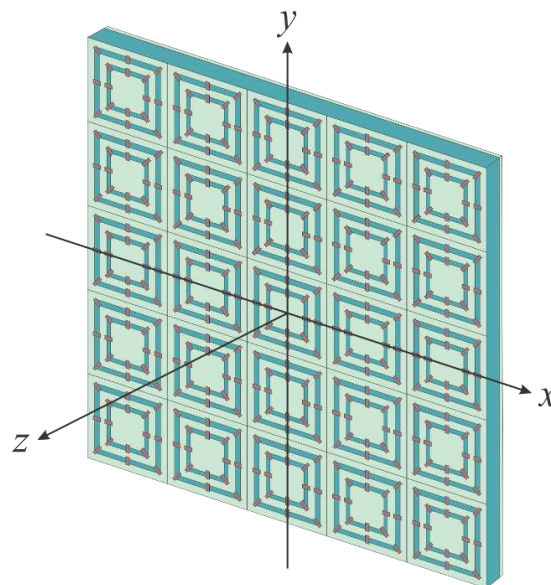


Figura 2. Arreglo periódico de celdas unitarias.

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2, \quad (1)$$
$$A = 1 - |S_{11}|^2. \quad (2)$$

Tabla 1. Dimensiones de la geometría de la celda unitaria del absorbedor electromagnético.

Celda unitaria	b [mm]	h [mm]	R_L [Ω]
	6.5	1.27	2000
Lazo cuadrado externo	L_1 [mm]	L_2 [mm]	a_1 [mm]
	5.4	4.6	0.4
Lazo cuadrado interno	L_3 [mm]	L_4 [mm]	a_2 [mm]
	3.4	2.8	0.3

2.2. Respuesta en frecuencia

En las Figuras 3 y 4 se muestran los coeficientes de reflexión y de absorción expresado en porcentaje para diferentes valores de resistencia de carga R_L y obtener el valor con el que se presentan mayores pérdidas.

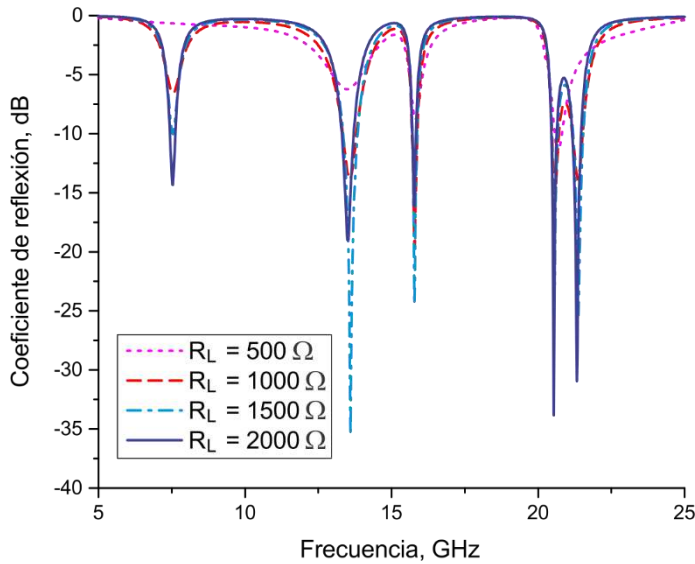


Figura 3. Coeficiente de reflexión para diferentes valores de resistencia de carga.

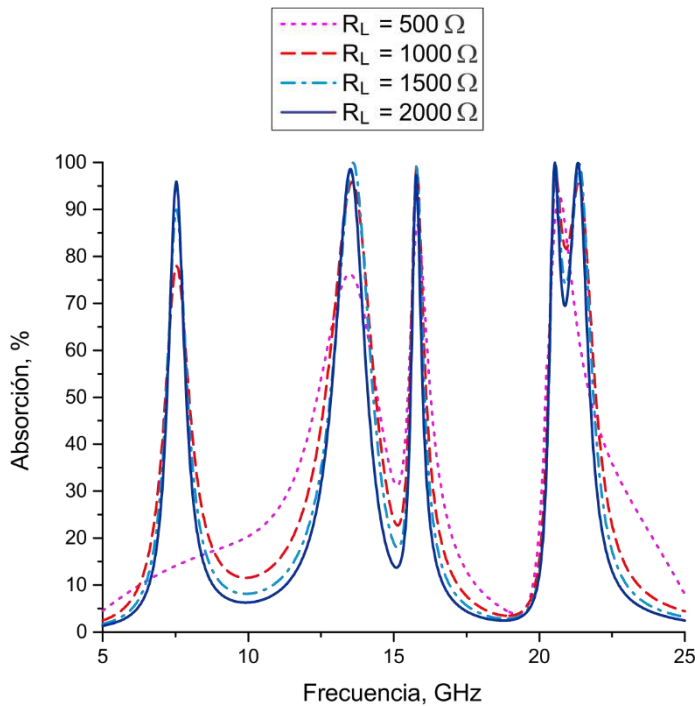


Figura 4. Coeficiente de absorción para diferentes valores de resistencia de carga.

Se observa el mejor resultado con un valor de 2000Ω para todas las resistencias de carga, logrando la optimización de la respuesta en frecuencia del absorbente electromagnético con incidencia normal. En la Figura 5 se muestra el coeficiente de reflexión teniendo cinco bandas de frecuencia medidas a partir de -10 dB. El coeficiente de absorción se presenta en la Figura 6, en el que se obtienen las cinco bandas con absorción mayor al 90%. En la Tabla 2 se muestra las frecuencias y los valores simulados para los coeficientes de reflexión y de absorción de cada una de las bandas.

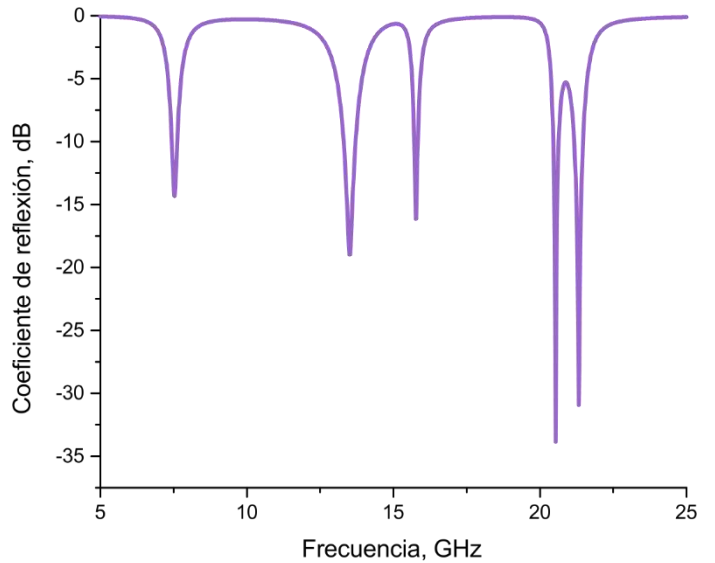


Figura 5. Magnitud del coeficiente de reflexión del absorbente electromagnético.

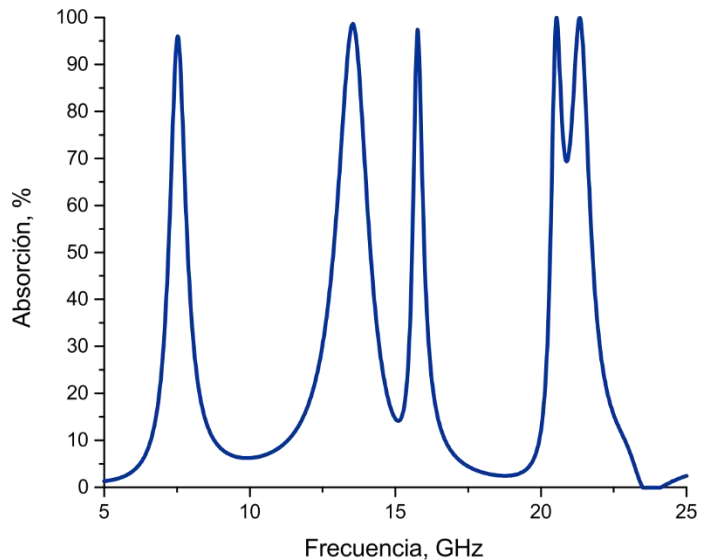


Figura 6. Coeficiente de absorción del absorbente electromagnético.

Tabla 2. Resultados simulados de los coeficientes de reflexión y de absorción del absorbedor electromagnético.

Número de Bandas	Frecuencia [GHz]	$ S_{11} $ [dB]	Absorción [%]
1	7.54	-14.3	95.9
2	13.5	-19.0	98.6
3	15.8	-16.1	97.4
4	20.5	-33.8	99.9
5	21.3	-30.9	99.9

Para el caso de incidencia normal que corresponde a 0° , la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión y de absorción es la misma para ambas polarizaciones, la polarización y (vertical) y para la polarización x (horizontal), no se presentan cambios, por lo que los resultados son iguales.

2.3. Incidencia oblicua

Un parámetro importante es el análisis de la estabilidad del absorbedor electromagnético ante diferentes ángulos de incidencia θ_{inc} de la onda electromagnética de polarización lineal, por lo que se realizó simulaciones para diferentes ángulos con el objetivo de conocer la sensibilidad de la superficie a la incidencia oblicua. Cuando se tiene variación en el ángulo incidente se presentan cambios en la respuesta en frecuencia para los coeficientes de reflexión y de absorción de las dos polarizaciones, vertical y horizontal, por lo que es importante presentar los resultados obtenidos para realizar su análisis. En las Figuras 7 y 8 se muestran los coeficientes de reflexión y de absorción del absorbedor electromagnético con ángulos desde 0° a 40° correspondientes a la polarización y, asimismo en las Figuras 9 y 10 se presenta los coeficientes de reflexión y de absorción para la polarización x con la misma variación en ángulos.

Se observa que la respuesta del absorbedor electromagnético para la polarización y, es muy estable en el intervalo de frecuencias de 5 GHz a 18 GHz para los coeficientes de reflexión y de absorción en las tres primeras bandas, mientras que para las frecuencias de 18 GHz a 25 GHz se presentan algunos cambios en las últimas dos bandas, pero se tiene un comportamiento aceptable hasta un ángulo de 40° presentándose las cinco bandas de frecuencia y una banda adicional que va incrementando su nivel de absorción al aumentar el ángulo. Para la polarización x, el absorbedor electromagnético es estable en las frecuencias con intervalo de 5 GHz a 15 GHz para los coeficientes de reflexión y de absorción hasta un ángulo de incidencia de 40° , para esta polarización se observa que se tiene un mayor cambio en las frecuencias altas de 15 GHz a 25 GHz, de igual manera se obtiene un buen comportamiento puesto que se obtienen las cinco bandas y se presenta una banda más con porcentaje de absorción mayor al 80%. Se realizó simulaciones con ángulos mayores a 40° , pero se disminuye la absorción de las bandas de

frecuencia, por lo que el absorbedor electromagnético se comporta adecuadamente desde 0° hasta 40° .

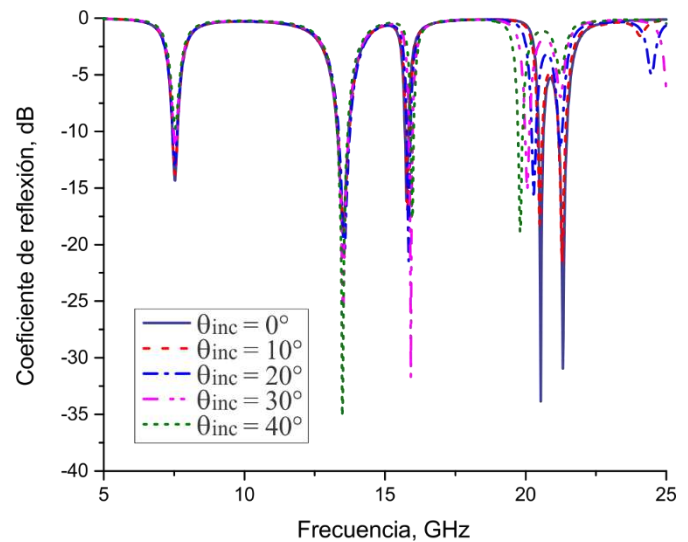


Figura 7. Magnitud del coeficiente de reflexión del absorbedor electromagnético para la polarización y.

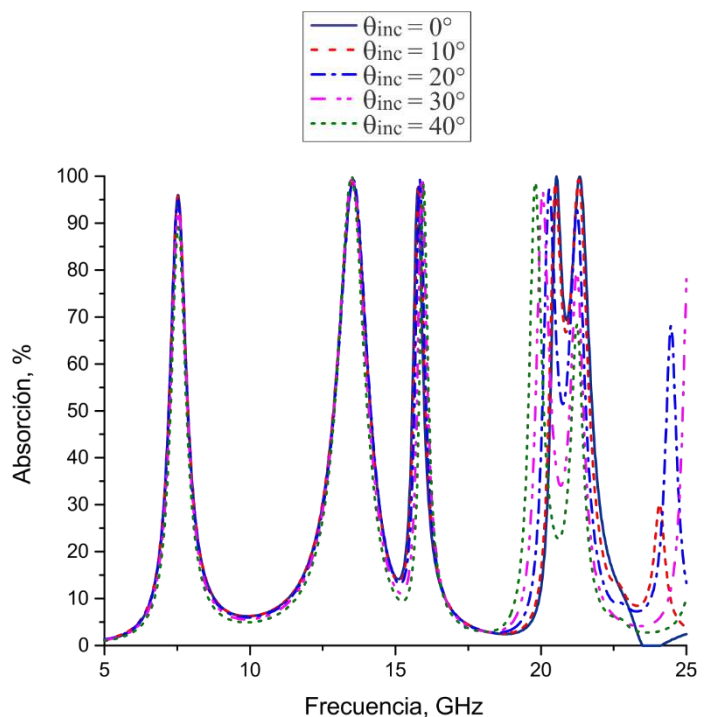


Figura 8. Coeficiente de absorción del absorbedor electromagnético para la polarización y.

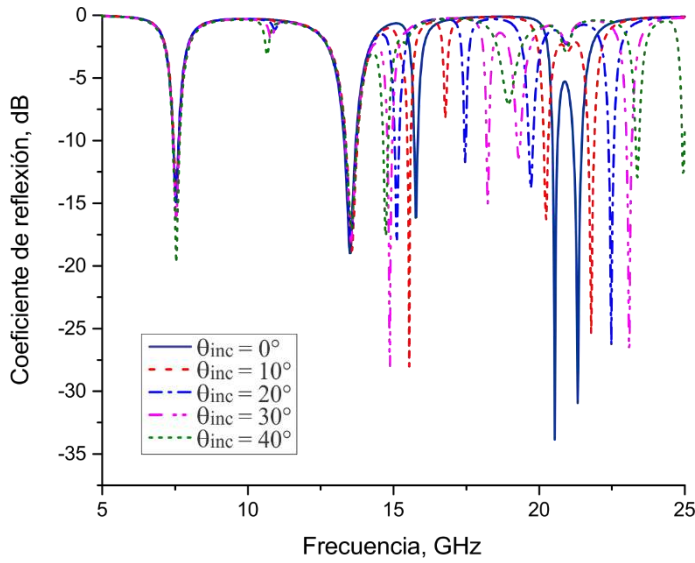


Figura 9. Magnitud del coeficiente de reflexión del absorbador electromagnético para la polarización x.

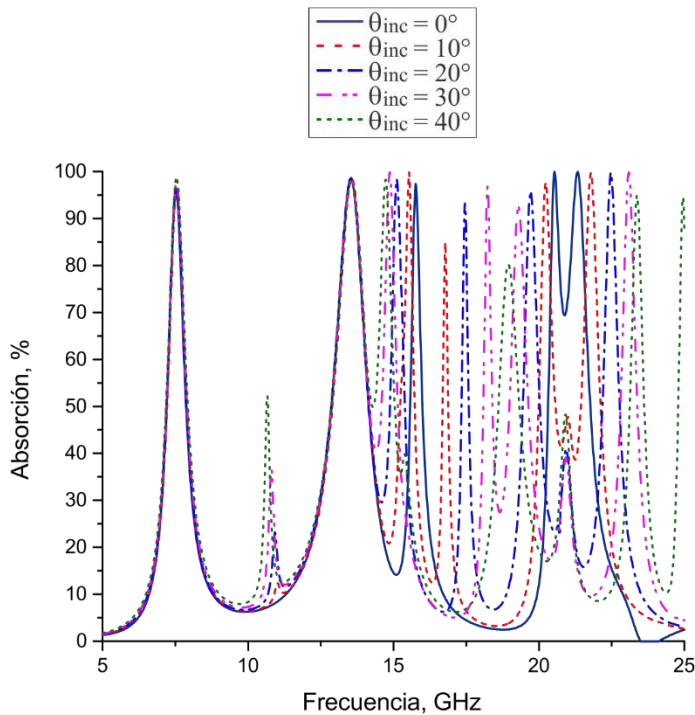


Figura 10. Coeficiente de absorción del absorbador electromagnético para la polarización x.

En las Tablas 3 y 4, se presentan el número de bandas, los valores de las frecuencias y los coeficientes de reflexión y de absorción para los ángulos de incidencia de 10° a 40° correspondientes a la polarización vertical (y) y horizontal (x).

Tabla 3. Valores simulados para la polarización y.

θ_{inc}	Número de Bandas	Frecuencia [GHz]	$ S_{11} $ [dB]	Absorción [%]
10°	1	7.54	-13.8	95.8
	2	13.5	-19.0	98.6
	3	15.8	-17.0	98.0
	4	20.5	-18.2	98.5
	5	21.3	-21.5	99.3
20°	1	7.52	-12.9	94.8
	2	13.6	-21.1	99.2
	3	15.8	-21.4	99.3
	4	20.3	-15.6	97.2
	5	21.2	-11.5	92.8
30°	1	7.54	-11.4	92.8
	2	13.5	-25.3	99.7
	3	15.9	-31.7	99.9
	4	20.1	-15.3	97.0
	5	21.2	-7.0	79.8
40°	1	7.54	-9.75	89.2
	2	13.5	-35.1	100
	3	16.0	-17.7	98.3
	4	19.8	-18.9	98.7
	5	21.2	-5.01	68.4

Tabla 4. Valores simulados para la polarización x.

θ_{inc}	Número de Bandas	Frecuencia [GHz]	$ S_{11} $ [dB]	Absorción [%]
10°	1	7.54	-14.6	96.4
	2	13.6	-18.8	98.5
	3	15.5	-28.0	99.8
	4	16.8	-8.21	84.9
	5	20.2	-16.3	97.6
	6	21.8	-25.3	99.7
20°	1	7.52	-14.9	96.7
	2	13.5	-18.1	98.4
	3	15.1	-17.9	98.4
	4	17.5	-11.7	93.2
	5	19.7	-13.8	95.8
	6	22.5	-26.3	99.8
30°	1	7.54	-16.6	97.8
	2	13.5	-18.0	98.4
	3	14.9	-28.0	99.8
	4	18.2	-15.1	96.9
	5	19.3	-11.4	92.7
	6	23.1	-26.5	99.8
40°	1	7.54	-19.7	98.9
	2	13.6	-17.1	98.0
	3	14.7	-17.6	98.2
	4	18.9	-7.03	80.1
	5	23.4	-12.9	94.9
	6	24.9	-12.6	94.4

2.4. Escalabilidad del diseño

Un punto importante es la escalabilidad del diseño del absorbedor electromagnético propuesto, ya que permite operar a otras bandas de interés. Al aumentar y disminuir las dimensiones originales mostradas en la Tabla 1 en un factor de escala de 1.5 y 0.5, manteniendo el mismo valor de resistencias, se tiene operación también en las bandas X, Ka y U. En las Figuras 11, 12, 13 y 14 se muestran los coeficientes de reflexión y de absorción para cada factor de escala.

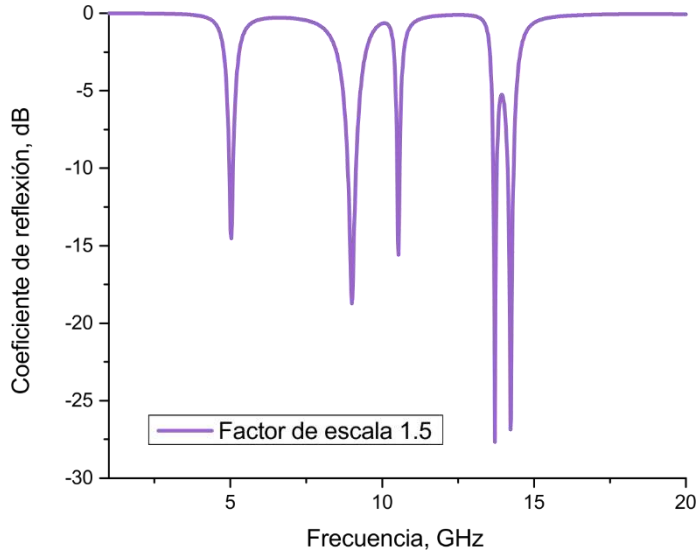


Figura 11. Magnitud del coeficiente de reflexión del absorbedor electromagnético para un factor de escala de 1.5.

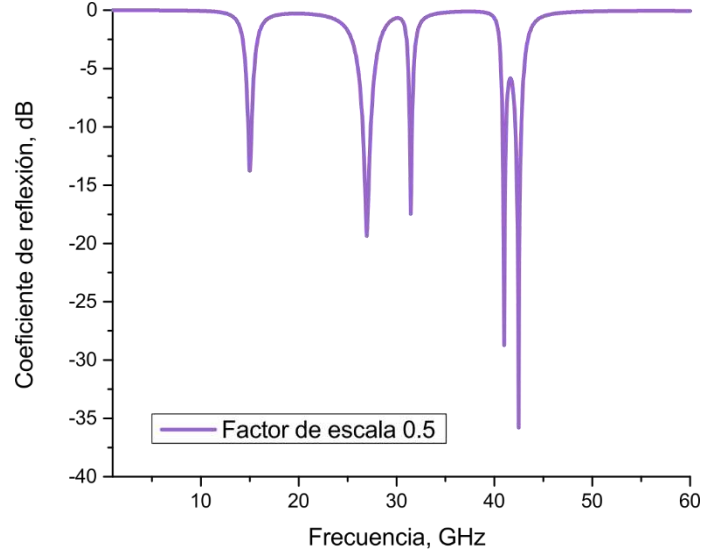


Figura 13. Magnitud del coeficiente de reflexión del absorbedor electromagnético para un factor de escala de 0.5.

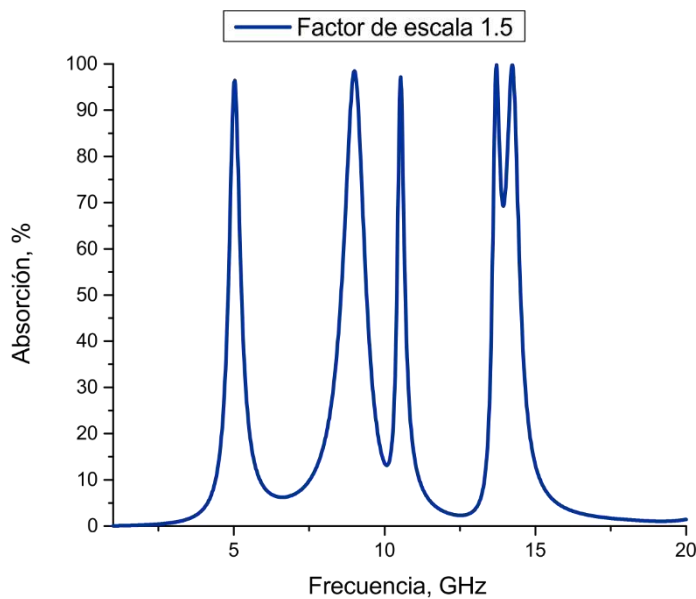


Figura 12. Coeficiente de absorción del absorbedor electromagnético para un factor de escala de 1.5.

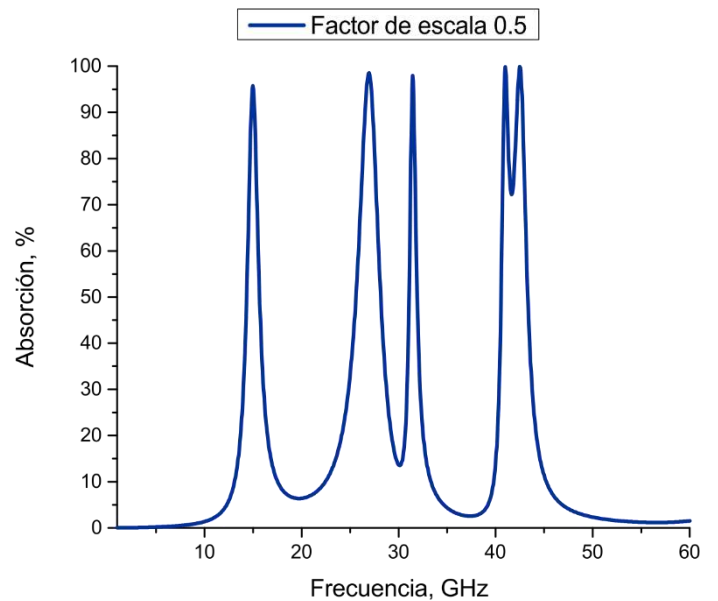


Figura 14. Coeficiente de absorción del absorbedor electromagnético para un factor de escala de 0.5.

Asimismo, al disminuir las dimensiones originales del absorbedor electromagnético en un factor de escala de 0.5 se obtienen valores de magnitud del coeficiente de reflexión $|S_{11}|$ de -13.8 dB, -19.4 dB, -17.5 dB, -28.7 dB, -35.8 dB y se tiene niveles de absorción de 95.7%, 98.5%, 98.0%, 99.8% y 99.9% en las frecuencias de 15.0 GHz, 27.0 GHz, 31.4 GHz, 41.0 GHz y 42.5 GHz, respectivamente, con operación en las bandas Ku, Ka y U.

Para mejorar el desempeño del absorbedor electromagnético propuesto se puede miniaturizar la celda unitaria de la superficie selectiva de frecuencia para aumentar la estabilidad ante la incidencia oblicua.

2.5. Plan de fabricación del prototipo

Con el objetivo de comprobar los resultados simulados obtenidos, se propone el plan de fabricación de un prototipo de dimensiones medias de 16×16 celdas unitarias de 6.5 mm cada celda con un total de 256 elementos, utilizando un proceso fotolitográfico con tolerancias de 50 μm , para llevar a cabo la medición en espacio libre con incidencia normal y para diferentes ángulos de incidencia. Los elementos se sitúan en los nodos de una malla cuadrada y estarán impresos en un sustrato dieléctrico de microondas Rogers RO3210 con un espesor de 1.27 mm, permitividad relativa ϵ_r de 10.8 y tangente de pérdidas $\tan \delta$ de 0.0027, el sustrato cuenta con un espesor del cobre de 17.5 μm . Para evitar la transmisión de la onda electromagnética, detrás de la superficie se colocará una pantalla metálica de cobre con un espesor de 35 μm . En cada una de las dos ranuras de lazo cuadrado concéntricas de la celda unitaria se conectarán ocho resistencias de película delgada de montaje superficial (SMD) con valores de 2000 Ω , por lo que en cada celda unitaria se conectarán dieciséis resistencias, obteniéndose un total de 4,096 resistencias en toda la superficie, se buscará el mejor método para la adecuada conexión de los componentes.

Para dar soporte y alineación a la superficie selectiva de frecuencia, se utilizará un marco de plexiglás con dimensiones de 11×11 cm y espesor de 2.5 mm, así como también para evitar las reflexiones no deseadas, se utilizará material absorbente de microondas colocado alrededor de la superficie y para enfocar a una determinada distancia la onda electromagnética incidente y reflejada, se usarán dos lentes dieléctricos de teflón con material absorbente alrededor de cada lente.

El absorbedor electromagnético contará con un mecanismo de rotación para proporcionar el giro necesario permitiendo así colocar los diferentes ángulos de incidencia.

Se utilizará dos antenas de banda ancha una transmisora y otra receptora, las cuales estarán conectadas a un Analizador de Redes Vectoriales (VNA), para obtener la respuesta en frecuencia del absorbedor electromagnético con la medición de la magnitud del coeficiente de reflexión $|S_{11}|$, así como también el coeficiente de absorción para una onda plana de polarización lineal en las direcciones y (vertical) y x (horizontal) para incidencia normal y con diferentes ángulos de incidencia.

2.6. Resultados

Se realizó el diseño de un absorbedor electromagnético basado en una superficie selectiva de frecuencia con la optimización de la celda unitaria para tener cinco bandas de absorción en cinco diferentes frecuencias. La celda unitaria está compuesta por dos ranuras concéntricas de geometría de lazo cuadrado cargadas cada una con ocho resistencias de igual valor. Las ranuras son impresas en un sustrato dieléctrico de microondas de alta permitividad relativa y se coloca una pantalla metálica detrás de la superficie. La simulación electromagnética de la celda unitaria a partir del método de onda completa permite la obtención de los coeficientes de reflexión y de absorción del absorbedor electromagnético diseñado. Se observa una buena estabilidad a la incidencia oblicua presentándose un buen desempeño hasta un ángulo de 40° de la onda electromagnética incidente. Se cuenta con un plan de fabricación del prototipo para realizar la comprobación experimental de los resultados simulados. Es posible escalar el diseño aumentando o disminuyendo las dimensiones originales en un factor de escala de 1.5 y 0.5 con el mismo valor de resistencias para tener aplicaciones en otras bandas de interés.

El desempeño del absorbedor electromagnético propuesto puede mejorarse al miniaturizar la celda unitaria de la superficie selectiva de frecuencia con el objetivo de tener una mayor estabilidad ante la variación del ángulo de incidencia de la onda electromagnética.

2.7. Conclusiones

Se presenta el diseño de un absorbedor electromagnético utilizando una superficie selectiva de frecuencia formada por celdas unitarias compuestas por geometrías de dos ranuras concéntricas de lazo cuadrado con cargas resistivas, estas ranuras están impresas en un sustrato dieléctrico de microondas ubicadas en los nodos de una malla cuadrada, se coloca una pantalla metálica detrás de la superficie. Los resultados simulados del método de onda completa muestran la obtención de cinco bandas con altas tasas de absorción del 95.9%, 98.6%, 97.4%, 99.9% y 99.9%, en frecuencias de 7.54 GHz, 13.5 GHz, 15.8 GHz, 20.5 GHz y 21.3 GHz, respectivamente.

El diseño del absorbedor electromagnético presenta buena estabilidad cuando se incide ondas electromagnéticas con diferentes ángulos presentándose un buen resultado hasta un ángulo de incidencia de 40° . Se tiene un plan de fabricación del prototipo para realizar la verificación experimental y comprobar los resultados simulados. El absorbedor electromagnético propuesto puede tener diferentes aplicaciones en las bandas C, Ku y K, asimismo al escalar las dimensiones originales en un factor de escala de 1.5, manteniendo el mismo valor de resistencias, se obtiene niveles de absorción de 96.4%, 98.5%, 97.2%, 99.8% y 99.7% en las frecuencias de 5.0 GHz, 9.0 GHz, 10.5 GHz, 13.7 GHz y 14.2 GHz, respectivamente, teniendo aplicación en las bandas C, X y Ku. Al escalar ahora las dimensiones originales en un factor de escala de 0.5 se tiene niveles de absorción de 95.7%, 98.5%, 98.0%, 99.8% y 99.9%

en las frecuencias de 15.0 GHz, 27.0 GHz, 31.4 GHz, 41.0 GHz y 42.5 GHz, respectivamente, teniendo aplicación en las bandas Ku, Ka y U. El absorbedor electromagnético puede mejorar su desempeño al miniaturizar la celda unitaria para tener mayor estabilidad ante la incidencia oblicua.

2.8. Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo obtenido de la Cátedra Especial Odón de Buen Lozano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, con el proyecto de investigación desarrollado.

2.9. Referencias

- [1] X. Lei, Y. Li, S. Huo, Z. Sun, H. Yu, L. Fang, S. Xu, B. Li, M. Wang, and E. Li, "Design and Analysis of a Novel Compact Metamaterial Absorber Based on Double-Layer ITO Resistive Film for Improving Signal Integrity," *IEEE Access*, vol. 10, Feb. 2022, pp. 24067-24079.
- [2] P. Routray, and D. Ghosh, "Design and Modeling of a Miniaturized Multilayer Metamaterial Absorber With Oblique Angle and Polarization Insensitivity," *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, vol. 6, no. 1, Mar. 2024, pp. 29-34.
- [3] Y. Li, Y. Wu, D. Li, M. Zhu, Y. Qiu, G. Yu, and E. Li, "A Miniaturized Perfect Metamaterial Absorber for EMI Radiation Suppression," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 66, no. 3, Jun. 2024, pp. 776-786.
- [4] D. Lim and S. Lim, "Ultrawideband Electromagnetic Absorber Using Sandwiched Broadband Metasurfaces," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 9, Sep. 2019, pp. 1887-1891.
- [5] A. El Assal, H. Breiss, R. Benzerger, A. Sharaiha, A. Harmouch and A. Jrad, "Electromagnetic multilayer absorber made of carbon fibers loaded epoxy foam," *Antennas and Propagation Conference 2019 (APC-2019)*, 11-12 Nov. 2019, Birmingham, UK.
- [6] J. Chen, Z. Hu, G. Wang, X. Huang, S. Wang, X. Hu, and M. Liu, "High-Impedance Surface-Based Broadband Absorbers With Interference Theory," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, Oct. 2015, pp. 4367- 4374.
- [7] M. W. B. Silva and A. L. P. S. Campos, "Thin Electromagnetic Absorber Design Using HIS Approach," *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 03-06 Nov. 2015, Porto de Galinhas, Brazil.
- [8] K. Qi, H. Wan, Y. Zhao, Y. Wang, and X. Wei, "A Radar Absorber Based on High Impedance Surface for Ultrahigh Frequency Applications," *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 26-28 Mar. 2018, Chengdu, China.
- [9] F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, "Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 5, May 2010, pp. 1551-1558.
- [10] L. Zhang, P. Zhou, H. Zhang, L. Lu, G. Zhang, H. Chen, H. Lu, J. Xie, and L. Deng, "A Broadband Radar Absorber Based on Perforated Magnetic Polymer Composites Embedded With FSS," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 5, May 2014, pp. 4004305.
- [11] J. Lee, M. Yoo, and S. Lim, "A Study of Ultra-Thin Single Layer Frequency Selective Surface Microwave Absorbers With Three Different Bandwidths Using Double Resonance," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 1, Jan. 2015, pp. 221-230.
- [12] D. Kundu, A. Mohan, and A. Chakrabarty, "Design of a Conductive FSS based Ultrathin Absorber Using Impedance Analysis Method of Equivalent Circuit Model," *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, 16-19 Dec. 2018, Hyderabad, India.
- [13] P. Mei, S. Zhang, X. Qi Lin, and G. F. Pedersen, "A Triple-Band Absorber With Wide Absorption Bandwidths Using an Impedance Matching Theory," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 3, Mar. 2019, pp. 521-525.
- [14] G. Goncalves Machado, R. Cahill, V. Fusco, G. Conway, "Comparison of FSS Topologies for Maximising the Bandwidth of Ultra-Thin Microwave Absorbers," *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 31 Mar. 2019 - 05 Apr. 2019, Krakow, Poland.
- [15] A. K. Singh, M. P. Abegaonkar, and S. K. Koul, "Dual- and Triple-Band Polarization Insensitive Ultrathin Conformal Metamaterial Absorbers With Wide Angular Stability," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 61, no. 3, Jun. 2019, pp. 878-886.
- [16] Y. He, W. Feng, S. Guo, J. Wei, Y. Zhang, Z. Huang, C. Li, L. Miao, and J. Jiang, "Design of a Dual-Band Electromagnetic Absorber With Frequency Selective Surfaces," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 5, May 2020, pp. 841-845.
- [17] S. Sambhav, J. Ghosh, and A. K. Singh, "Ultra-Wideband Polarization Insensitive Thin Absorber Based on Resistive Concentric Circular Rings," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 5, Oct. 2021, pp. 1333-1340.
- [18] N. Karoti and H. S. Sonalikar, "Design of a Low Profile Wideband Absorber Using Resistively Loaded Cross Dipole and Modified Square Loop," *2021 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, 13-16 Dec. 2021 Jaipur, Rajasthan, India.
- [19] L. Zheng, X. Yang, W. Gong, M. Qiao, and X. Li, "Ultralow Thickness-Bandwidth Ratio Magnetic Absorber With Printed FSS for S&C Bands," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 21, no. 3, Mar. 2022, pp. 576-580.
- [20] A. Kumar, G. S. Reddy, and J. Padhi, "Highly Angular-Stable Optically Transparent Microwave Absorber With Wide Absorption Bandwidth," *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, vol. 4, no. 4, Dec. 2022, pp. 114-119.