



Ancho de banda en superficies selectivas en frecuencia. Elemento resonante del tipo lazo cuadrado

Bandwidth in Frequency Selective Surfaces. Square Loop Shape Resonant Element

Mario Alberto Rodríguez Barrera¹ Walter Pereira Carpes Jr.²

Para citar este artículo: M. A. Rodríguez y W. P. Carpes, "Ancho de banda en superficies selectivas en frecuencia. Elemento resonante del tipo lazo cuadrado". *Revista Vínculos*, vol 15, no 1, enero-junio 2018, 6-13. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.13339>.

Recibido: 13-01-2018 / **Aprobado:** 18-03-2018

Resumen

La ausencia de formulaciones que permitan evaluar el efecto de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico para la determinación del ancho de banda en superficies selectivas en frecuencia (SSF), hace que la evaluación de sus efectos se realice a través de análisis de tipo paramétrico. El objetivo de este tipo de análisis es determinar la influencia en el ancho de banda de un parámetro en particular, bien sea asociado al soporte dieléctrico o a los parámetros geométricos de la superficie selectiva, con la finalidad de orientar el proceso de diseño de la superficie; en este sentido, a lo largo del texto se presentan los resultados de un análisis basado en una novedosa formulación para la determinación del ancho de banda en SSF tipo lazo cuadrado, el cual tiene en cuenta los efectos de las variables geométricas y las asociadas al material dieléctrico, usando como herramienta de análisis, el modelo de circuito equivalente (MCE). Este tipo de enfoque hace innecesario, por lo tanto, el uso de análisis de tipo paramétrico, basado en *software* electromagnético, para la evaluación de los efectos mencionados en el ancho de banda. Respecto a la

formulación propuesta, el dieléctrico es considerado como parámetro concentrado, por lo tanto, es aplicable únicamente a dieléctricos delgados. Cabe resaltar la exactitud aceptable obtenida con el enfoque propuesto comparado con simulaciones implementadas en un software basado en el método de los elementos finitos (MEF).

Palabras clave: ancho de banda, lazo cuadrado, permitividad efectiva, superficies selectivas en frecuencia.

Abstract

Formulations that enable the assessment of the effects of parameters both geometrical and associated to the dielectric on the determination of the bandwidth in Frequency Selective Surfaces (FSS) are scarce. This forces the assessment of the aforementioned effects through parametric analysis. The aim of this type of analysis is to determine the influence on the bandwidth of a particular parameter, either in association to the dielectric support or to geometrical parameters of the selective surface. This analysis is made in order to guide the design process of the surface. The article

1. Ingeniero electricista; magíster en Ingeniería Eléctrica; doctor en Ingeniería Eléctrica, Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: marodriguezba4@gmail.com
2. Ingeniero electricista; magíster en Ingeniería Eléctrica; doctor en Ingeniería Eléctrica, Docente Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil. Correo electrónico: walterpcjr@gmail.com

presents the results of an analysis based on a novel formulation to determinate the bandwidth in square loop FSS considering the effects of the geometrical variables and those associated to dielectric material, using as a method of analysis, the Equivalent Circuit Model (ECM). Therefore, this approach makes unnecessary the use of parametric analysis, based on electromagnetic software, for the assessment of the aforementioned effects on the bandwidth. For the proposed formulation, the dielectric is considered as a lumped parameter, making it suitable only for thin dielectrics. It is important to highlight the acceptable accuracy obtained with the proposed approach in comparison with the simulations implemented in software based on the Finite Element Method (FEM).

Keywords: bandwidth, dielectric effective permittivity, frequency selective surfaces, square loop.

1. Introducción

Las superficies selectivas en frecuencia (SSF) son dispositivos electromagnéticos que permiten controlar la propagación de radiación electromagnética en relación con la radiación incidente sobre ellas, esta característica permite su uso extensivo en áreas como la industrial, militar y científica y en un rango en el espectro electromagnético que se extiende desde las microondas hasta el infrarrojo [1].

Están constituidas por elementos metálicos o por ranuras en superficies metálicas, las cuales forman un patrón periódico en una superficie bidimensional. De acuerdo con esta característica constructiva, es posible obtener diferentes tipos de respuesta en frecuencia de la superficie selectiva, lo cual permite a su vez clasificarlas como pasa altos, pasa bajos, pasa banda y rechaza banda [2]. Métodos numéricos de análisis electromagnético como el método de los elementos finitos (MEF) y el método de los momentos (MoM) son usados para determinar la respuesta en frecuencia de la superficie selectiva; sin embargo, su principal desventaja es el alto costo computacional involucrado [3], [4]. En consecuencia, el MCE surgió como una alternativa de análisis hace aproximadamente 50 años [5] dado su bajo costo computacional,

acompañado de una exactitud aceptable comparado con los métodos referenciados [6], [7]; por otro lado, la modelización de los efectos del dieléctrico, que sirve de soporte para los elementos en las SSF, son su principal desventaja [8]. En [9] se evidencian los efectos de los soportes dieléctricos en cuanto a la frecuencia de resonancia y el ancho de banda en SSF, también trabajos recientes como [10], [11], [12], muestran avances significativos en la modelización del dieléctrico en el MCE para la superficie selectiva en frecuencia tipo lazo cuadrado.

Son varios los factores que permiten evaluar el desempeño de las SSF, entre estos se tiene la sensibilidad de su respuesta en frecuencia a la polarización y al ángulo de la radiación electromagnética incidente, así como el inicio de la propagación de los armónicos de orden superior y el ancho de banda [3].

La ausencia de formulaciones teóricas que permitan evaluar el efecto de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico para la determinación del ancho de banda en superficies selectiva en frecuencia (SSF), hace que la evaluación de sus efectos se realice a través de análisis de tipo paramétrico [13], [14], [15], [16]. En este tipo de análisis se evalúa el efecto de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico, en la frecuencia de resonancia y el ancho de banda, a través de los resultados de procesos de simulación electromagnética. El procedimiento utilizado en forma general consiste en establecer, inicialmente, rangos de variación en los parámetros geométricos o los asociados al dieléctrico; seguidamente, para la evaluación del efecto de uno de los parámetros, se fijan los parámetros restantes y se varía el parámetro en cuestión en el rango establecido. Cabe mencionar también, que procesos de simulación electromagnética implementados en *software* especializado permiten encontrar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda para cada valor establecido en el rango especificado. Finalmente, curvas de tendencia permiten evaluar el efecto del parámetro en cuestión.

El efecto de los parámetros asociados al dieléctrico, es decir, la permitividad relativa del soporte dieléctrico y su espesor en el ancho de banda de

la superficie selectiva, son considerados en [12]. En este artículo, usando las formulaciones propuestas en [12], se determinan los efectos de las variables geométricas, en el ancho de banda de la superficie selectiva en frecuencia tipo lazo cuadrado.

2. Metodología

2.1 Modelo de circuito equivalente

La Figura 1 muestra los parámetros geométricos asociados y el circuito equivalente usado para el análisis electromagnético de la superficie selectiva tipo lazo cuadrado.

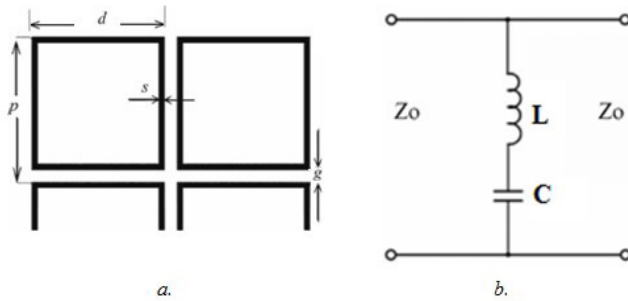


Figura 1. (a) Parámetros geométricos; (b) circuito equivalente superficie selectiva en frecuencia tipo lazo cuadrado.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 1b, Z_0 corresponde a la impedancia característica del espacio libre; adicionalmente, L y C corresponden a la inductancia y la capacitancia de la superficie selectiva en frecuencia. A partir del circuito equivalente mostrado en la Figura 1b, la magnitud del coeficiente de transmisión $|T|$ está definido por:

$$|T| = \frac{2}{\sqrt{4 + |Y_{FSSn}|^2}} \quad (1)$$

Donde Y_{FSSn} corresponde a la admitancia normalizada de la superficie selectiva, la cual es definida como:

$$Y_{FSSn} = \frac{Y_{SSF}}{Y_0} = \frac{1}{j\left(X - \frac{1}{B}\right)} \quad (2)$$

En la ecuación (2), Y_{SSF} corresponde a la admitancia normalizada de la superficie selectiva, Y_0 es la admitancia característica del espacio libre, X y B corresponden a la reactancia inductiva y la susceptancia capacitiva normalizadas de la superficie selectiva, que son definidas como:

$$X = \frac{\omega L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, 2s, \lambda) \quad (3)$$

$$B = \frac{\omega C \epsilon_{eff}}{Y_0} = \frac{4d \epsilon_{eff}}{p} F(p, g, \lambda), \quad (4)$$

En las ecuaciones (3) y (4), λ es longitud de onda a la frecuencia de operación, ω es a la frecuencia angular, las funciones $F(p, 2s, \lambda)$ y $F(p, g, \lambda)$ son especificadas en [17] y ϵ_{eff} corresponde a la permitividad efectiva del dieléctrico, la cual es definida para la superficie selectiva tipo lazo cuadrado como [10]:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{rh} + (1 - \epsilon_{rh}) e^{\frac{-2d}{p\sqrt{sg}t}} \quad (5)$$

En la ecuación (5), el espesor del soporte dieléctrico es especificado como t y el valor asintótico de la permitividad efectiva, ϵ_{rh} , depende de la configuración del dieléctrico y es definido como ϵ_r para la configuración de doble cara y $(\epsilon_r + 1)/2$ para la configuración de cara simple. La Figura 2 muestra estas dos configuraciones del dieléctrico en SSF.

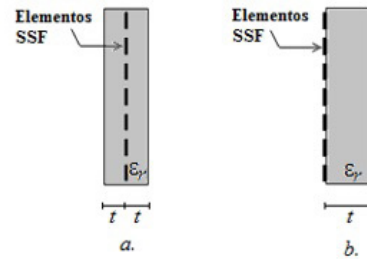


Figura 2. Configuraciones del dieléctrico en SSF. (a) Doble cara; (b) cara simple.

Fuente: elaboración propia.

El ancho de banda en SSF tipo rechaza banda está definido con un nivel de -10 dB [3] y, de acuerdo con [12], el ancho de banda (AB) porcentual con un nivel de -10 dB para la superficie selectiva en frecuencia tipo lazo cuadrado, para las polarizaciones TE y TM son respectivamente:

$$AB_{-10dB_{TE}} = \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{F(p, g, \lambda_r)_{TE}}{F(p, 2s, \lambda_r)_{TE}}} \right) \sqrt{\epsilon_{eff}} \times 100\% \quad (6)$$

$$= \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\ln\left(\csc\left(\frac{\pi g}{2p}\right) + G(p, g, \lambda_r, \theta)\right)}{\ln\left(\csc\left(\frac{\pi s}{p}\right) + G(p, 2s, \lambda_r, \theta)\right)}} \sec \theta \sqrt{\epsilon_{eff}} \times 100\%$$

$$AB_{-10dB_{TM}} = \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{F(p, g, \lambda_r)_{TM}}{F(p, 2s, \lambda_r)_{TM}}} \right) \sqrt{\epsilon_{eff}} \times 100\% \quad (7)$$

$$= \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\ln\left(\csc\left(\frac{\pi g}{2p}\right) + G(p, g, \lambda_r, \phi)\right)}{\ln\left(\csc\left(\frac{\pi s}{p}\right) + G(p, 2s, \lambda_r, \phi)\right)}} \cos \phi \sqrt{\epsilon_{eff}} \times 100\%$$

En las ecuaciones (6) y (7), θ y ϕ corresponden a los ángulos de incidencia en los planos de azimut y elevación respectivamente, λ_r corresponde a c/f_r , donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre y f_r es la frecuencia de resonancia. Adicionalmente, las funciones $G(p, 2s, \lambda_r, \theta)$ y $G(p, g, \lambda_r, \theta)$ son los factores de corrección y son especificados en [17].

3. Resultados

Las ecuaciones (6) y (7) son usadas para determinar el efecto de los parámetros geométricos en el ancho de banda de la superficie selectiva tipo lazo cuadrado, estos resultados son comparados con un análisis de tipo paramétrico obtenido de simulaciones electromagnéticas realizadas en un *software* basado en el MEF. De acuerdo con la Figura 1a, los parámetros geométricos asociados a la superficie selectiva tipo lazo cuadrado son p , d , s y g ; sin embargo, para el estudio propuesto solamente son considerados los parámetros d , s , g , ya que el parámetro p se obtiene

a partir de dos de los parámetros referenciados ($p = d + g$). La superficie selectiva seleccionada para realizar el estudio se encuentra referenciada en [18]. Los parámetros geométricos asociados a la superficie selectiva seleccionada son $p = 7$ mm, $d = 6,7$ mm, $s = 0,5$ mm y $g = 0,3$ mm y, adicionalmente, es considerada incidencia normal.

El análisis paramétrico de los efectos de las variables geométricas en el ancho de banda de la superficie selectiva seleccionada es implementado usando un simulador electromagnético basado en el método de los elementos finitos (MEF), de donde, a partir de la respuesta en frecuencia del coeficiente de transmisión, es determinado el ancho de banda porcentual. La Figura 3 muestra un ejemplo de este tipo de respuesta en frecuencia obtenido para el coeficiente de transmisión, en decibelios, para la superficie selectiva seleccionada, usando un dieléctrico con permitividad relativa ϵ_r igual a 2, un espesor de $t = 50 \mu\text{m}$ y configuración de doble cara. Para esta superficie selectiva, la frecuencia de resonancia es de 9,95 GHz y las frecuencias superior e inferior, asociadas a un nivel de -10 dB, son 12,48 GHz y 7,86 GHz respectivamente; así, lo anterior permite determinar un ancho de banda porcentual de 46,43%.

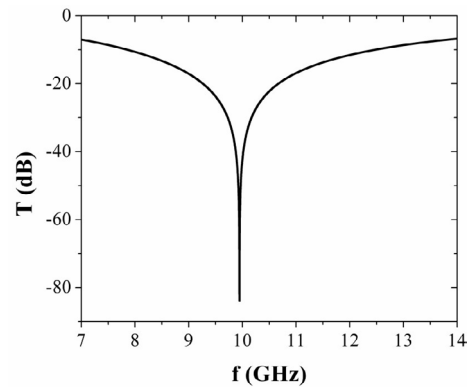


Figura 3. Respuesta en frecuencia del coeficiente de transmisión para la superficie selectiva seleccionada. Configuración de doble cara, $\epsilon_r = 2$, $t = 50 \mu\text{m}$.

Fuente: elaboración propia.

Dado que en el estudio es considerada incidencia normal, el resultado para las polarizaciones TE —ecuación (6)—, y TM —ecuación (7)— es el mismo;

por otro lado, es incluido el análisis sin dieléctrico y con dieléctrico (en configuración de doble cara). La Tabla 1 muestra los resultados en la determinación del ancho de banda para la variable geométrica d , usando el MEF y (6) y (7). Para esta variable se especifica un rango entre 3,0 mm y 10,0 mm y se consideran los parámetros s y g constantes e iguales a 0,5 mm y 0,3 mm respectivamente. Para el dieléctrico utilizado se consideró una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 200 \mu\text{m}$.

Tabla 1. Resultados parámetro d .

d (mm)	Sin dieléctrico		Con dieléctrico	
	Ancho de banda (%)		Ancho de banda (%)	
	MEF	Ecs. (6) o (7)	MEF	Ecs. (6) o (7)
3,0	44,89	51,93	59,80	66,20
5,0	42,26	46,44	57,01	59,30
6,7	40,62	44,47	55,50	56,82
9,0	39,10	42,99	54,12	54,98
10,0	38,49	42,57	53,65	54,43

Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 muestra, basado en los resultados de la Tabla 1, el efecto del parámetro geométrico d sin soporte dieléctrico en el ancho de banda usando los resultados del MEF (análisis paramétrico), además de (6) y (7); de la misma forma, la Figura 5 muestra los resultados de la Tabla 1 considerando el efecto del soporte dieléctrico.

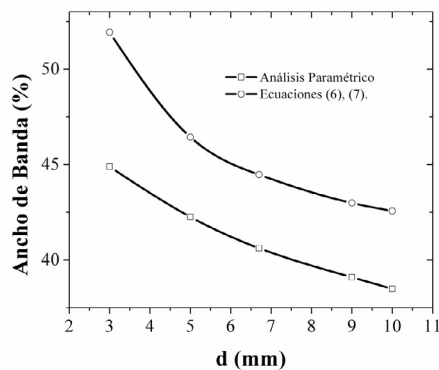


Figura 4. Efecto del parámetro geométrico d en el ancho de banda porcentual, sin soporte dieléctrico.

Fuente: elaboración propia.

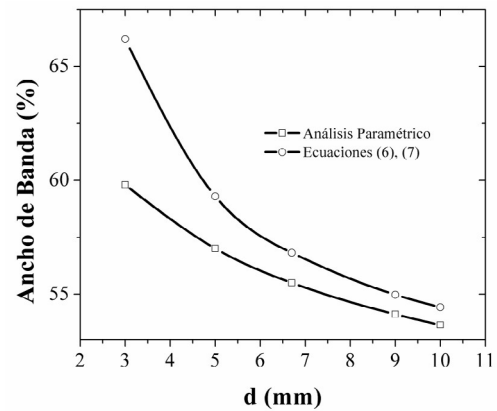


Figura 5. Efecto del parámetro geométrico d en el ancho de banda porcentual, con soporte dieléctrico.

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 2 muestra los resultados en la determinación del ancho de banda para la variable geométrica s , usando el MEF y (6), (7). Para esta variable se especifica un rango entre 0,1 mm y 1,5 mm, considerando los parámetros d y g constantes e iguales a 6,7 mm y 0,3 mm respectivamente. Para el dieléctrico utilizado se consideró una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 50 \mu\text{m}$.

Tabla 2. Resultados parámetro s .

s (mm)	Sin dieléctrico		Con dieléctrico	
	Ancho de Banda (%)		Ancho de Banda (%)	
	MEF	Ecs. (6) o (7)	MEF	Ecs. (6) o (7)
0,1	26,10	31,10	30,94	37,10
0,3	34,46	38,60	39,84	43,60
0,5	40,62	44,47	47,64	49,20
0,7	45,82	50,17	52,27	54,78
1,0	54,56	59,20	59,06	64,01
1,5	64,74	77,98	71,10	83,02

Fuente: elaboración propia.

La Figura 6 muestra, basado en los resultados de la Tabla 2, el efecto del parámetro geométrico s sin soporte dieléctrico en el ancho de banda usando los resultados del MEF (análisis paramétrico) y (6), (7); asimismo, la Figura 7 muestra los resultados de la Tabla 2 considerando el efecto del soporte dieléctrico.

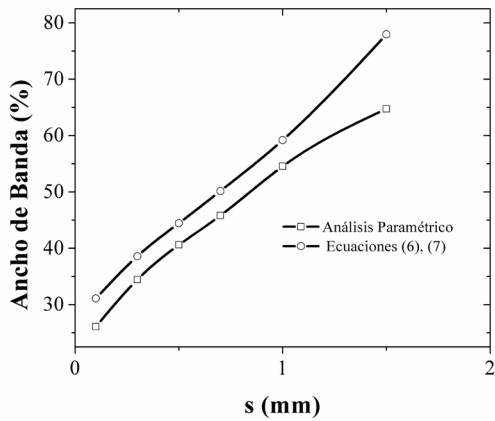


Figura 6. Efecto del parámetro geométrico s en el ancho de banda porcentual, sin soporte dieléctrico.

Fuente: elaboración propia.

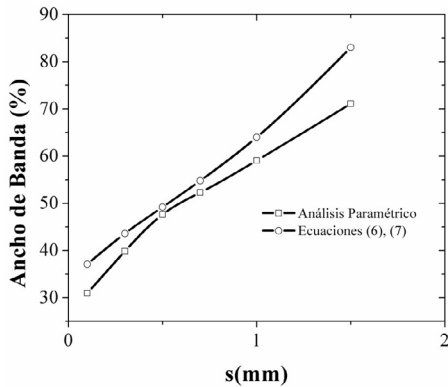


Figura 7. Efecto del parámetro geométrico s en el ancho de banda porcentual, con soporte dieléctrico.

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 3 muestra los resultados en la determinación del ancho de banda para la variable geométrica g, usando el MEF y (6), (7). Para esta variable se especifica un rango entre 0,05 mm y 2,0 mm, considerando los parámetros d y s constantes e iguales a 6,7 mm y 0,5 mm respectivamente. Para el dieléctrico utilizado se consideró una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 800 \mu\text{m}$.

La Figura 8 muestra, basado en los resultados de la Tabla 3, el efecto del parámetro geométrico g sin soporte dieléctrico en el ancho de banda usando los resultados del MEF (análisis paramétrico) y (6), (7). De la misma forma, la Figura 9 muestra los resultados de la Tabla 3 considerando el efecto del soporte dieléctrico.

Tabla 3. Resultados parámetro g.

g (mm)	Sin dieléctrico		Con dieléctrico	
	Ancho de Banda (%)		Ancho de Banda (%)	
	MEF	Ecs. (6) o (7)	MEF	Ecs. (6) o (7)
0,05	53,95	57,84	80,96	81,95
0,1	49,26	53,10	74,11	75,24
0,3	40,62	44,47	61,48	62,77
0,5	36,44	39,98	54,36	55,90
1,25	27,35	31,08	39,57	41,86
2,0	21,87	26,20	28,40	34,10

Fuente: elaboración propia.

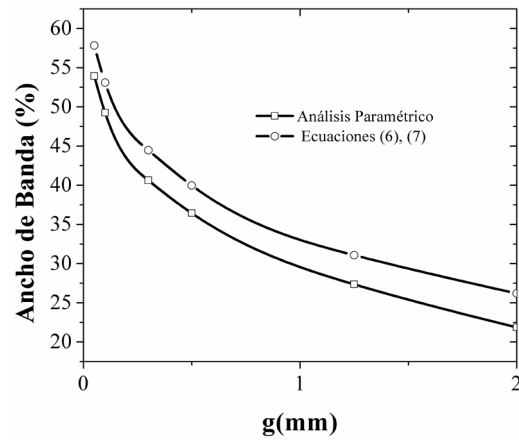


Figura 8. Efecto del parámetro geométrico g en el ancho de banda porcentual, sin soporte dieléctrico.

Fuente: elaboración propia.

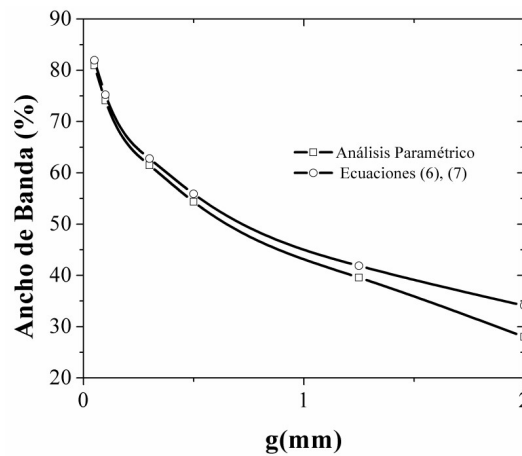


Figura 9. Efecto del parámetro geométrico g en el ancho de banda porcentual, con soporte dieléctrico.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

En este artículo se presentan los resultados comparativos del efecto de los parámetros geométricos en la determinación del ancho de banda porcentual de la superficie selectiva en frecuencia tipo lazo cuadrado, usando para esto un análisis de tipo paramétrico y, por otro lado, la aplicación de una nueva formulación para la determinación del ancho de banda en este tipo de superficies selectivas.

De los resultados obtenidos, se puede concluir que la formulación propuesta en [12], permite determinar el efecto de los parámetros geométricos d , s , g en el cálculo del ancho de banda porcentual de la superficie selectiva tipo lazo cuadrado, con un grado aceptable de exactitud. La diferencia porcentual entre los valores determinados no superan el 20% tomando los resultados del MEF como referencia, lo anterior hace innecesarios los estudios de tipo paramétrico, basados en los resultados de *software* de simulación electromagnética, a la hora de determinar la influencia de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico en el cálculo del ancho de banda de la superficie selectiva en frecuencia tipo lazo cuadrado. Las figuras muestran los efectos de las variables geométricas (d , s , g) en el ancho de banda de la superficie selectiva, considerando o no el soporte dieléctrico, la información disponible en estas permite orientar el proceso de diseño de la superficie selectiva de acuerdo con los requerimientos específicos en el ancho de banda. Actualmente, se trabaja en una nueva formulación para la determinación del ancho de banda que permita reducir las diferencias porcentuales encontradas entre el MEF y las ecuaciones propuestas.

Referencias

- [1] T. Cwik, "Frequency-Selective Screens" in Modern Antenna Handbook; C. A. Balanis, Ed. New York: John Wiley and Sons, 2008, pp. 779-828, <https://doi.org/10.1002/9780470294154.ch16>
- [2] H. H. Sung, "Frequency Selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference" Thesis PhD., University Auckland, Auckland, 2006.
- [3] S. Celozzi, G. Lovat y R. Araneo, "Frequency Selective Surfaces" in Electromagnetic Shielding; K. Chang, Ed. New York: John Wiley and Sons, 2008, pp. 219-240, <https://doi.org/10.1002/9780470268483.ch10>
- [4] F. Costa, A. Monorchio, y G. Manara, "Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, n°. 4, pp. 35-48, 2012, <https://doi.org/10.1109/MAP.2012.6309153>
- [5] A. Mackay, B. Sanz-Izquierdo y E. A. Parker, "Evolution of frequency selective surfaces", *Forum of Electromagnetic Research Methods and Applications Technologies*, vol. 2, n°. 8, pp. 1-7, 2014.
- [6] A. L. P. De Siqueira , R. C. De Oliveira y J. I. Aguiar. "A comparison between the equivalent circuit model and moment method to analyze FSS", in Proceedings of IEEE International Conference Microwave and Optoelectronics (IMOC), Brazil, November, 2009.
- [7] Z. L. Wang, K. Hashimoto, N. Shinohara y H. Matsumoto, "Frequency-selective surface for microwave power transmission", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 4 n°. 10, pp. 2039-2042, 1999, <https://doi.org/10.1109/22.795083>
- [8] T. K. Wu, "Fundamentals of Periodic Structures" in Frequency selective surface and grid array"; T.K. Wu, Ed. New York: John Wiley and Sons. 1995, pp. 1-25.
- [9] P. Callaghan, E. A. Parker y R. J. Langley, "Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces", *IEEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation IET*, vol. 138, n°. 5, pp. 448-454, 1991.
- [10] M. A. Rodriguez y W. P. Carpes, "Numerical model of the effective permittivity for square-loop frequency selective surfaces", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, n°. 3, pp. 1-4, 2015, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2368782>

- [11] D. Ferreira, R. Calderinha, I. Cuinas y T. Fernandes, "Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, n°. 9, pp. 3947-3955, 2015, <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2444420>
- [12] M. A. Rodriguez y W. P. Carpes, "Bandwidth for the equivalent Circuit Model in Square-loop frequency selective surfaces", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, n°. 11, pp. 5932-5939, 2017.
- [13] K. S. Jha, G. Singh y R. Jyoti, "A simple synthesis technique of single square loop frequency selective surface", *Progress in Electromagnetic Research B*, vol. 45, pp. 165-185, 2012, <https://doi.org/10.2528/PIERB12090104>
- [14] S. Can y A. E. Yilmaz, "Parametric performance analysis of the square loop frequency selective surface", *Elektrotehniški Vestnik*, vol. 80, n°. 3, pp. 110-115, 2013.
- [15] S. Can y E. Yilmaz, "Bandwidth enhancement of a triangle with gridded square loop loaded FSS for X and Ku bands". The 8th European conference on Antennas and Propagation, Netherlands, Abril, 2014.
- [16] A. Singh, R. Panwar, S. Putucheri, D. Singh y V. Agarwala, "Parametric analysis of FSS over radar absorbing nanocrystalline structures". National Conference on Recent Advances in Electronics and Computer Engineering., India, febrero, 2015.
- [17] S. Keyrouz, G. Perotto, y H. Viser. "Frequency selective surface for radio frequency energy harvesting applications", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 8, n°. 7, pp. 523-531, 2014, <https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0130>
- [18] P. Callaghan y E. A. Parker, "Element dependency in dielectric tuning of Frequency Selective Surfaces", *Electronics Letters*, vol. 28, n°. 1, pp. 42-44, 1992, <https://doi.org/10.1049/el:19920026>

