

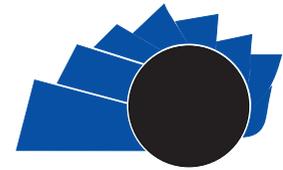


UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



Visión Electrónica

VISIÓN INVESTIGADORA

Frecuencia de resonancia en superficies selectivas en frecuencia tipo bucle cuadrado

Resonant frequency in square loop frequency selective surfaces

Mario Alberto Rodríguez Barrera¹, Walter Pereira Carpes Jr²

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: 17/08/2018

Recibido: 09/10/2018

Aceptado: 23/11/2018

Palabras clave:

Bucle cuadrado

Frecuencia de resonancia

Permitividad efectiva

Superficies selectivas en frecuencia

Open access



Keywords:

Square loop

Resonant frequency

Effective permittivity

Frequency selective surfaces

RESUMEN

El análisis paramétrico usado en la determinación de los efectos de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico en Superficies Selectivas en Frecuencia (SSF), es una herramienta de uso generalizado debido a la ausencia de formulaciones que permitan evaluar este tipo de efectos. El objetivo de esta clase de análisis es determinar la influencia en la frecuencia de resonancia 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 artículo se presenta la aplicación del Modelo de Circuito Equivalente (MCE) actuando en conjunto con una novedosa formulación de la permitividad efectiva del dieléctrico en SSF tipo bucle cuadrado, el cual permite determinar los efectos de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva, haciendo innecesario el uso de análisis de tipo paramétrico. Los resultados obtenidos muestran una exactitud aceptable cuando se comparan con los arrojados por las simulaciones electromagnéticas realizadas en un software basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF).

ABSTRACT

The parametric analysis used in the determination of effects of parameters, both geometrical and associated to dielectric in Frequency Selective Surfaces (FSS) constitutes a method of widespread use as a result of the scarcity of formulations for the assessment of this type of effects. The objective of this method of analysis is to determine the influence in resonant frequency of a particular parameter, either associated to the dielectric support or to the geometrical parameters of the selective surface, in order to guide the process of design of the surface. This article presents the application of the Equivalent Circuit Model (ECM) acting in conjunction with an innovative formulation of the effective permittivity of the dielectric in square loop FSS, that enables the determination of the geometrical parameters and those associated to the dielectric on resonant frequency of the selective surface. The proposed methodology makes unnecessary the use of analysis of parametric type. The results obtained show an acceptable accuracy in comparison with the electromagnetic simulations performed in software based on Finite Element Method (FEM).

¹ Ing. Electricista, MSc. En Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. PhD. En Ingeniería Eléctrica, Universidade Federal de Santa Catarina- Florianópolis, Brasil. Filiación institucional: docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: marodriguezb@udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3142-1823>

² Ing. Electricista, MSc. En Ingeniería Eléctrica, Universidade Federal de Santa Catarina-Florianópolis, Brasil. PhD. En Ingeniería Eléctrica, Université de Paris XI (Paris-Sud). Filiación institucional: docente Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brazil. Correo electrónico: walter.carpes@ufsc.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-5812>

1. Introducción

El control de la distribución de la radiación electromagnética es un tema de particular interés debido a las múltiples aplicaciones en áreas científicas, militares e industriales. Son muchos y muy diversos los dispositivos y materiales usados para controlar la propagación de la energía electromagnética; entre los primeros podemos citar los reflectores, absorbedores, pantallas dicroicas y superficies selectivas en frecuencia, y en cuanto a los segundos, se tienen los meta-materiales, compósitos y nano-materiales.

En el anterior sentido, las Superficies Selectivas en Frecuencia (SSF) son dispositivos electromagnéticos que permiten controlar la propagación de radiación electromagnética en forma selectiva, y son de particular interés debido a su flexibilidad en el diseño, por su uso como dispositivo individual o como componente de dispositivos más complejos y por el rango de aplicación en el espectro electromagnético que se extiende desde las microondas hasta el infrarrojo [1]. Constructivamente, 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 forma constructiva, es posible obtener diferentes características de filtrado, es decir diferentes tipos de respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión y reflexión de la superficie selectiva, lo cual permite clasificarlas como pasa altos, pasa bajos, pasa banda y rechaza banda [2]. Las características de filtrado mencionadas pueden ser analizadas usando diferentes métodos numéricos de análisis electromagnético como el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de los Momentos (MoM). Sin embargo, su principal desventaja es su alto costo computacional involucrado [3, 4]. Métodos con menor costo computacional, como el MCE surgieron hace aproximadamente 50 años [5] como una alternativa de análisis dado su bajo tiempo computacional acompañado de una exactitud aceptable comparado con los métodos referenciados [6, 7]. Sin embargo, su principal desventaja es la modelización de los efectos del dieléctrico que sirve de soporte para los elementos en las SSF [8], efectos que son relevantes en la operación de la superficie selectiva [9]. Trabajos recientes [10-12], muestran avances significativos en la modelización del dieléctrico en el MCE para la superficie selectiva en frecuencia tipo bucle cuadrado.

De otro lado, análisis de tipo paramétrico reportados recientemente en la literatura

especializada y cuyo objetivo es evaluar el efecto de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico en la frecuencia de resonancia y el ancho de banda en superficies selectivas en frecuencia [13-16], evidencian la necesidad de formulaciones teóricas en la determinación de los efectos mencionados.

En acuerdo con lo expuesto, un análisis de tipo paramétrico evalúa el efecto de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico, en la frecuencia de resonancia y el ancho de banda de la superficie selectiva, a través de los resultados de procesos de simulación electromagnética en software especializado. 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. Procesos de simulación electromagnética, implementados en software especializado, permiten encontrar la frecuencia de resonancia para cada valor establecido en el rango especificado. Finalmente, curvas de tendencia permiten evaluar el efecto del parámetro en cuestión.

En este artículo, usando la formulación propuestas en [10], se determinan los efectos de las variables geométricas y las asociadas al dieléctrico, en la frecuencia de resonancia de la Superficie Selectiva en Frecuencia tipo bucle cuadrado.

2. Metodología.

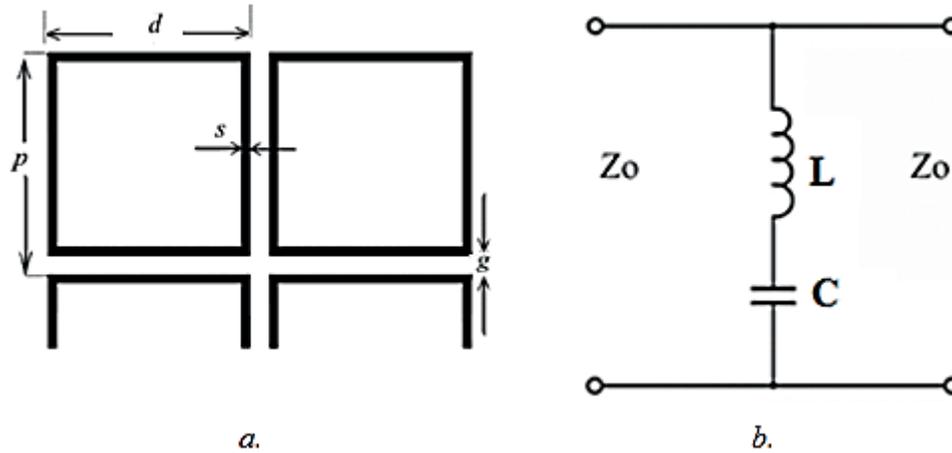
2.1. Modelo de Circuito Equivalente.

Los parámetros geométricos p , d , s y g asociados a la superficie selectiva tipo bucle cuadrado son mostrados en la Figura 1 a. De igual forma, en la Figura 1 b, se muestra el MCE aplicado a este tipo de superficie selectiva, el cual permite realizar el análisis electromagnético de la misma.

En la Figura 1 b., 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 1 b, la magnitud del coeficiente de transmisión $|T|$ está definido por:

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

Figura 1. *a.* Parámetros geométricos y *b.* Circuito equivalente superficie selectiva en frecuencia tipo bucle cuadrado. Z_0 corresponde a la impedancia característica del espacio libre



Fuente: elaboración propia.

Donde Y_{SSFn} 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, las cuales se determinan como se muestra en (3) y (4),

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

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

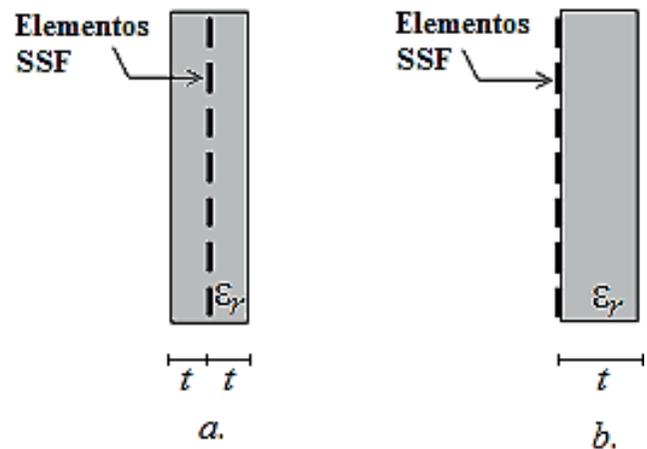
En las Ecuaciones 3 y 4, λ es longitud de onda a la frecuencia de operación, ω es a la frecuencia angular, las funciones $F(p, 2s, \lambda)$ y $F(p, g, \lambda)$ son especificadas en [17] y ϵ_{eff} corresponde a la permitividad efectiva del dieléctrico, la cual es definida para la superficie selectiva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

De acuerdo con el circuito equivalente mostrado en la Figura 1 *b*, la frecuencia angular de resonancia de la superficie selectiva es determinada como:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC\epsilon_{eff}}} \quad (6)$$

Para la condición sin dieléctrico (*free-standing condition*), $\epsilon_{eff} = 1$, luego la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva para esta condición, f_o , es determinada como:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

Por lo tanto, la frecuencia de resonancia para cualquier espesor del soporte dieléctrico, f_r , puede ser expresada como:

$$f_r = \frac{f_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (8)$$

Si se tiene en cuenta (5), la Ecuación 8, se puede expresar como:

$$f_r = \frac{f_o}{\sqrt{\epsilon_{rh} + (1 - \epsilon_{rh})e^{\frac{-2d}{p\sqrt{sg}t}}}} \quad (9)$$

La Ecuación 9, muestra la influencia de los parámetros geométricos (p , d , s , y g) y los asociados al dieléctrico (ϵ_{rh} y t) en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva en frecuencia tipo bucle cuadrado. Los resultados proporcionados por (9), son comparados con los resultados de un estudio paramétrico usando un *software* de simulación electromagnética basado en el MEF.

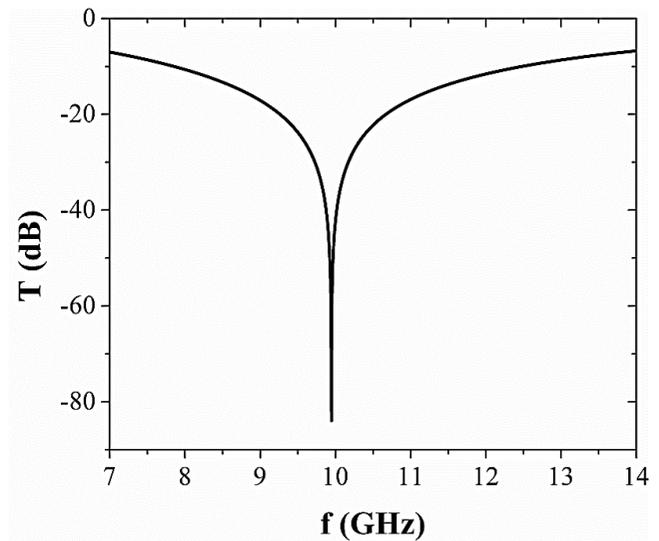
3. Resultados

La Ecuación 9 es usada para determinar el efecto de los parámetros geométricos y los asociados al dieléctrico en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva tipo bucle cuadrado. Estos resultados son comparados con un análisis de tipo paramétrico obtenido de simulaciones electromagnéticas realizadas en un *software* basado en el MEF.

La superficie selectiva seleccionada para realizar el estudio se encuentra referenciada en [18] y sus parámetros geométricos asociados a la superficie selectiva seleccionada son $p = 7 \text{ mm}$, $d = 6,7 \text{ mm}$, $s = 0,5 \text{ mm}$ y $g = 0,3 \text{ mm}$. Por otro lado, es considerada incidencia normal y adicionalmente, en 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

($p = d + g$). Adicionalmente, el dieléctrico considerado tiene una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 100 \mu\text{m}$. El análisis paramétrico de los efectos de las variables geométricas en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva seleccionada es implementado, como se mencionó, 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 determinada la frecuencia de resonancia. 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.

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.

La Tabla 1 muestra la frecuencia de resonancia sin dieléctrico (f_o) de la superficie selectiva para la variable geométrica d , usando el MEF y el MCE. Para esta variable se especifica un rango entre 5,0 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. Adicionalmente, la Tabla 1 muestra los resultados de la frecuencia de resonancia para el MEF y la encontrada usando la Ecuación 9. El dieléctrico utilizado tiene una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 100 \mu\text{m}$.

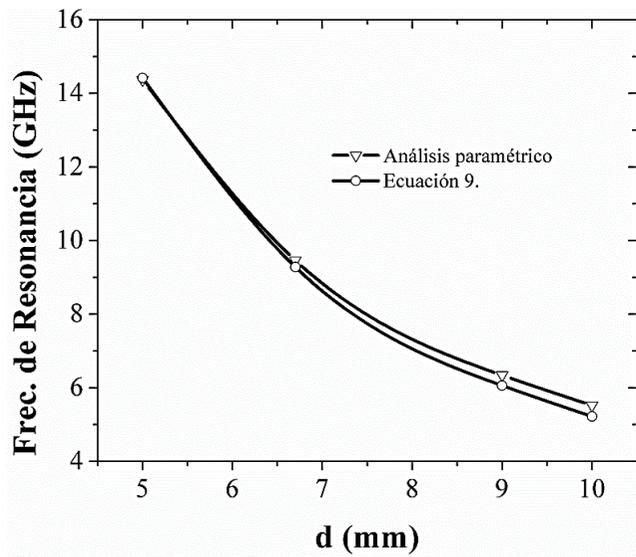
Tabla 1. Resultados parámetro geométrico d

| d (mm) | Sin dieléctrico | | | Con dieléctrico | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------------|
| | Frecuencia de Resonancia (GHz) | | | Frecuencia de Resonancia (GHz) | |
| | MEF | f_o | MCE | MEF | f_r Ec. 9 |
| 5.0 | 16,92 | | 16,94 | 14,37 | 14,42 |
| 6.7 | 11,14 | | 10,94 | 9,46 | 9,28 |
| 9.0 | 7,46 | | 7,15 | 6,34 | 6,06 |
| 10.0 | 6,49 | | 6,16 | 5,52 | 5,22 |

Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 muestra, basado en los resultados de la Tabla 1, el efecto del parámetro geométrico d , en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva usando los resultados del MEF (análisis paramétrico) y la Ecuación 9.

Figura 4. Efecto del parámetro geométrico d en la frecuencia de resonancia



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 2 muestra la frecuencia de resonancia sin dieléctrico (f_o) de la superficie selectiva para la variable geométrica s , usando el MEF y el MCE. Para esta variable se especifica un rango entre $0,3\text{ mm}$ y $1,5\text{ mm}$ y se consideran los parámetros d y g constantes e iguales a $6,7\text{ mm}$ y $0,3\text{ mm}$ respectivamente. Adicionalmente, la Tabla 2 muestra los resultados de la frecuencia de resonancia para el MEF y la encontrada usando la Ecuación 9. El dieléctrico utilizado tiene una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 100\ \mu\text{m}$.

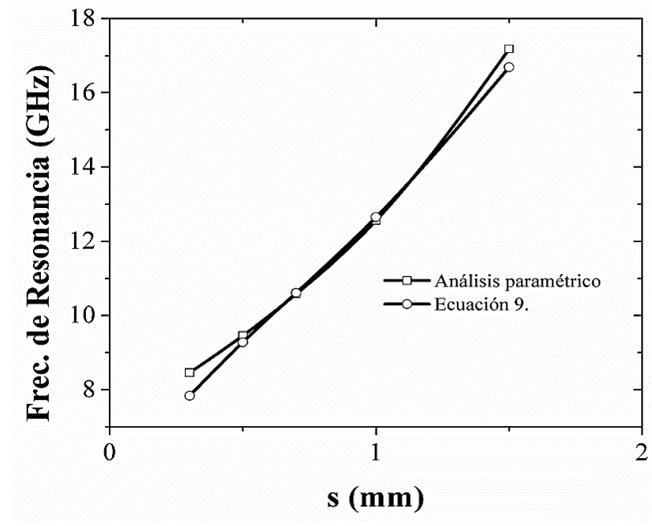
Tabla 2. Resultados parámetro geométrico s

| s (mm) | Sin dieléctrico | | | Con dieléctrico | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------------|
| | Frecuencia de Resonancia (GHz) | | | Frecuencia de Resonancia (GHz) | |
| | MEF | f_o | MCE | MEF | f_r Ec. 9 |
| 0.3 | 10,19 | | 9,51 | 8,46 | 7,84 |
| 0.5 | 11,14 | | 10,94 | 9,46 | 9,28 |
| 0.7 | 12,27 | | 12,29 | 10,58 | 10,61 |
| 1.0 | 14,37 | | 14,40 | 12,56 | 12,65 |
| 1.5 | 19,30 | | 18,65 | 17,18 | 16,69 |

Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 muestra, basado en los resultados de la Tabla 2, el efecto del parámetro geométrico s , en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva usando los resultados del MEF (análisis paramétrico) y las Ecuación 9.

Figura 5. Efecto del parámetro geométrico s en la frecuencia de resonancia



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 3 muestra la frecuencia de resonancia sin dieléctrico (f_o) de la superficie selectiva para la variable geométrica g , usando el MEF y el MCE. Para esta variable se especifica un rango entre $0,05\text{ mm}$ y $1,25\text{ mm}$ y se consideran los parámetros d y s constantes e iguales a $6,7\text{ mm}$ y $0,5\text{ mm}$ respectivamente. Adicionalmente, la Tabla 3 muestra los resultados de la frecuencia de resonancia para el MEF y la encontrada usando (9). El dieléctrico utilizado tiene una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y un espesor de $t = 100\ \mu\text{m}$.

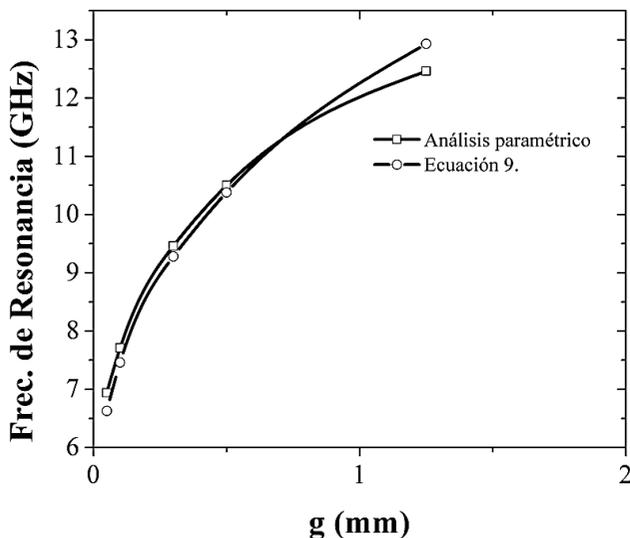
Tabla 3. Resultados parámetro geométrico g .

| g (mm) | Sin dieléctrico | | | Con dieléctrico | | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|
| | Frecuencia de Resonancia (GHz) | | | Frecuencia de Resonancia (GHz) | | |
| | MEF | f_o | MCE | MEF | f_r | Ec. 9 |
| 0,05 | 8,79 | | 8,69 | 6,94 | | 6,63 |
| 0,1 | 9,53 | | 9,40 | 7,71 | | 7,46 |
| 0,3 | 11,14 | | 10,94 | 9,46 | | 9,28 |
| 0,5 | 12,07 | | 11,89 | 10,50 | | 10,38 |
| 1,25 | 13,87 | | 14,12 | 12,46 | | 12,93 |

Fuente: elaboración propia.

La Figura 6 muestra, basado en los resultados de la Tabla 3, el efecto del parámetro geométrico g , en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva usando los resultados del MEF (análisis paramétrico) y la Ecuación 9.

Figura 6. Efecto del parámetro geométrico g en la frecuencia de resonancia



Fuente: elaboración propia.

Para este último caso es evaluado el efecto del espesor del dieléctrico en la frecuencia de resonancia. Los parámetros geométricos asociados a la superficie selectiva son $p = 7 \text{ mm}$, $d = 6,7 \text{ mm}$, $s = 0,5 \text{ mm}$ y $g = 0,3 \text{ mm}$. La frecuencia de resonancia son dieléctrico (*free-standing condition*) es 11,64 GHz para el MEF y 10,94 para el MCE. La Tabla 4 muestra la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva (f_r), para soportes dieléctricos entre $t = 100 \mu\text{m}$ y $t =$

$1800 \mu\text{m}$. En todos los casos anteriores la frecuencia de resonancia es determinada usando el MEF y usando (9). Para el dieléctrico utilizado se consideró una permitividad relativa ϵ_r igual a 2 y configuración de doble cara.

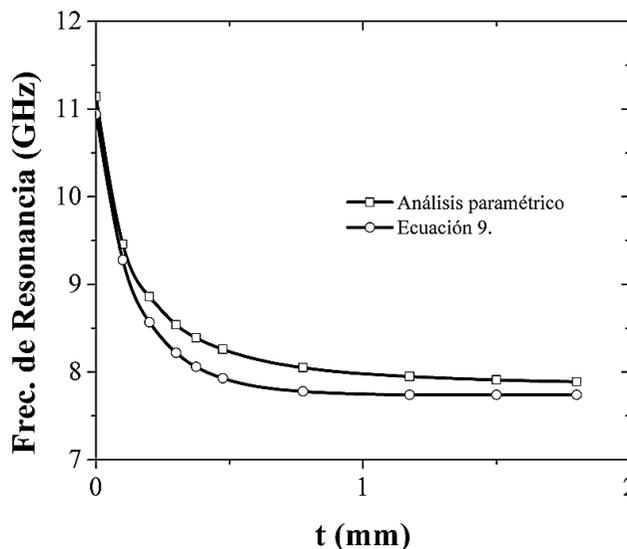
Tabla 4. Resultados frecuencia de resonancia como función del espesor del material dieléctrico t

| Espesor del dieléctrico t (μm) | Frecuencia de Resonancia (GHz) | | |
|--|--------------------------------|-------|-------|
| | MEF | f_r | Ec. 9 |
| 100 | 9,46 | | 9,28 |
| 200 | 8,86 | | 8,57 |
| 300 | 8,54 | | 8,22 |
| 375 | 8,39 | | 8,06 |
| 475 | 8,26 | | 7,93 |
| 775 | 8,05 | | 7,78 |
| 1175 | 7,95 | | 7,74 |
| 1500 | 7,91 | | 7,74 |
| 1800 | 7,89 | | 7,74 |

Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 muestra, basado en los resultados de la Tabla 4, el efecto del espesor del material dieléctrico en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva usando los resultados del MEF (análisis paramétrico) y la (9).

Figura 7. Frecuencia de resonancia como función del espesor del material dieléctrico t



Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones.

Las Figuras 4-7 muestran los efectos de las variables geométricas (d , s , g) y la asociada espesor del dieléctrico (t) en la frecuencia de resonancia de la superficie selectiva tipo bucle cuadrado. La información disponible en estas figuras permite evaluar los efectos de las variables mencionadas, lo que permite orientar, de forma amplia, el proceso de diseño de la superficie selectiva. Es de resaltar el grado aceptable de exactitud de la formulación propuesta en [10], evidenciado en la baja diferencia porcentual entre los valores determinados usando la formulación mencionada y los obtenidos usando el análisis paramétrico. Las diferencias porcentuales en la determinación de la frecuencia de resonancia no superan el 8 % tomando los resultados del MEF como referencia.

Por lo tanto, la formulación propuesta en [10], 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 de la frecuencia de resonancia de superficie selectiva en frecuencia tipo bucle cuadrado.

Actualmente se está trabajando, como continuación de la presente investigación, en una nueva metodología de diseño de superficies selectivas tipo bucle cuadrado basado en un método gráfico que tiene en cuenta simultáneamente los efectos de las variables geométricas y las asociadas al dieléctrico en la frecuencia de resonancia y el ancho de banda de la superficie selectiva.

Referencias.

- [1] C. A. Balanis, "Frequency Selective Screens" in Modern Antenna Handbook. 1st ed. New York, (USA), Wiley, 2008, pp.779-828, <https://doi.org/10.1002/9780470294154>
- [2] H. H. Sung, "Frequency Selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference." Ph. D. dissertation, Dept. Elect. Electron. Eng., Univ. Auckland, Auckland, New Zealand. 2006.
- [3] S. Celozzi, G. Lovat, and R. Araneo, "Frequency Selective Surfaces" in Electromagnetic Shielding 1st ed. New York, (USA), Wiley, 2008, pp. 219-240, <https://doi.org/10.1002/9780470268483.ch10>
- [4] F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara. "Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model." IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.54 no.4, pp. 35-48. Aug. 2012, <https://doi.org/10.1109/MAP.2012.6309153>
- [5] A. Mackay, B. Sanz-Izquierdo, and E. A. Parker. "Evolution of frequency selective surfaces." Forum of Electromagnetic Research Methods and Applications Technologies, vol. 2 no.8, pp. 1-7, May-April. 2014
- [6] A. L. P. S. Campos, R. C. O. Moreira, and J. I. Trindade. "A comparison between the equivalent circuit model and moment method to analyze FSS" Proceedings of IEEE International Conference Microwave and Optoelectronics (IMOC), Belem, Brazil, 2009. pp 760-765, <https://doi.org/10.1109/IMOC.2009.5427477>
- [7] Z. L.Wang, K. Hashimoto, N. Shinohara and H. Matsumoto. "Frequency-selective surface for microwave power transmission." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.4 no.10, pp. 2039-42. Oct.1999, <https://doi.org/10.1109/22.795083>
- [8] T. K. Wu, "Fundamentals of Periodic Structures" in Frequency selective surface and grid array. 1st ed. New York, (USA): Wiley. 1995, pp. 1-25.
- [9] P. Callaghan, E. A. Parker and R. J. Langley. "Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces." IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation IET, vol. 138 no.5, pp. 448-54. Oct.1991, <https://doi.org/10.1049/ip-h-2.1991.0075>
- [10] M. A. Rodriguez and W. P. Carpes Jr. "Numerical model of the effective permittivity for square-loop frequency selective surfaces." IEEE Transactions on Magnetics, vol.51 no. 3, pp. 1-4. March 2015, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2368782>
- [11] D. Ferreira, R. Calderinha, I. Cuinas and T. Fernandes. "Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization." IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.63 no.9, pp. 3947-55. June 2015, <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2444420>

- [12] M. A. Rodriguez and W. P. Carpes Jr. "Bandwidth for the equivalent Circuit Model in Square-loop frequency selective surfaces." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65 no.11, pp. 5932-39. Nov 2017, <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2754418>
- [13] K. S. Jha, G. Singh, R. Jyoti, R. "A simple synthesis technique of single square loop frequency selective surface." *Progress in Electromagnetic Research B*, vol. 45, pp. 165-185. Oct. 2012, <https://doi.org/10.2528/PIERB12090104>
- [14] S. Can, A. E. Yilmaz, "Parametric performance analysis of the square loop frequency selective surface." *Elektrotehniški Vestnik*, vol.80 no.3, pp. 110-115. Jan. 2013.
- [15] Can, S., Yilmaz, A.E. Bandwidth enhancement of a triangle with gridded square loop loaded FSS for X and Ku bands. *EuCAP. The 8th European conference on Antennas and Propagation*, The Hague, Netherlands. 2014, pp. 2150-2153.
- [16] A. Singh, R. Panwar, S. Putucheri, D. Singh V. Agarwala. Parametric analysis of FSS over radar absorbing nanocrystalline structures. *RAECE. National Conference on Recent Advances in Electronics and Computer Engineering*. Roorkee, India. 2015, pp. 75-79.
- [17] S. Keyrouz, G. Perotto, and H. J. Viser, . "Frequency selective surface for radio frequency energy harvesting applications." *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 8 no. 7, pp. 523-531, May. 2014.
- [18] P. Callaghan, E. A. Parker. "Element dependency in dielectric tuning of Frequency Selective Surfaces." *Electronics Letters*, vol. 28 no.1, pp. 42-44, Jan. 1992, <https://doi.org/10.1049/el:19920026>