

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS AL ESTUDIO DE ANTENAS FRACTALES

Gross, Patricio; Vernieri, Julieta; Ciafardini, Juan Pablo.

Departamento de Electrotecnia- Facultad de Ingeniería-UNLP. Calle 48 y 116.
patriciomgross@gmail.com

Introducción

Las antenas llamadas fractales, constituidas sobre la base de la repetición de un patrón geométrico, tienen un comportamiento multibanda gracias a su propiedad de autoescalabilidad. Contendida dentro de la forma externa de la estructura fractal se encuentra la misma forma, o similar, repetida en varias escalas menores. La primera antena fractal multibanda construida fue el monopolo de Sierpinski. El desarrollo de las tecnologías en telefonía móvil y comunicaciones por microondas ha encontrado en este tipo de antenas características ventajosas para su diseño y aplicación, como por ejemplo su reducido tamaño.

Por otro lado, la expansión de una cantidad física en una serie de funciones base es un recurso matemático ampliamente utilizado. Una posible expansión, que ofrece un interesante enfoque para la comprensión del fenómeno físico, es la Teoría de los Modos Característicos (TMC o CMA según sus siglas en inglés: Characteristic Mode Analysis). Esta teoría fue enunciada por Garbacz en 1968 [1] y posteriormente mejorada por Harrington y Mautz en 1971 [2, 3]. Sin embargo, su eficiente aprovechamiento no llegó antes del desarrollo del Electromagnetismo computacional (CEM Computational Electromagnetics) basado en la aplicación de los métodos numéricos, así como el desarrollo de computadoras cada vez más poderosas. En el año 2007 Cabedo Fabres [4] aplicó esta teoría para el análisis del diseño de antenas, presentándolo como un enfoque novedoso para el entendimiento físico del comportamiento radiante de estos dispositivos.

Con este enfoque analizaremos una antena fractal, monopolo de Sierpinski, en su desarrollo más elemental, es decir para un par de iteraciones.

Se realizarán simulaciones con el software de simulación electromagnética FEKO [5], el cual posibilita no sólo un estudio clásico del diagrama de radiación según la frecuencia, sino que ofrece un análisis basado en la TMC. Esto permite estudiar el comportamiento natural de la antena independientemente de toda excitación externa.

Marco Teórico

Triángulo de Sierpinski

Esta geometría fractal fue propuesta por Waclam Sierpinski en 1916. Se construye comenzando por un triángulo equilátero del que luego se extrae el triángulo formado por los puntos medios del original, de esta manera se extrae un área que es un cuarto del área del triángulo. En forma iterativa se aplica este mismo procedimiento a cada uno de los triángulos resultantes, tal como se muestra en la Figura 1. La sucesión infinita de repeticiones de la regla sobre una determinada figura original genera una figura límite. El triángulo de Sierpinski estrictamente sería, entonces, el conjunto de puntos que permanecen después de reiterar este proceso infinitas veces [6].

Esta antena, como todas las antenas fractales, tiene la propiedad de ser multibanda pues por el principio de escalabilidad si se tiene una antena que funciona a una cierta frecuencia f y se dividen sus dimensiones por un factor k , la antena resultante se comportará igual que la original pero a una frecuencia kf . Es decir, si se tiene una antena formada por copias de ella misma pero en diferentes escalas, se obtiene un elemento con el mismo

comportamiento electromagnético en tantas bandas de frecuencia como factores de escala contenga la estructura. Esto es un comportamiento multibanda [7].

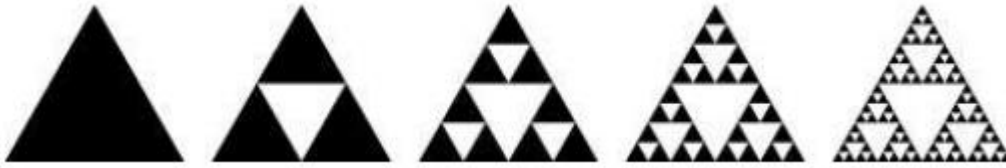


Figura 1: Generación del triángulo de Sierpinski

Teoría de Modos Característicos

La TMC está ampliamente descrita en la bibliografía [1,2,3,4,8,9]. Esta teoría permite definir un conjunto particular de corrientes superficiales y campos radiados que son característicos de una dada estructura y material, independientemente de toda excitación externa. Cada una de estas corrientes es denominada como modo característico o corriente característica.

Los modos se corresponden con las resonancias naturales de la estructura y pueden ser obtenidos numéricamente para cuerpos conductores de forma arbitraria. Esto permite realizar un análisis de las propiedades de radiación de las estructuras, independientemente de suponer una dada excitación.

Todo cuerpo conductor con una superficie S está asociado a un conjunto infinito de corrientes reales características (J_n), o modos característicos, sobre dicha superficie S . Cada corriente J_n irradia en el espacio libre un campo eléctrico característico E_n . La componente tangencial del campo eléctrico característico ($E_{n,tang}$) tiene la misma fase en toda la superficie.

Estos modos característicos constituyen un conjunto particular de funciones ortogonales que representan posibles corrientes inducidas en la superficie de la estructura. Los campos lejanos irradiados asociados a estas corrientes ortogonales también poseen propiedades de ortogonalidad en la esfera infinita de radiación. Esta propiedad de ortogonalidad en los modos es la que permite aseverar que los modos irradian en forma independiente unos de otros.

Asociado a cada modo característico J_n existe un autovalor λ_n que es un valor real. Para el cálculo de las corrientes modales se parte de la definición del problema de autovalores que involucra la matriz de impedancia generalizada de la estructura (Z) [10].

La magnitud de los autovalores está relacionada con la radiación de los modos. Un modo es resonante cuando el autovalor asociado es nulo, y en consecuencia cuanto menor es un autovalor más eficientemente irradiará ese modo si es excitado. Sin embargo, en la práctica resulta más útil analizar la Significancia modal (MS), un término relacionado con los autovalores según la siguiente expresión [4]:

$$MS_n = \left| \frac{1}{1+j\lambda_n} \right| \quad (1)$$

Siendo λ_n los autovalores correspondientes a cada modo n .

Este término representa la amplitud normalizada de los modos de corriente. Esta amplitud normalizada solo depende de la forma y el tamaño del objeto conductor y no tiene en cuenta la excitación. La resonancia de cada modo se puede identificar por un valor máximo en las curvas de Significancia modal. Esto significa que cuanto más se acerque la curva a su valor máximo, es decir la unidad por estar normalizado, más eficazmente contribuirá el modo asociado a la radiación.

Asociado a cada modo característico, existe un ángulo llamado ángulo característico α_n , definido como:

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\lambda_n) \quad (2)$$

Siendo λ_n los autovalores correspondientes a cada modo n .

Este ángulo puede variar entre 90° y 270° , y da el ángulo de atraso entre la corriente modal J_n y la componente tangencial del campo eléctrico característico asociado (E_{n_tang}). Un modo resuena cuando $\lambda_n = 0$, es decir, cuando su ángulo característico α_n es 180° . Por lo tanto, cuando el ángulo característico está cerca de 180° el modo es un buen radiador, mientras que cuando el ángulo característico está cerca de 90° ó 270° el modo principalmente almacena energía.

CASO DE ESTUDIO

Se diseñó una antena basada en el triángulo de Sierpinski. Para las simulaciones se utiliza el software de simulación electromagnética FEKO. Se consideró la antena de material conductor de 1 mm de espesor, y dimensiones $h_1 = 90$ mm y $h_2 = 45$ mm (Fig. 2), montada sobre un plano conductor.

Se estudió la iteración 0 que es el triángulo pleno sin extracción (Fig. 2a), y la iteración 1 (Fig. 2b). Como en cada proceso de iteración cada triángulo genera tres nuevos triángulos, el número de triángulos después de la n -ésima iteración es $N^n = 3^n$. En el caso bajo análisis para $n=0$, se tiene un triángulo y para $n=1$ se tienen tres triángulos.

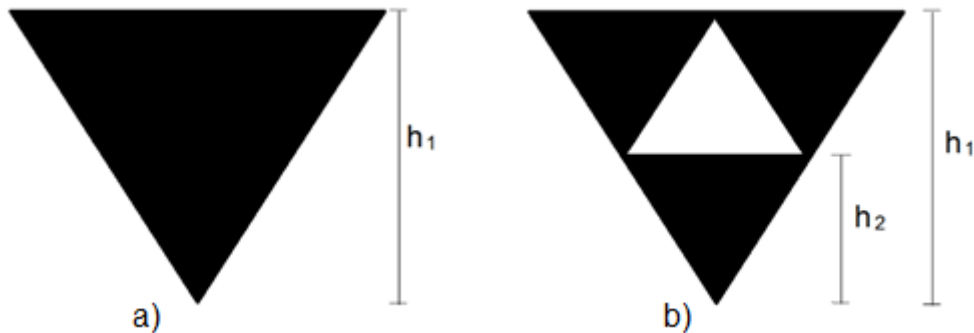


Figura. 2 Antena monopolo de Sierpinski. a) iteración $n=0$, b) iteración $n=1$.

La antena es alimentada a través de un segmento entre el plano de tierra y el parche.

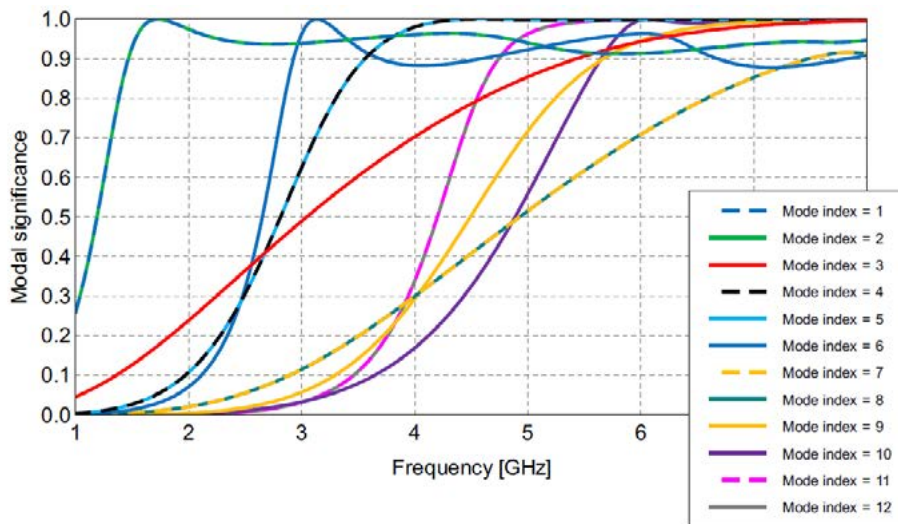
Como primer paso se realizó un análisis modal de ambas antenas. Dicho análisis permite obtener tanto la significancia modal MS como el ángulo característico α_n . Por otro lado, se obtuvo el coeficiente de reflexión S_{11} de las antenas a partir de una simulación clásica de campo lejano, para una dada forma de excitación con un barrido en frecuencia.

Resultados

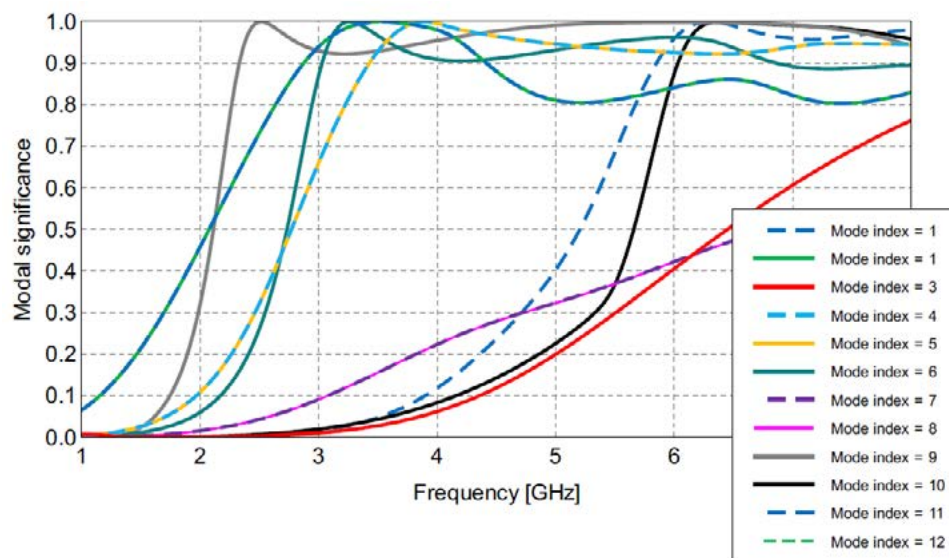
En las Figuras 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos de la significancia modal (MS) y el ángulo característico (α_n), respectivamente para ambas antenas. En la Figura 5 se observa el coeficiente de reflexión (S_{11}) para ambas iteraciones.

Como se mencionó, según la TMC, las frecuencias naturales de resonancia de la geometría se encuentran cuando la significancia modal es igual a 1 y el ángulo característico es 180° . De los gráficos podemos deducir, a modo de ejemplo que para la iteración $n=0$ el modo 1 y el modo 2 resuenan alrededor de 1,7 GHz. Mientras que para la iteración $n=1$, a modo de ejemplo vemos que el modo 1 y el modo 2 resuenan en una frecuencia aproximada de 3,5 GHz.

El barrido en frecuencia, es decir excitando la antena, pone de manifiesto a través del coeficiente de reflexión S_{11} (Fig. 5), las frecuencias en que la radiación es óptima para dicha forma de excitación.



a)



b)

Figura 3. Significancia modal (MS) a) iteración n=0, b) iteración n=1.

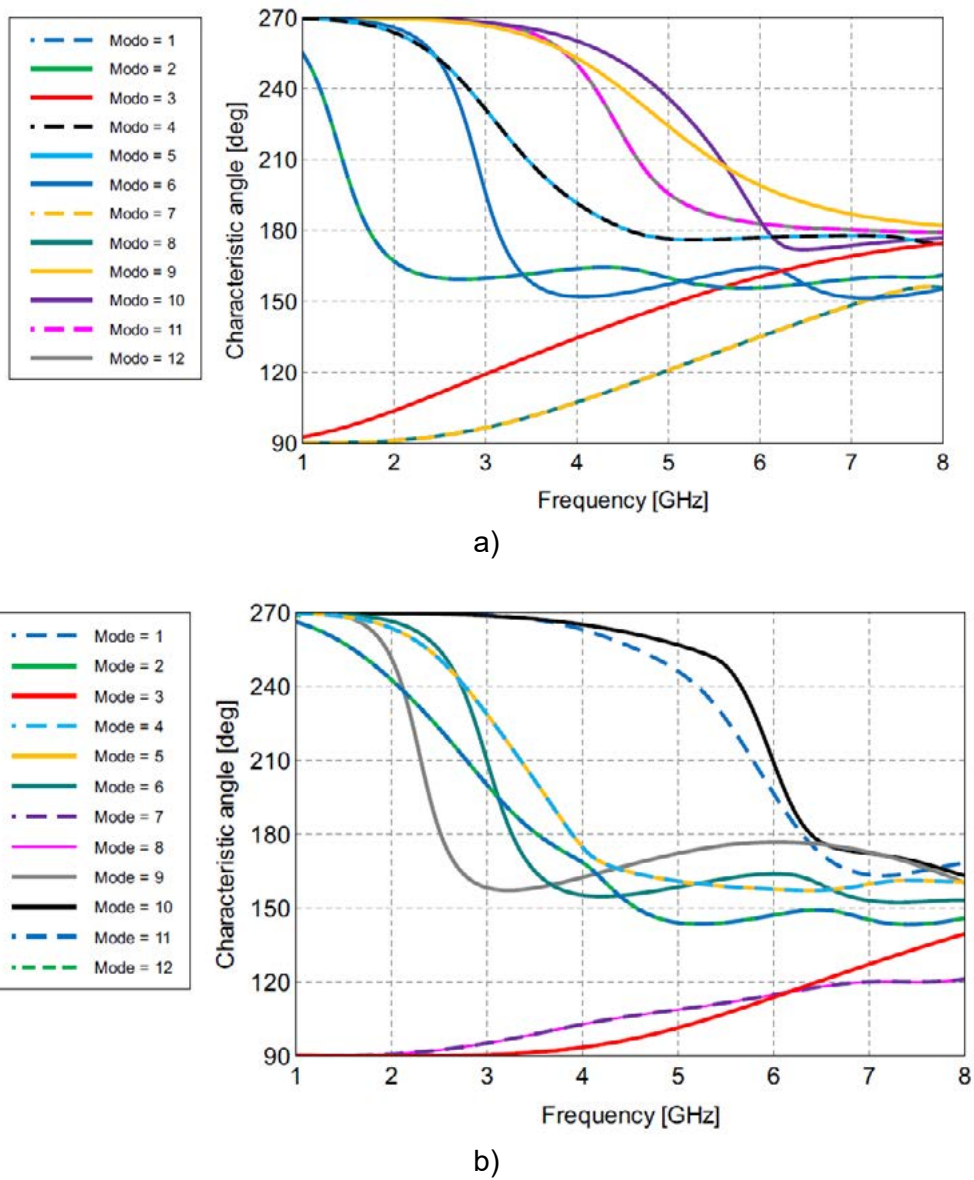
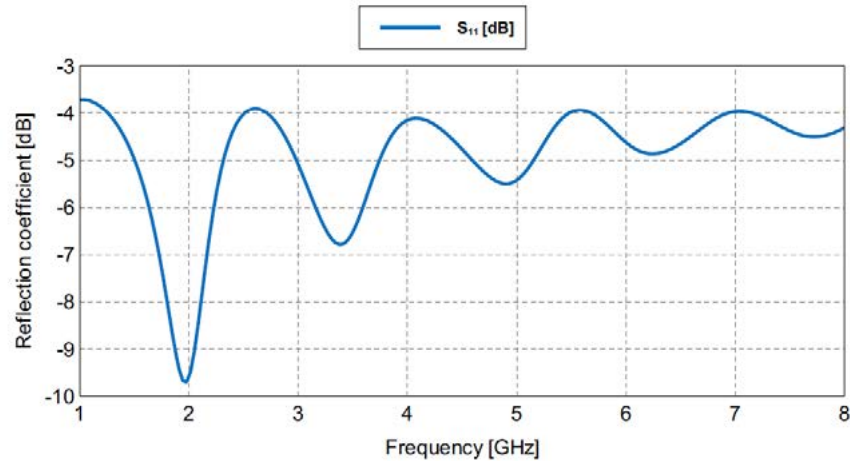
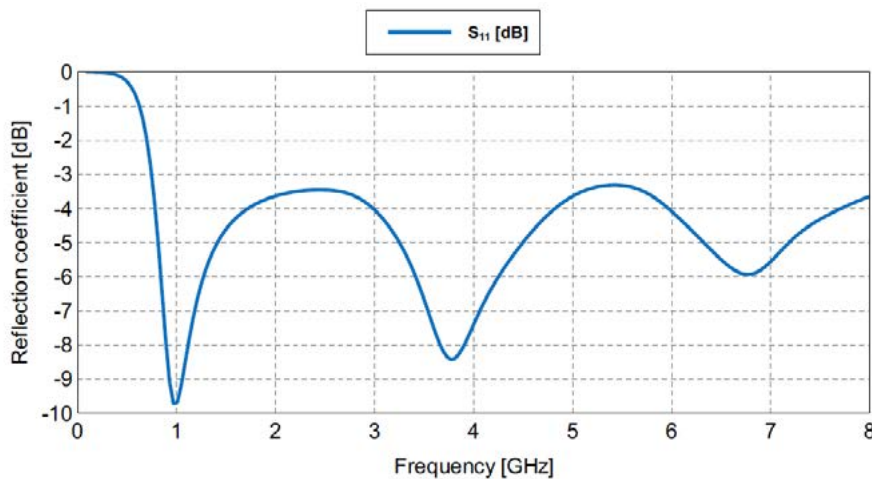


Figura 4. Angulo característico (α_n). a) iteración n=0, b) iteración n=1.



a)



b)

Figura 5. Coeficiente de reflexión. a) iteración $n=0$, b) iteración $n=1$.

En la Figura 5 podemos observar que para la antena de iteración $n=0$, el mínimo coeficiente de reflexión se da para una frecuencia aproximada de 1,9 GHz, próxima a la frecuencia de resonancia de los modos 1 y 2 (1,7 GHz). Las diferencias en el valor de la frecuencia es posible que se deban al efecto del plano de tierra, el cual no es tenido en cuenta en el análisis modal pues la antena no está excitada. Para la antena de iteración $n=1$, aparece un mínimo en el coeficiente de reflexión en aproximadamente 3,7 GHz próxima a la frecuencia de resonancia de los modos 1 y 2, que es de 3,5 GHz. Sin embargo, también se observa otro mínimo en el coeficiente de reflexión que se da para una frecuencia aproximada de 1 GHz que no aparece en el análisis modal. La explicación de este fenómeno se encuentra fuera del alcance de este trabajo, y será analizado en futuras publicaciones.

Conclusiones

El estudio de los modos característicos permite, analizando la significancia modal MS y los ángulos característicos α_n , obtenidos en la simulación, detectar las frecuencias de resonancia propias de la configuración estudiada, es decir las frecuencias para las cuales la radiación es máxima. Por lo tanto, en forma independiente de la excitación es posible predecir las frecuencias de resonancia.

Esto trae como ventaja una reducción significativa de los tiempos de simulación respecto del análisis tradicional, para el que es necesario excitar la antena con un barrido en frecuencia.

Una vez conocidas las frecuencias de resonancia y realizando sólo un número acotado de simulaciones es posible, a partir del campo lejano y del diagrama de radiación obtenidos caracterizar el comportamiento de la antena en el entorno de dichas frecuencias de interés.

Bibliografía

- [1] R. J. Garbacz and R. H. Turpin, "A Generalized Expansion for Radiated and Scattered Fields," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-19, May 1971, pp. 348-358.
- [2] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Theory of Characteristic Modes for Conducting Bodies," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-19, 5, September 1971, pp. 622-628.
- [3] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Computation of Characteristic Modes for Conducting Bodies," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-19, 5, September 1971, pp. 629-639.
- [4] M. Cabedo-Fabres, E. Antonino-Daviu, A. Valero-Nogueira and M. F. Bataller "The Theory of Characteristic Modes Revisited: A Contribution to the Design of Antennas for Modern Applications" IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 5, October 2007.
- [5] Feko Webinar Series 2013. "Get an insight into the radiation from your antennas through Characteristic Mode Analysis".
- [6] Montesdeoca Perez, P. (2005) "Longitud y Área de Curvas Fractales. Dimensión Fractal". Disponible on line:
<<https://personales.ulpgc.es/angelplaza.dma/ficheros/resolver/ficheros/fractales.pdf>>
- [7] Chahuilco Gálvez, V.H. (2012) 2012. "Diseño de antenas fractales para televisión digital para interiores y exteriores". Pontificia Universidad Católica de Perú. Disponible on line:
<<http://hdl.handle.net/20.500.12404/1523>>
- [8] M. Cabedo Fabrés, "Systematic design of antennas using the theory of Characteristic Modes", Phd Dissertation, Universidad politecnica de valencia. February 2007. FEKO EM Simulation Software 7.0. www.feko.info
- [9] Gross, P. (2019) *Diseño óptimo de antenas lente en microondas mediante métodos de simulación* (Tesis de doctorado). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. Disponible on line: <<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/89305>>
- [10] Gross, P. & Vernieri, J. (2016) "Aplicación de la teoría de modos característicos al estudio de absorbedores," 2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ARGENCON.2016.7585321.