

---

Artículos originales

## Arreglo de antenas patch para sistemas de comunicaciones inalámbricas MIMO-LTE (4G)

Eduardo Rodríguez Araque<sup>1</sup> Roberto G. Rojas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fundación Universitaria Cafam, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup> Ohio State University, ElectroScience Laboratory, Ohio, Estados Unidos

### Resumen

Se presenta en este artículo un arreglo de antenas multiple-input-multiple-output (MIMO) que opera en la banda de 2,6 GHz, una de las bandas de operación de Long Term Evolution (LTE), para sistemas de comunicaciones móviles inalámbricas con técnicas de antenas MIMO de cuarta generación (4G). El arreglo de antenas consiste en cuatro antenas compactas tipo patch sobre un sustrato dieléctrico (PCB) de 125 mm x 62,5 mm x 1,27 mm. Modificaciones del plano de tierra (GND) junto con la ubicación sistemática y orientación de cada antena en la cara posterior al plano de tierra del PCB (Printed Circuit Board) juegan un rol muy importante en la reducción sustancial del acoplamiento mutuo, esto generalmente afecta el desempeño de los arreglos MIMO. El rendimiento de este arreglo MIMO fue evaluado a través de simulaciones y mediciones de parámetros de scattering, patrón de radiación, y coeficientes de correlación.

**Palabras clave:** arreglo de antenas, modos característicos, correlación espacial, multiple-input-multiple-output (MIMO), acoplamiento mutuo

### Abstract

In this paper we present a compact MIMO array that operates in the 2.6 GHz for Long Term Evolution (LTE) band and wireless communication systems. The array consists of four compact patch antennas on a dielectric substrate with total dimensions of 125 mm x 62.5 mm x 1.27 mm. Modifications on the ground plane along with systematic placement and orientation of each antenna on top of the substrate plays a key role in reducing the mutual coupling which normally degrades the MIMO array performance. The Performance of this designed MIMO array is assessed through simulations and measurements of the scattering parameters, radiation patterns, and correlation coefficients.

---

**Correspondencia:** Eduardo Rodríguez Araque. Fundación Universitaria Cafam. [eduardo.rodriqueza@unicafam.net.co](mailto:eduardo.rodriqueza@unicafam.net.co)

## Introducción

Los sistemas de arreglos *multiple-input-multiple-output* (MIMO) son técnicas que permiten incrementar la tasa de transmisión de datos y la confiabilidad del enlace de comunicaciones cuando operan en ambientes ricos en scattering (dispersión). Estas técnicas normalmente generan subcanales paralelos poco correlacionados entre las antenas, lo que permite incrementar la capacidad del sistema medida en bit/s/Hz en varios órdenes de magnitud (Foschini y Gans, 1998).

Un factor importante que afecta fuertemente la performance de los sistemas MIMO es el acoplamiento mutuo entre las antenas del arreglo. Altos niveles de acoplamiento mutuo pueden causar incrementos en la correlación entre las señales recibidas de cada antena, y esto a su vez reduce el número de subcanales paralelos independientes que el sistema MIMO puede llegar a generar (Ozdemir, Arvas, y Arslan, 2004). Por tanto, el alto rendimiento que puede ofrecer un sistema MIMO depende básicamente de: 1) las características multitrayecto (*multipath*) del canal de propagación, y 2) el acoplamiento mutuo entre las antenas del arreglo. Es poco probable que podamos modificar el canal de propagación; sin embargo, podemos realizar modificaciones sobre la estructura del arreglo y el plano de tierra (GND) para reducir el acoplamiento mutuo.

Existen técnicas para reducir el acoplamiento mutuo entre las antenas del arreglo; una forma es incrementar el espaciado entre las antenas. Esta técnica es factible cuando las antenas del arreglo son puestas en las estaciones base donde el espaciado puede ser incrementado sin limitaciones; sin embargo, si el arreglo de antenas es construido dentro de los pequeños teléfonos celulares, aumentar el espaciado se hace una tarea muy difícil de realizar y requiere de un trabajo complejo. Esto introduce nuevos retos a los diseñadores de antenas, conforme el espaciado entre las antenas del arreglo se convierte en una fuerte restricción.

Diferentes diseños de antenas han sido propuestos para reducir el acoplamiento mutuo de los arreglos MIMO en pequeños teléfonos celulares. Varios autores (Karaboikis, Soras, y Makios, 2004; Mavridis, Sahalos, y Chryssomallis, 2006), han desarrollado algunas técnicas de inserción de *slots* (conector o puerto de expansión) en las antenas para lograr alto

aislamiento (bajo acoplamiento mutuo). Estas técnicas pueden reducir la longitud de onda de la señal en la vecindad de las antenas y, así, incrementar la separación eléctrica entre las antenas del arreglo (Karaboikis et al., 2004). Otros métodos usan *slots T-shaped* introducidos en el GND para reducir el acoplamiento mutuo como en Park, Choi, Park, Kim (2012). Li y Gong (2008), utilizan *slots T-shaped* junto con *inverted-L-shaped* introducidos en el GND del PCB y logran reducir fuertemente el acoplamiento mutuo.

Adicionalmente, técnicas de neutralización han sido utilizadas para incrementar el aislamiento puerto-a-puerto entre dos antenas a través de una línea de transmisión conectada entre estas antenas. Estas técnicas son utilizadas con antenas PIFA (Chebini, Luxey, Diallo, Lethuc, y Staraj, 2009), y antenas monopolo impresas (See, Adb-Alhameed, Abidi, McEwan, y Excell, 2012). Existen esfuerzos utilizando estructuras de *electromagnetic band gap* (banda prohibida electromagnética, EBG, por sus siglas en inglés), las cuales suprimen las ondas superficiales (*surface waves*), y así se reduce el acoplamiento mutuo entre las antenas (Yang y Rahmat-Samii, 2003). La aplicación de estructuras tipo WAS (defected wall structures) es propuesta por Dadashzadeh, Dadgarpour, y Virdee (2011), junto con *slits* (*slots*) en el GND, separan eléctricamente dos antenas microstrip (*patch*) lo suficiente para proveer un aislamiento de 56 dB. Todas estas técnicas, y otras como las planteadas por Mak, Rowell, y Murch (2008); Yang, Liu, Zhou, y Cui (2012), han sido utilizadas para lograr las especificaciones de aislamiento que requieren los sistemas MIMO para obtener un alto rendimiento.

Aunque estas técnicas permiten un alto nivel de aislamiento, y así obtener una muy baja correlación espacial, es evidente que en muchas ocasiones debemos considerar las características e influencias del sustrato dieléctrico del PCB donde se construye el arreglo de antenas (chasis del teléfono celular), el cual llega a ser un factor crítico en el rendimiento de arreglos MIMO. Estas consideraciones no han sido rigurosamente analizadas en la literatura estudiada. Adicionalmente, la complejidad del diseño y fabricación requiere más atención y consideración.

Una técnica interesante y atractiva para entender el papel del chasis del teléfono sobre el rendimiento de MIMO es a través del análisis

modal, denominado análisis de modos característicos (*Characteristic Modes*, CM). Este análisis provee una visión más profunda de las características resonantes potenciales de una estructura mediante un riguroso examen de los modos naturales de la estructura bajo análisis, en nuestro caso el chasis del teléfono.

La teoría de CM fue introducida por Garbacz (1965), y más tarde refinada por Harrington y Mautz (1971). Básicamente, los CM's son modos de corriente reales que deben ser calculadas numéricamente, corrientes propias de la estructura con alguna forma arbitraria. Estos CM's forman un conjunto completo de corrientes ortogonales sobre la estructura, así como un conjunto de patrones de radiación ortogonales. Esta propiedad nos permite usar la teoría de CM para diseñar un arreglo de antenas MIMO. Como resultado de este modelo de análisis, es posible seleccionar un conjunto de corrientes características sobre el PCB para minimizar el acoplamiento mutuo entre las antenas del arreglo, y si es posible la reducción de la envolvente de la correlación.

El enfoque basado en CM considera que el chasis como estructura fundamental en el diseño, y por medio del examen del conjunto de las corrientes características en el sustrato dieléctrico (PCB), permite al diseñador definir la posición de cada antena del arreglo MIMO.

Otra versión de esta teoría es denominada, red de modos característicos (*Network Characteristic Modes*, NCM), donde los modos son considerados como un conjunto de puertos sobre la estructura bajo estudio.

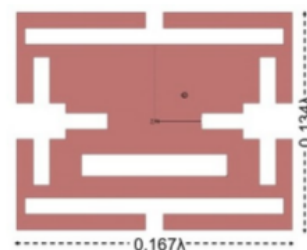
En este trabajo, se propone un nuevo diseño de arreglo MIMO para operar en la banda de 2,6 GHz (4G-LTE). El arreglo de antenas consiste en cuatro antenas patch compactas sobre un PCB. Modificaciones sobre el GND con slots junto con una sistemática ubicación y orientación de cada

antena sobre la superficie superior del PCB juega un papel importante en el aumento considerable del aislamiento, y así la reducción de la correlación entre las antenas del arreglo.

Las modificaciones realizadas sobre el GND, la ubicación y orientación de las antenas sobre el arreglo fueron hechas basadas en la visión profunda que provee la teoría de modos característicos.

#### Métodos

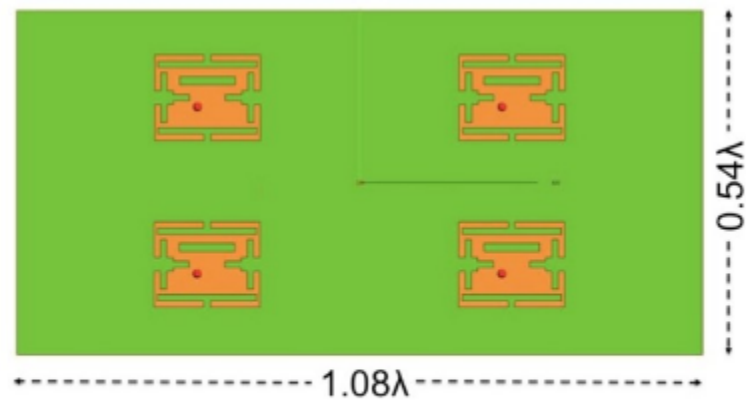
El diseño de la antena fue hecho de forma tal que opera en 2,6 GHz, utilizando técnicas de miniaturización lo que permite diseñar antenas de tamaño pequeño usando algunas ideas de inserción de slots. (Figura 1).



**Figura 1.** Diseño de la antena tipo patch miniaturizada utilizando slots para operar a 2,6 GHz.

El siguiente paso es tomar cuatro antenas iguales a la de la figura 1 y ubicarlas sobre el sustrato

(PCB), y obtener un muy bajo acoplamiento mutuo entre ellas. Para hacer esto, un procedimiento sistemático de modificación del GND y ubicación de las antenas es desarrollado. (Figura 2).



**Figura 2.** La estructura base o de referencia donde se muestra las cuatro antenas operando a 2,6 GHz.

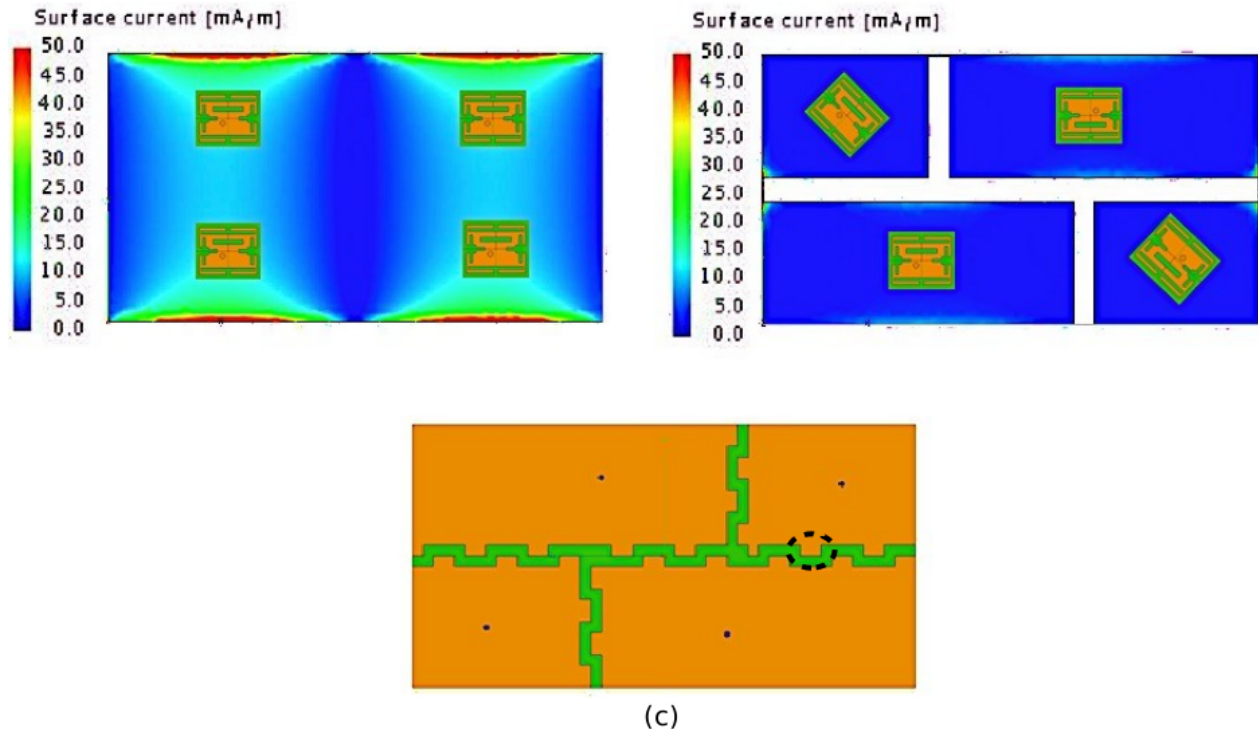
Cada paso de este procedimiento es explicado claramente en las siguientes secciones.

#### **A. Modificaciones del plano de tierra (GND).**

Se inicia con una estructura base de referencia; donde las cuatro antenas tienen la misma orientación como se mostró en la figura 2. Aún ninguna modificación sobre el GND del PCB se ha realizado. Para comenzar, se modifica la estructura con el fin de reducir el acoplamiento mutuo entre las antenas, un diseño de slots es introducido en el GND. Estos slots ayudan a reducir el efecto producido por las ondas de superficie (surface waves) excitadas en el sustrato del PCB. Esta sistemática inserción de

los slots sobre la estructura permiten seleccionar la estructura final del plano de tierra teniendo en cuenta la posición de cada slot así como el espaciado entre las antenas, con el fin de mantener el máximo espaciado posible entre ellas.

Al comparar la distribución de corriente total a 2,6 GHz de la estructura de referencia (figura 3a), y el GND con los slots (aún sin corrugar), se observa que la distribución de corriente decrece sustancialmente cuando los slots han sido introducidos. Esto significa que hay menos interacción entre las antenas y una reducción en el acoplamiento mutuo entre las antenas del arreglo es logrado. (Figura 3a).



**Figura 3.** Distribución de corriente total en mA/m, en la frecuencia de 2,6 GHz de  
 (a) plano de tierra de referencia,  
 (b) plano de tierra modificado con slots (sin corrugar), y  
 (c) plano de tierra modificado con los pequeños slots rectangulares.

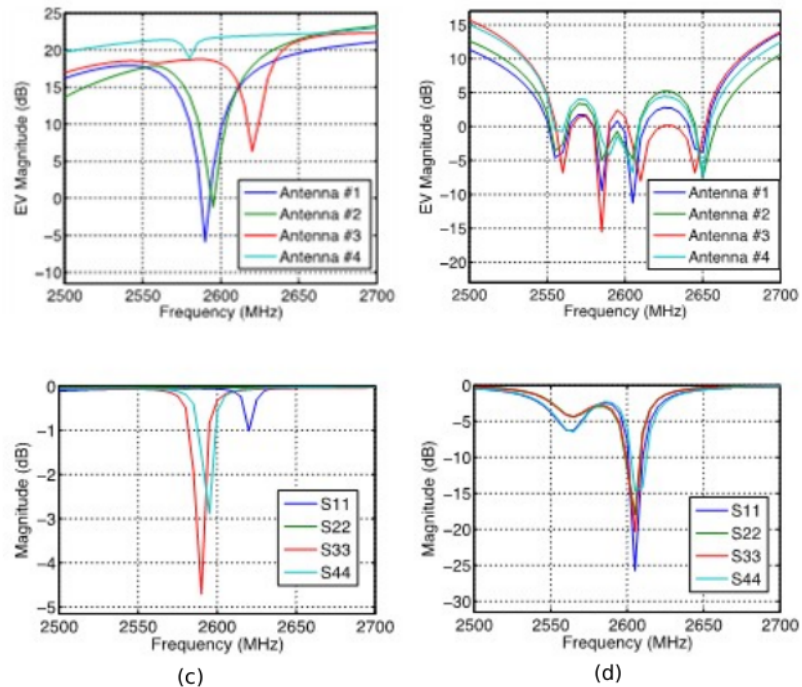
Modificaciones adicionales son elaboradas mediante la inserción de pequeñas estructuras (pequeños slots rectangulares de 5 mm x 2,5 mm) sobre los slots principales para lograr mayor reducción en el acoplamiento mutuo entre las antenas, como se muestra en la figura 3c.

### B. Posición y orientación de las antenas.

Modificaciones adicionales son necesarias para obtener un mayor rendimiento, es decir más reducción en la correlación. La primera modificación se realiza sobre la posición de cada antena sobre el sustrato dieléctrico (PCB). Inicialmente, cada antena se encuentra centrada en el correspondiente GND, luego se realizan modificaciones sobre la orientación de cada antena. Fue observado que una rotación específica de las antenas ayuda a mejorar la diversidad de polarización, así la correlación de las señales que arriban a cada antena del arreglo es reducida.

Una forma de obtener una orientación óptima de cada antena en el arreglo es utilizando el análisis que ofrece CM. El espectro de eigenvalores NCM para las cuatro antenas del arreglo con los slots corrugados en el GND, y cada antena centrada en el correspondiente GND puede ser visto en la figura 4a. El espectro muestra el modo dominante de cada antena.

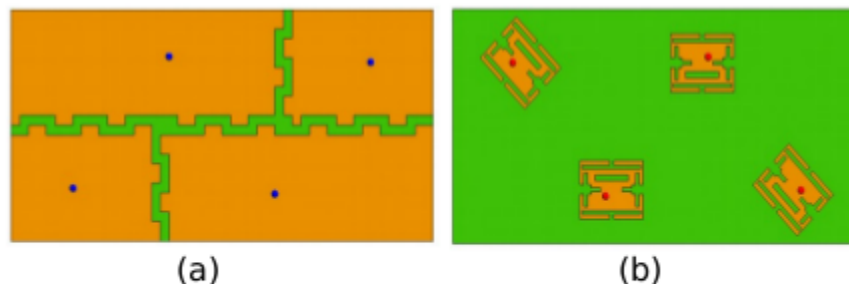
Los modos para las antenas #1 y #2 muestran una buena resonancia cercana a 2,6 GHz (figura 4a), luego al realizar las modificaciones con la ayuda de CM muestra que todas las antenas están bien adaptadas a la frecuencia de 2,6 GHz, el resultado que genera las modificaciones sobre el comportamiento de los modos característicos y los parámetros S11 de cada antena puede ser visto en las figuras 4b y 4d. Un análisis más detallado de CM fue desarrollado para obtener estos resultados.



**Figura 4.** Espectro de eigenvalores NCM del modo dominante de cada antena en dB operando a 2.6 GHz.  
 (a) Eigenvalores antes, y (b) después de aplicar la rotación,  
 (c) pérdidas por retorno (RL) simuladas de cada antena antes, y  
 (d) después de la rotación (ver Fig. 5).

La figura 5 muestra la conformación final de cada antena sobre el PCB, y la geometría del GND. Cuatro antenas tipo patch miniaturizadas son

impresas en la cara superior de un sustrato dieléctrico ( $\epsilon_r=4.5$  y  $\tan\delta=0.002$ ) con dimensiones de 125 mm x 62,5 mm x 1,27 mm.



**Figura 5.** Diseño final del arreglo MIMO.  
 (a) 4-antena sobre el sustrato dieléctrico (PCB).  
 (b) GND modificado con slots corrugados (pequeños triángulos).

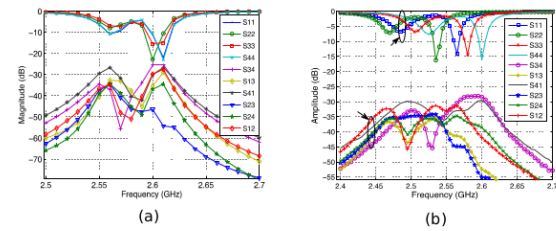


## Resultados

El rendimiento del arreglo de antenas MIMO es analizado a partir de resultados de mediciones y simulaciones de los parámetros S (scattering), acoplamiento mutuo o aislamiento, patrones de radiación, y correlación de envolvente.

### A. Parámetros S y acoplamiento mutuo.

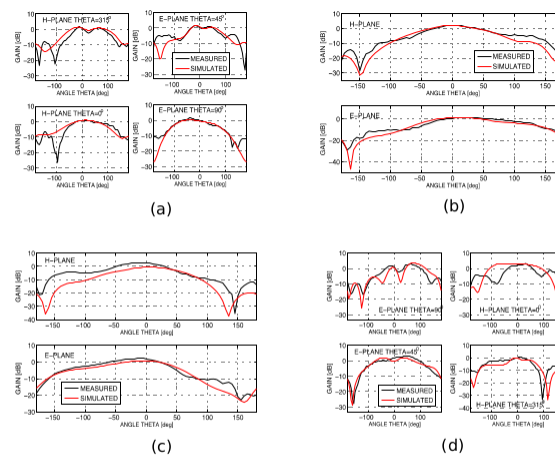
La figura 6 muestra los resultados de simulaciones y mediciones de los parámetros S (respecto a una referencia de 50-ohm) para todas las antenas sobre el sustrato (PCB). Los parámetros S son medidos para cada antena mientras las otras antenas son terminadas con cargas de 50-ohm.



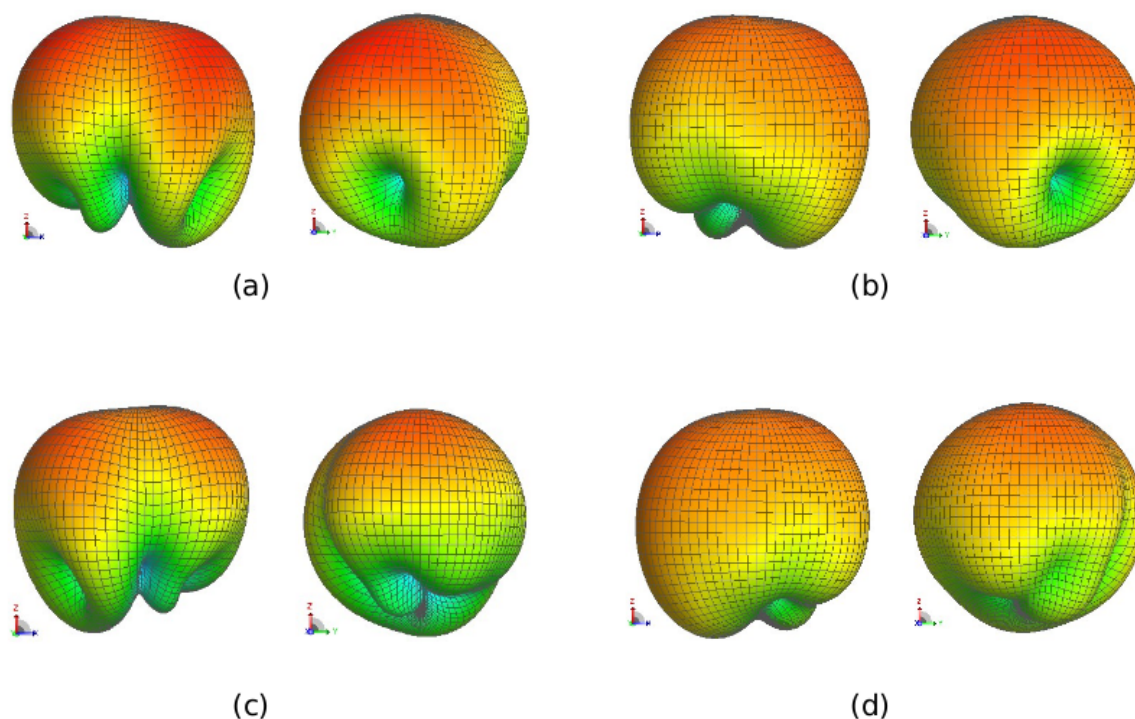
**Figura 6.** Magnitud de los parámetros S del arreglo propuesto en dB.  
(a) Simulados.  
(b) Medidos

### B. Patrones de radiación

Los patrones de radiación en dos dimensiones (2D) simulados y medidos a 2,6 GHz de cada antena del arreglo son mostrados en la figura 7 y en la figura 8 se muestran los patrones de radiación en tres dimensiones (3D) simulados. Las mediciones fueron desarrolladas en la cámara anecoica de *Electro Sciece Laboratory* de *Ohio State University*, y se excitó cada antena mientras que las otras tres antenas fueron terminadas con cargas de 50-ohm.



**Figura 7.** Patrones de radiación en 2D de cada antena medidos (línea negra) y simulados (línea roja).  
(a) Antena #1.  
(b) Antena #2.  
(c) Antena #3.  
(d) Antena #4. Ganancia dada en dB.

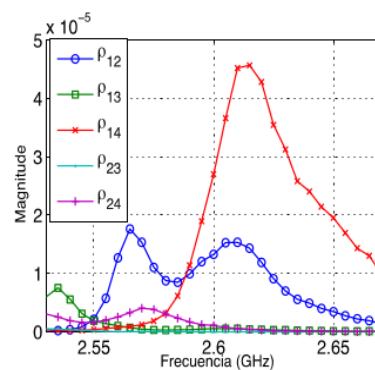


**Figura 8.** Patrón de radiación simulado en el plano E y en el plano H en 3D de cada antena.  
 (a) Antena #1.  
 (b) Antena #2.  
 (c) Antena #3.  
 (d) Antena #4.

### C. Evaluación de la envolvente de correlación.

Una métrica que provee importante información acerca del rendimiento de los arreglos de antenas para ser aplicados en sistemas MIMO es la correlación. Esta métrica puede ser calculada a través de los parámetros S bajo la suposición que las señales que arriban a cada antena del arreglo son uniformemente distribuidas, es decir las direcciones de arribo de cada componente multipath tienen igual probabilidad de arribo, y se asume que las antenas no tienen pérdidas (Blanch, Romeu y Corbella, 2003). Los coeficientes de correlación para un arreglo de N-antenas puede ser calculado como se ha planteado por varios autores (Dama, Hussaini, Abd-Alhameed, Jones, McEwan, Sadeghpour, y Rodríguez, 2011).

Los resultados de los coeficientes de correlación para las cuatro antenas a través de los parámetros S son mostrados en la figura 9.



**Figura 9.** Magnitud de los coeficientes de correlación calculados a través de los parámetros S.



$$\rho_{ij,n} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N S_{i,n} S_{n,j} \right|}{\prod_{k=(i,j)} \left[ 1 - \sum_{n=1}^N S_{i,n} S_{n,k} \right]} \quad (1)$$

## Discusión

El alto desempeño que puede llegar a ofrecer un arreglo de antenas MIMO en los sistemas de comunicación inalámbricos está determinado por las características de propagación donde estos arreglos de antenas operan o están operando, y por los efectos del acoplamiento mutuo entre los elementos del arreglo de antenas, como se mencionó anteriormente. Ahora bien, los resultados indican que el acoplamiento mutuo medido ( $S_{ij}$ ,  $i \neq j$ ) entre las antenas del arreglo se ha reducido fuertemente, lo indica el valor de -28 dB que se puede observar en la figura 6b. Los valores medidos del parámetro de pérdidas por retorno ( $S_{ij}$ ,  $i=j$ ) son buenos, a pesar del desplazamiento en la frecuencia de operación (2,6 GHz) de las 4 antenas. Los parámetros S medidos con respecto a los valores obtenidos de simulaciones muestran diferencias que están relacionadas con el proceso de construcción del arreglo de antenas, y a las características físicas del material del PCB utilizado en la fabricación.

Sobre la base de los parámetros S son calculados los coeficientes de correlación. Los coeficientes calculados con los parámetros S medidos se mostraron en la figura 9 y en ella se observa que la magnitud de los coeficientes en la frecuencia de 2,6 GHz es menor a 0,000028, debido, en primer lugar, a la gran reducción del acoplamiento mutuo entre los elementos del arreglo de antenas diseñado, y en segundo lugar a la diversidad presente en el patrón de radiación de cada antena del arreglo. Por tanto, los valores observados de estos coeficientes aumentan la generación de subcanales independientes, pero sin olvidar que la generación de más subcanales paralelos independientes depende también de las características físicas del canal de propagación MIMO.

Ahora bien, es cierto que el canal de propagación MIMO afecta en muy buena medida la generación de subcanales paralelos e independientes. Sin embargo, podemos superar algunos efectos del canal de propagación, efectos como el *multipath fading* a través de la diversidad del patrón. La

diversidad del patrón significa, en términos muy generales, que cada antena del arreglo de antenas tiene un patrón de radiación diferente, esta característica se puede observar en las figuras 7 y 8. Adicionalmente, los patrones de radiación medidos y simulados muestran una muy buena precisión. La máxima ganancia lograda es de 3,14 dBi.

## Conclusiones

El arreglo propuesto de cuatro antenas miniaturizadas es confiable y aplicable para operar en sistemas MIMO en la frecuencia de 2,6 GHz (banda LTE - AWS). La modificación del GND con slots corrugados (pequeños triángulos metálicos) junto con una sistemática ubicación y orientación de las antenas (logrando diversidad especial y de polarización) utilizando la visión más profunda que ofrece la teoría de modos característicos permitió que el arreglo de antenas MIMO construido tenga alto desempeño para ser utilizado en sistemas de comunicaciones inalámbricas. Adicionalmente, las características de radiación observadas en el arreglo propuesto tienen la habilidad de superar problemas causados por la atenuación debido a los efectos de la propagación multipath ya que los patrones generados proveen diversidad en su forma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blanch, S., Romeu, J. & Corbella, I. (2003). Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description. *Electronics Letters*, 39(9), 705-707.
- Chebihi, A., Luxey, C., Diallo, A., Le-Thuc, P. & Staraj, R. (2009). A new method to increase the port-to-port isolation of a compact two-antenna umts system. *Antennas and Propagation EuCAP, 3rd European Conference*, 1098-1101.
- Dadashzadeh, G., Dadgarpour, A., & Virdee, B. (2011). Mutual coupling suppression in closely spaced antennas. *Microwaves and Antennas Propagation of IET*, 5(1), 113-125.
- Dama, Y. A., Hussaini, A., Abd-Alhameed, R. A., Jones, S. M., McEwan, & Rodríguez, J. (2011). Envelope correlation formula for (n,n) MIMO antenna array including power losses. *Electronics, Circuits and Systems ICECS, 18th IEEE International Conference*, 5-12.
- Garbacz, R. (1965). Modal expansions for

resonance scattering phenomena. Proceedings of the IEEE, 53(8), 324-357.

Harrington, R., & Mautz, J. (1971). Theory of characteristic modes for conducting bodies. Antennas and Propagation on IEEE Transactions, 19(5), 622-628.

Karaboikis, M., Soras, C., Tsachtsiris, G., & Makios, V. (2004). Compact dual-printed inverted-f antenna diversity systems for portable wireless devices. Antennas and Wireless Propagation Letters of IEEE, 3(1), 9-14.

Li, Z., Du, Z., & Gong, K. (2008). A novel wideband printed diversity antenna for mobile phone application. Antennas and Propagation Society International Symposium of IEEE, 1-4.

Mak, A., Rowell, C., & Murch, R. (2008). Isolation enhancement between two closely packed antennas. Antennas and Propagation of IEEE Transactions, 56(11), 3411-3419.

Mavridis, G., Sahalos, J., & Chryssomallis, M. (2006). Spatial diversity two-branch antenna for wireless devices. Electronics Letters, 42(5), 266-268.

Ozdemir, M., Arvas, E., & Arslan, H. (2004). Dynamics of spatial correlation and implications on mimo systems. Communications Magazine of IEEE, 42(6), S14-S19.

Park, J., Choi, J., Park, J.Y., & Kim, Y. S. (2012). Study of a t-shaped slot with a capacitor for high isolation between mimo antennas. Antennas and Wireless Propagation Letters of IEEE, 11, 1541-1544.

See, C. H., Abd-Alhameed, R., Abidin, Z., McEwan, N., & Excell, P. (2012). Wideband printed mimo/diversity monopole antenna for wifi/wimax applications. Antennas and Propagation of IEEE Transactions, 60(4), 2028-2035.

Yang, F., Rahmat-Samii, Y. (2003). Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (ebg) structures: a low mutual coupling design for array applications. Antennas and Propagation of IEEE Transactions, 51(10), 2013-2024.

Yang, X. M., Liu, X. G., Zhou, X. Y. & Cui, T.J. (2012). Reduction of mutual coupling between closely packed patch antennas using waveguided metamaterials. Antennas and Wireless Propagation Letters of IEEE, 11(2), 389-391.