

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN ARREGLO MIMO CONFORMADO POR ELEMENTOS DE MICROCINTA EN APLICACIONES DE BANDA ANCHA RUMBO A 5G

*ANALYSIS AND CHARACTERIZATION OF A MIMO ARRAY
CONFIGURED FROM MICROSTRIP ELEMENTS IN BROADBAND
APPLICATIONS TOWARDS 5G*

Ulises Pineda Rico

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
u.pinedarico@gmail.com

Raúl Machuca Galicia

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
ra.machuca.ga@gmail.com

Miguel Ángel Martínez Hernández

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
miguelangelmtzh@hotmail.com

Marco Aurelio Cárdenas Juárez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
marco.cardenas@uaslp.mx

Enrique Stevens Navarro

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
estevens@galia.fc.uaslp.mx

Armando Arce Casas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
armando.arce@uaslp.mx

Recepción: 17/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

El interés de mejorar los servicios de comunicación móvil ha derivado en el desarrollo de diversas tecnologías que llevarán a cabo el funcionamiento de la quinta generación (5G). Tal es el caso del MIMO (por sus siglas en inglés “Multiple-Input and Multiple-Output”) masivo, evolución de los sistemas MIMO comúnmente vistos en redes de cuarta generación como LTE. En este documento, se presenta el diseño de una antena de microcinta que se puede adaptar a diversas frecuencias

de operación. Además, se muestra un análisis de ésta, en diversos arreglos para comprobar su tendencia a mejorar la eficiencia radiada como se haría en los sistemas de MIMO masivo. Asimismo, se hicieron cambios sutiles en la antena para que su funcionamiento se adaptara a alguna de las bandas de interés para las tecnologías de 5G. Una vez comprobado su funcionamiento mediante el simulador, y su caracterización; se ha llevado a la fabricación y caracterización de un solo elemento de antena a través de equipo de medición especializado.

Palabras Claves: 5G, antenas de microcinta MIMO, mediciones reales.

Abstract

The interest to improve the services of mobile communication has derived in the development of diverse technologies that will carry out the operation of the fifth generation (5G). Such is the case of the massive MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output), evolution of the MIMO systems commonly seen in fourth generation networks such as LTE. In this document, the design of a microstrip antenna that can be adapted to different operating frequencies is presented. In addition, an analysis of this is shown, in various arrangements to check its tendency to improve radiated efficiency as would be done in massive MIMO systems. Also, subtle changes were made to the antenna so that its operation would adapt to some of the bands of interest for 5G technologies. Once proved its operation through the simulator and its characterization; It has led to the manufacture and characterization of a single antenna element through specialized measurement equipment.

Keywords: 5G, microtape antennas, real measurements.

1. Introducción

En la década de los 1980s, la telefonía móvil (primera generación 1G) solo ofrecía servicios básicos de voz con tasas de transferencia de hasta 2.4 kbps y empleando únicamente protocolos analógicos. En la década de 1990, con la llegada de la segunda generación (2G) y el uso de los primeros estándares digitales como GSM (Global System for Mobile Communications) y CDMA (Code Division Multiple Access) se agregaba el servicio de mensajes de texto. GSM ofrecía una tasa de

transferencia de hasta 9.6 kbps. Es hasta la tercera generación (3G) en la década 2000, que se refleja un mayor crecimiento en la demanda y acceso a estos servicios, diseñada para la transmisión de voz y la transferencia de datos. Con el estándar UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) se tenían tasas de transferencia de hasta 2 Mbps y se considera como la primera banda ancha móvil. En la década actual, se introdujo la cuarta generación (4G), diseñada principalmente para la transferencia de datos y usando protocolos IP (Internet Protocol) se ofrecen tasas de transferencia de hasta 300 Megabits por segundo.

En la actualidad, el interés de contar con dispositivos inalámbricos que alcancen tasas de transferencia aún mayores ha ocasionado que se investiguen y desarrollen mejoras a los sistemas actuales usados por las tecnologías de 4G. En 4G, los estándares están dominados por la tecnología MIMO, por lo que para los sistemas de quinta generación (5G), en el cual se esperan tasas de transferencia de hasta 10 Gbps, una de las tecnologías propuestas es la tecnología de MIMO masivo [Huang, 2018].

El presente trabajo, tiene como objetivo general: el estudio, desarrollo y caracterización de una antena que tenga potencial para su uso en plataformas de MIMO masivo. Resolviendo o definiendo problemas básicos de diseño como: impedimentos en hardware, arreglos de antenas, así como las propiedades físicas en la fabricación de los elementos que conforman el sistema MIMO.

Antenas de Microcinta

Las antenas de microcinta toman gran importancia en aplicaciones en donde es necesario poder reducir el tamaño y en las cuales se trabaja con grandes frecuencias de operación (anchos de banda amplios). En la tabla 1 se pueden ver las ventajas y desventajas de este tipo de antenas.

Las antenas de microcinta, figura 1, consisten de una cinta metálica muy delgada ($L \ll \lambda_0$, donde λ_0 es la longitud de la onda en el espacio libre), la cual se coloca sobre un plano de tierra separados por una distancia pequeña relacionada con la longitud de onda ($h \ll \lambda_0$, usualmente $0.0003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$). Este tipo de antenas están diseñados para que su patrón de radiación sea normal a la línea conductora.

Tabla 1 Ventajas y desventajas de las antenas de microcinta.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Miniaturización • Integración a superficies planas y no planas • Versátiles en: impedancia, patrón de radiación, polarización y frecuencia de resonancia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja potencia de radiación • Eficiencia en función de los materiales de construcción • Ancho de banda delimitado por propiedades físicas

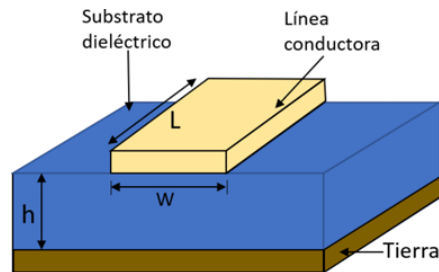


Figura 1 Ejemplo de antena de microcinta.

Dependiendo de la aplicación que se requiera para una línea de microcinta, el grosor del sustrato y la permitividad dieléctrica varía. Al modificar estos parámetros se logra que un tipo de onda, de los mencionados anteriormente, sea el predominante. Para las líneas de transmisión y circuitos se busca que la mayor parte de la energía se encuentre confinada entre los conductores, por lo que se elige un sustrato delgado en comparación a la longitud de onda de la señal y una permitividad dieléctrica muy elevada. Haciendo esto se consigue que dominen las ondas guiadas. Pero en las antenas se busca exactamente lo contrario, y para evitarlo se elige un sustrato grueso en comparación con la longitud de onda y la permitividad dieléctrica debe de ser baja. Por lo que se consigue que ahora sean las ondas radiadas las dominantes [Balanis, 1997]. De lo antes mencionado se deduce que al cambiar las propiedades del sustrato se pueden cambiar las propiedades de la antena. A mayor grosor se aumenta el ancho de banda de la antena y disminuye la frecuencia de operación. Y si se aumenta la constante dieléctrica, sin modificar el grosor, se puede aumentar o disminuir la frecuencia de operación de la antena.

La Quinta Generación

Las tecnologías de información y comunicaciones se han considerado como piezas clave para el desarrollo social y económico, debido a que se han creado nuevos beneficios que no habían sido experimentados con anterioridad. Desde que

la 4G hizo su aparición, las personas han podido experimentar de los servicios de banda ancha desde sus dispositivos móviles, y la experiencia de los usuarios finales ha llegado a equipararse a la de las conexiones cableadas. A pesar de esto, para las conexiones de 4G es difícil proveer servicios móviles que requieran de una gran velocidad, respuesta rápida, alta fiabilidad y eficiencia energética. Por lo tanto, estos factores son esenciales para la 5G:

- *Velocidad:* la 5G promete mejorar la experiencia de los usuarios, ofreciendo nuevas aplicaciones y servicios capaces de alcanzar velocidades de varios Gigabits, con tasas de datos de hasta 10 Gbps, de 10 a 100 veces mejor que las redes de 4 y 4.5G.
- *Baja latencia:* con valores incluso menores de 1ms, lo que resulta adecuado para servicios de importancia crítica con datos sensibles al tiempo.
- *Conectividad masiva:* La empresa Gartner, consultora e investigadora de las tecnologías de la información, prevé que para la siguiente década habrá más de 21 billones de dispositivos conectados al Internet de las cosas (IoT). Estos dispositivos tendrán requisitos de red muy variados, por lo que las redes de 5G deberán manejar la escala masiva y los desafiantes requisitos de conectividad para todos estos diversos dispositivos.

Aunque para la década siguiente, 2020-2030, se busca la implementación de la tecnología 5G, las autoridades reguladoras aún no establecen el estándar que indique las bandas de frecuencia en las que se debe de trabajar. Pese a esto, las grandes compañías, se han montado camas de pruebas para la investigación de dicha tecnología, y han propuesto diversas bandas de frecuencia que son de su interés. En la tabla 2, se observa en resumen las bandas de frecuencia propuestas para ser utilizadas en escenarios de banda ancha móvil mejorada [Shafi, 2017].

Tabla 2 Frecuencias utilizadas por los principales desarrolladores de 5G.

	Huawei		Samsung	Ericsson		Nokia
Frecuencia (GHz)	4.65	2.3	27.925	14.87	14.9	73.5
Ancho de Banda (MHz)	200	100	800	730.5	400	1000

Los Arreglos de Antenas MIMO y su Evolución hacia 5G

Los sistemas MIMO (sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas) son una tecnología que permite multiplicar la capacidad de un enlace usando múltiples antenas receptoras y transmisoras que aprovechan la propagación multirrayectoria. MIMO se convirtió en un aliado poderoso para las comunicaciones inalámbricas, estando presente en estándares como, IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.11ac (Wi-Fi), y en tecnologías de cuarta generación (4G) celular, como LTE. Existen casos especiales de los sistemas de comunicación MIMO, como son: SISO, SIMO y MISO:

- SISO: single-input and single-output; cuando tanto el transmisor como el receptor cuentan con una sola antena. El caso del radio convencional.
- MISO: multiple-input and single-output; cuando el receptor cuenta con una sola antena.
- SIMO: single-input and multiple-output; cuando el transmisor tiene una sola antena.

La principal ventaja de los sistemas MIMO es el incremento en la capacidad del sistema mediante la diversidad espacial. Así que, a mayor número de antenas mayor crecimiento en la capacidad del enlace. En este caso, se presenta el MIMO masivo como una tecnología que recoge todos los beneficios de los sistemas MIMO tradicionales, pero a una mayor escala. Con MIMO masivo, se piensa en sistemas que tengan arreglos de antenas con unos pocos cientos de antenas sirviendo simultáneamente decenas de terminales en el mismo recurso de tiempo-frecuencia. MIMO masivo permitirá el desarrollo de las futuras redes de banda ancha (por ejemplo, 5G); las cuales serán eficientes en: uso de energía, seguridad, robustez, uso eficiente de espectro [Wu, 2018].

2. Métodos

En el artículo [Chen, 2017] se propone un diseño de antena de tipo microcinta como el que se muestra en la figura 2. Las características de este diseño son:

- Dimensiones del elemento: 70 × 70 mm.
- Frecuencia de operación: bandas de 2.4 a 2.62 GHz y 3.4 a 3.6 GHz.

- Placa PCB: FR4~2.2 de constante dieléctrica y cobre como conductor.

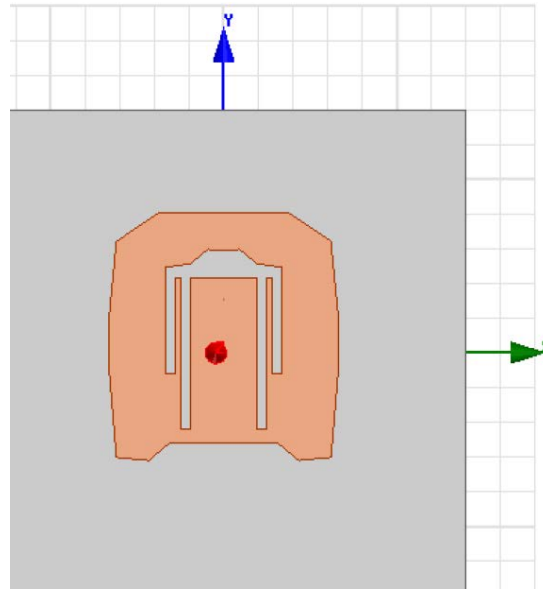


Figura 2 Aspecto de forma de antena de microcinta de referencia.

El elemento de la antena es creado a partir de una microcinta cuadrada de 31mm que tiene dos aberturas de forma U (U slot), estas aberturas tienen un ancho de 1.4 mm; estos son deformados a una composición de polígonos usando el sistema de optimización del software de simulación CST microwave studio [Chen, 2017].

Entre las propiedades deseables del elemento elegido tenemos:

- Implementación sencilla en PCB.
- Capacidad de ajustarse a diferentes bandas (multibanda) mediante ajuste de dimensiones.
- Caracterización del elemento del arreglo de forma experimental.
- Fácil integración de los elementos en aplicaciones MIMO y MIMO masivo.

Por lo tanto, en subsecuentes secciones se procederá a caracterizar, a partir del elemento citado, arreglos construidos a partir de este; obteniendo sus parámetros de dispersión, así, como su patrón de radiación. Para esto se utiliza la herramienta de diseño y simulación electromagnética HFSS. Además, sabiendo el comportamiento de las antenas con base en la teoría fundamental, se pueden

alterar las características físicas del elemento para modificar su frecuencia de operación. Estos cambios se pueden hacer en diversos factores, como en las dimensiones físicas de la antena o el cambio en su dieléctrico.

Herramientas de Simulación por Software

Las herramientas de simulación son de suma importancia para el desarrollo y cálculo de parámetros cuando se está diseñando arreglos de antenas de microcinta. Esto, debido a que ofrecen una alternativa en la realización de pruebas físicas con un costo de tiempo mínimo. De esta forma, se pueden elaborar distintos diseños en diferentes escenarios reales para su eventual análisis, permitiendo adaptar las características del modelo propuesto y encontrar con antelación posibles problemas que pudieran surgir durante el proceso.

Las herramientas software de simulación electromagnética están basadas en dos tipos de técnicas técnicas rigurosas y técnicas asintóticas. Las primeras, tal como el Método de Momentos (MoM), Finite Difference Time Domain (FDTD), o el Método de Elementos Finitos (FEM), están basadas en la discretización de la geometría en elementos diferenciales. Por lo que, para estructuras eléctricamente grandes, los recursos computacionales requeridos se incrementan y estas técnicas llegan a convertirse en una limitación dado la disponibilidad de estos recursos.

Por otro lado, en contraparte, las técnicas asintóticas tienen la principal ventaja de que su costo computacional es independiente de la frecuencia de análisis. Sin embargo, la precisión de los resultados incrementa al incrementar la frecuencia. Por lo que estos métodos son especialmente adecuados para analizar problemas eléctricamente grandes, particularmente en el proceso de diseño donde el número de análisis puede ser muy alto. Las técnicas más populares son Óptica Geométrica junto con Teoría Uniforme de la Difracción (GO/UTD) y la Física Óptica junto con la Teoría Física de la Difracción (PO/PTD). La precisión de ambas técnicas está íntimamente relacionada con la fidelidad del modelo geométrico comparado con el escenario real. Esta relación de dependencia directa hace que la exactitud en los resultados obtenidos mejore cuanto más se aproxime el modelo geométrico a la estructura real [Lozano,2011].

Simulador de Campo Electromagnético en Tres Dimensiones para RF y Diseño Inalámbrico

ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación, y uno de estos simuladores es el HFSS (High Frequency Structure Simulator) [Huang, 2018]. ANSYS HFSS es un software de simulación electromagnética, que facilita la visualización en tres dimensiones (3D), para el diseño y simulación de dispositivos electrónicos de alta frecuencia, como son las antenas, arreglos de antenas, componentes de RF o microondas, placas de circuito impreso, entre otros. HFSS usa la técnica de FEM. Este es un proceso en donde una estructura es subdividida en muchas subsecciones pequeñas llamadas elementos finitos. Los elementos finitos usados por HFSS son tetraedros y toda la colección de tetraedros es llamada malla. Se encuentra una solución para los campos dentro de los elementos finitos, y estos campos están interrelacionados de manera que las ecuaciones de Maxwell se satisfacen a través de los límites entre los elementos. Proporcionando una solución de campo para toda la estructura original. Una vez que se ha encontrado la solución de campo, se determina la solución de matriz S generalizada. Matemáticamente, HFSS resuelve para el campo eléctrico E usando la ecuación 1, sujeto a excitaciones y condiciones de límites.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon_r E = \vec{J}_{fuente}^1 \quad (1)$$

Donde $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$, $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$, $k_0^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0$, $\mu_0 = \frac{\omega^2}{c^2}$; ϵ_r y μ_r son la permitividad relativa y la permeabilidad respectivamente y c es la velocidad de la luz en el espacio libre. \vec{J}_{fuente}^1 es utilizado para representar cualquier fuente.

Para el cálculo del campo magnético H , HFSS usa ecuación 2.

$$H = \frac{1}{\omega \mu} \nabla \times E \quad (2)$$

HFSS deriva una matriz de elementos finitos usando las ecuaciones de campo para calcular los campos y la matriz S asociada con una estructura excitada por puertos.

El procedimiento que se lleva a cabo para solucionar el problema se resume en:

- Una estructura geométrica se representa por una malla de elementos finitos usando elementos tetraédricos.
- Se define una función de prueba, W_n , para cada tetraedro, resultando en miles de funciones base.
- Las ecuaciones de campo se multiplican por W_n e integradas en el volumen de la solución

Este proceso produce miles de ecuaciones para $n = 1, 2, \dots, N$, ecuación 3..

$$\int \left(W_n \cdot \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon_r W_n \cdot E \right) dV = 0 \quad (3)$$

Después de manipular estas N ecuaciones y usando los teoremas de Green y de Divergencia se obtiene ecuación 4.

$$\int_V \left[(\nabla \times W_n) \cdot \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon_r W_n \cdot E \right] dV = \int_S (\text{términos de límite}) dS \quad (4)$$

para $n = 1, 2, \dots, N$. Donde el campo eléctrico E , está definido por ecuación 5.

$$E = \sum_{m^x m} W_m, \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

Reescribiendo ecuación 4, obtenemos ecuación 6.

$$\sum X_m \int \left[(\nabla \times W_n) \cdot \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times W_m \right) - k_0^2 W_m \cdot W_n \right] dV = \int_S (\text{términos de límite}) dS \quad (6)$$

para $n = 1, 2, \dots, N$. La ecuación 6 tiene la forma de ecuación 7.

$$\sum x_m A_{n,m} = b_n, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

Ó, por medio de ecuación 8.

$$Ax = b \quad (8)$$

En esta ecuación de matrices, A es conocida como una matriz $N \times N$ que incluye cualquier término de condición de límite aplicado, mientras que b contiene los puertos de excitación, fuentes de voltaje y corriente y las ondas incidentes. E puede calcularse cuando la ecuación 8 se resuelve para x .

3. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación de la antena de microcinta elegida para conformar los arreglos de MIMO y MIMO masivo. Por cuestiones de complejidad computacional, se optó por analizar la efectividad del elemento en arreglos de pequeña a mediana escala, como se muestra en la figura 3.

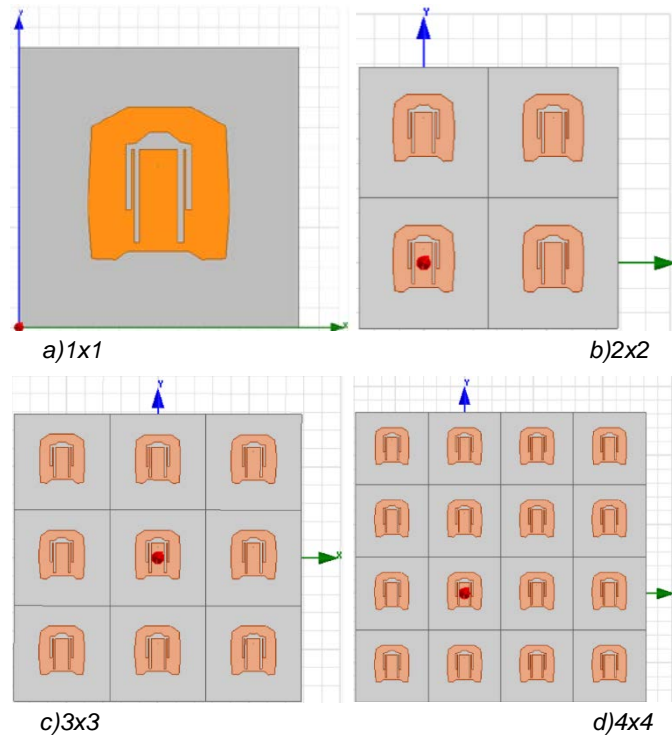


Figura 3 Configuración de los arreglos MIMO.

En una etapa inicial, mediante el software HFSS, se caracterizó primordialmente el comportamiento de la antena en alguna de las frecuencias 5G de interés para registrar y analizar su comportamiento en términos de su patrón de radiación y su pérdida de retorno. De esta forma, podríamos analizar si la antena se encontraba centrada en la banda de interés, su ancho de banda obtenible, ganancia, así como la simetría y/o regularidad de su patrón de radiación. Así, se puede observar de las figuras 4 y 5, que el comportamiento de la antena (y del arreglo de antenas) muestra una estabilidad en cuanto a la banda de interés, así como en la simetría del patrón de radiación. Adicionalmente, en cuanto a los arreglos, se nota que al incrementar

el orden del arreglo MIMO; la ganancia de los elementos en conjunto se incrementa, cumpliendo así con lo esperado en un sistema de múltiples antenas.

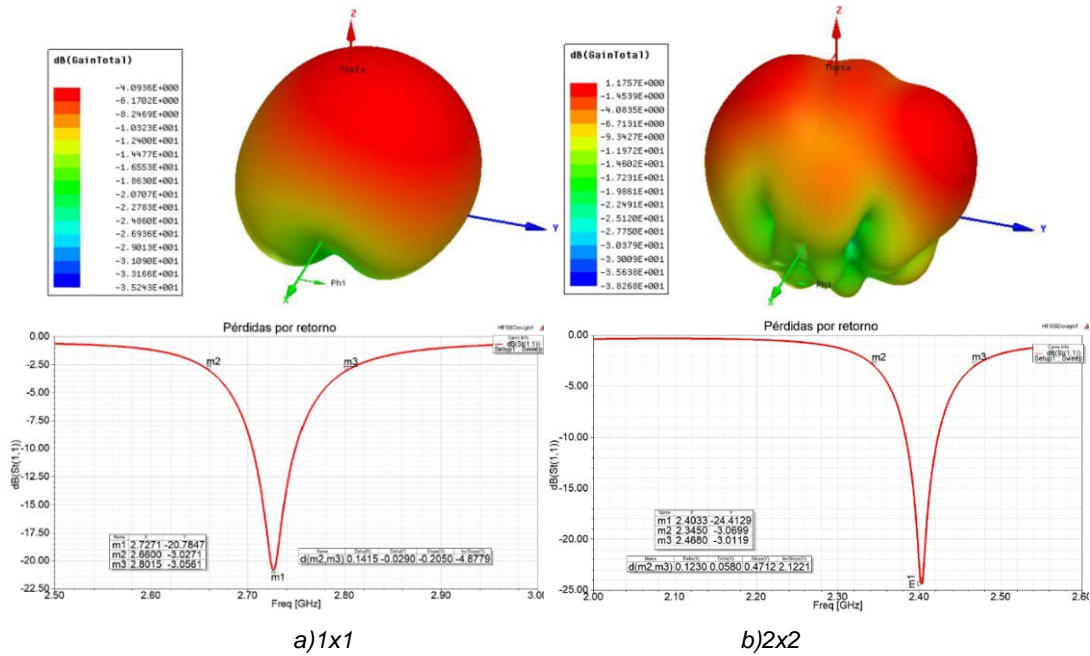


Figura 4 Patrón de radiación y pérdidas por retorno de los arreglos MIMO, 1x1 y 2x2.

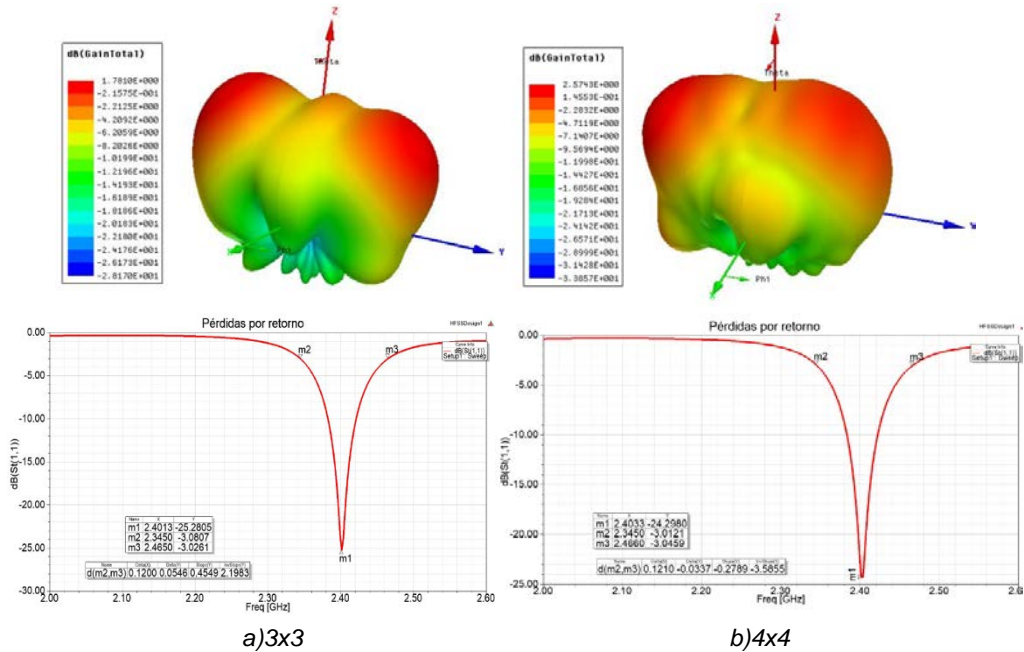


Figura 5 Patrón de radiación y pérdidas por retorno de los arreglos MIMO, 3x3 y 4x4.

En la figura 6, se resume los valores obtenidos y mostrados en las figuras 4 y 5 en términos de la ganancia obtenida. Se muestra de forma gráfica cómo la diversidad espacial de los arreglos tiene una tendencia al alta (como es de esperarse) en cuanto a la ganancia obtenida conforme el arreglo se incrementa. Cabe señalar que la ganancia obtenida es resultado de una separación constante y de un mayor número de elementos de antena, la agrupación tiene una mayor dimensión y por lo tanto se tiene esta mayor ganancia y directividad, lo que es resultado de la interacción de la radiación de los distintos elementos de la agrupación en función de su potencia, haciendo que las interferencias de los campos radiados y potencia por cada elemento nos proporcione la ganancia total (expresada en función de radiador isotrópico) y el diagrama de radiación deseado.

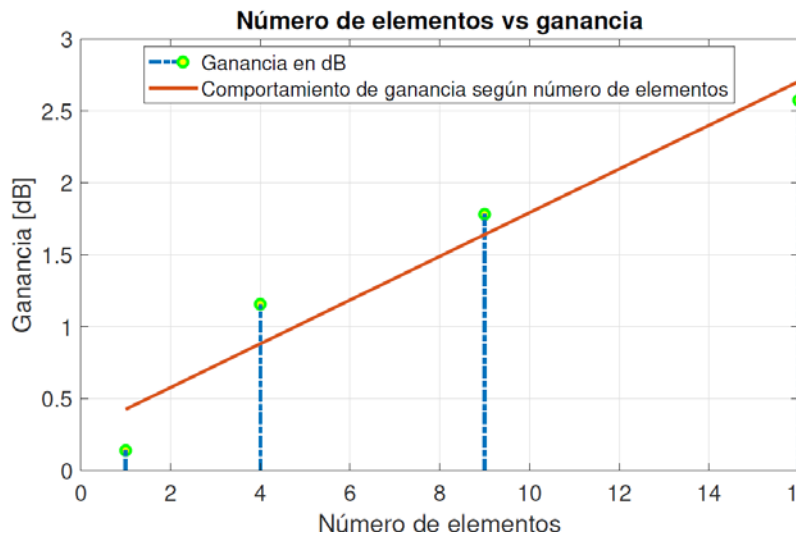


Figura 6 Análisis de ganancia en función del tamaño del arreglo MIMO.

Una vez comprobada la eficacia de la antena, así como de los arreglos construidos a partir de ella, se da el siguiente paso: de simulación a implementación. Para esto se fabricaron los mismos arreglos mostrados en la figura 3 en placa de PCB, como se muestra en la figura 7.

En esta parte, se repitieron las pruebas de caracterización realizadas en la simulación, pérdidas de retorno, patrón de radiación, utilizando equipo de medición de alto desempeño: Analizador de Redes Fieldfox y Escáner RFXpert (figura 8).

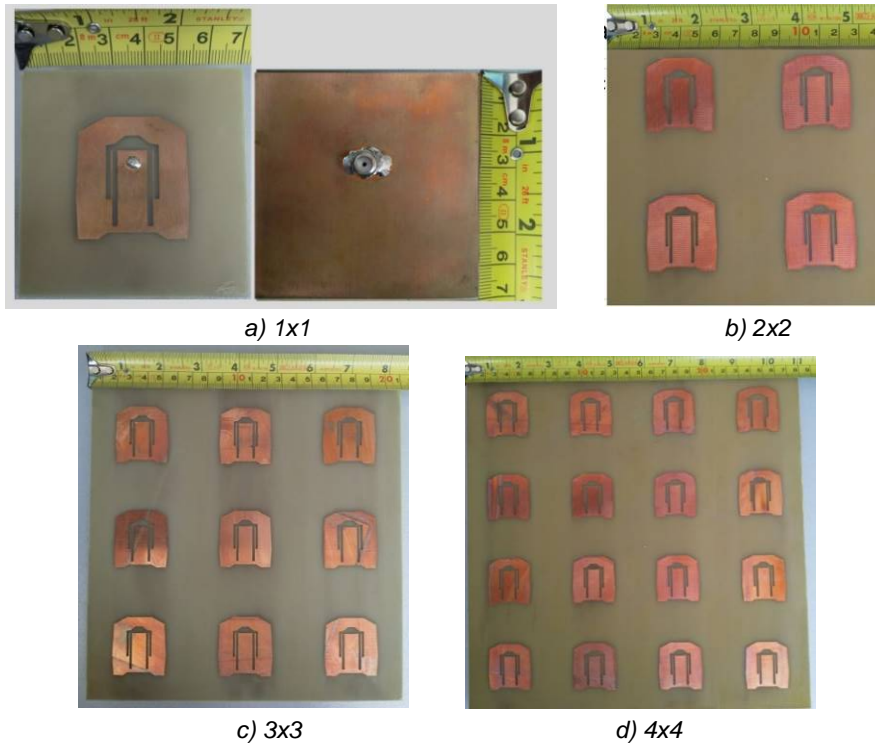


Figura 7 Antena de microcinta fabricada en PCB, arreglos MIMO.



Figura 8 Equipo de medición de alto desempeño con la antena en proceso de análisis.

En la figura 9, se muestran los resultados experimentales obtenidos mediante el equipo de medición previamente citado. Cabe destacar la gran similitud existente entre lo obtenido mediante el simulador y los resultados reales para la frecuencia de operación específica; sin embargo, durante la única medición realizada se puede observar en la figura 9b que dentro del rango de barrido la antena también es resonante a otras frecuencias. De esta forma, se puede concluir la eficacia y certeza del simulador, así como el buen diseño de la antena de microcinta [Chen, 2017].

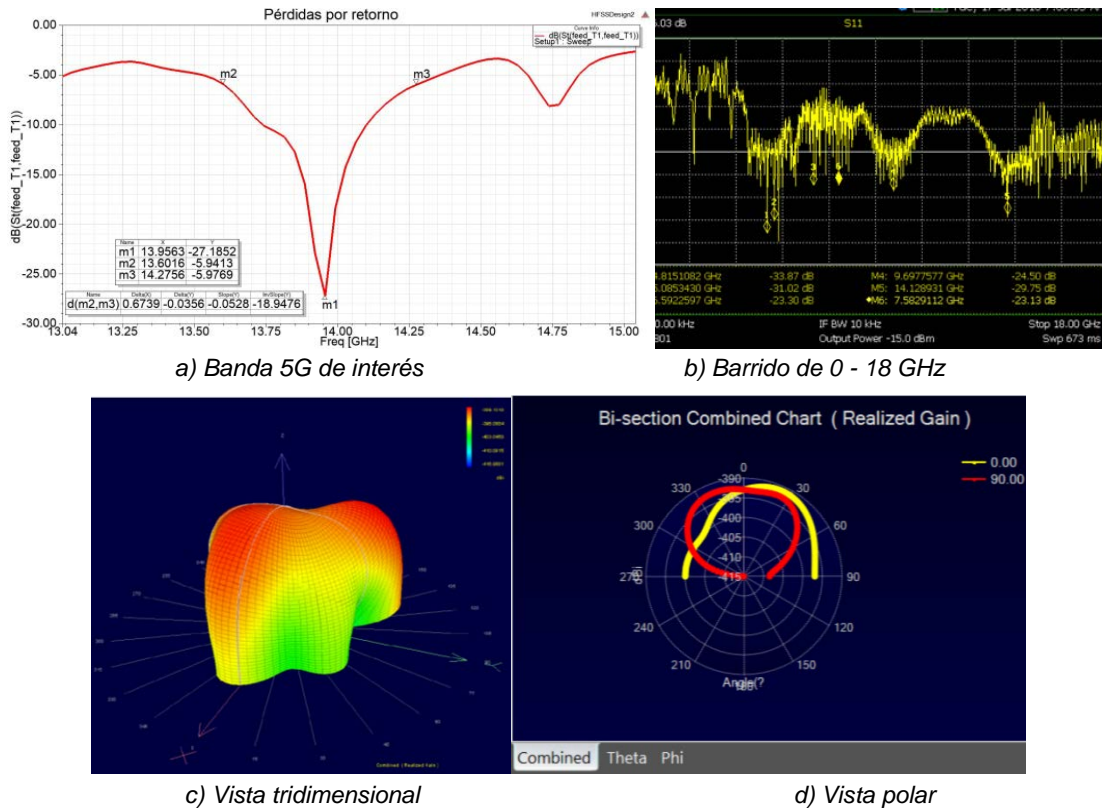


Figura 9 Resultados experimentales obtenidos: Analizador de redes (pérdidas por retorno) y Escáner RF (patrón de radiación).

4. Discusión

Con la simulación de los arreglos de antenas se pudo observar un crecimiento de la ganancia conforme aumenta el número de elementos del arreglo de antenas, al igual que en el caso de la escalabilidad, este tipo de estudio no se muestra en literatura. De esto se intuye que conforme vaya creciendo el arreglo se va mejorando la eficiencia de la potencia radiada como se espera de la tecnología de MIMO masivo.

Sin embargo, el costo computacional que conlleva el método de elementos finitos usado por el simulador HFSS, es una gran limitante al momento de hacer las simulaciones de los arreglos de antenas y es por esto que no se llevaron a cabo las simulaciones de arreglos de antenas con más elementos.

Por otro lado, en el trabajo realizado hasta ahora no se consideran los efectos de correlación que existen entre las antenas de los arreglos por lo que este es un tema de interés que se puede considerar trabajo a futuro.

5. Conclusiones

De la literatura existente, se eligió un modelo de antena; se simuló, analizó y fabricó una a los requerimientos deseados. La simulación se llevó a cabo mediante el software especializado HFSS y la caracterización experimental utilizando equipo especializado como FieldFox y RFXpert.

Los resultados obtenidos mostraron ser muy similares: simulación e implementación. Así que se pudo validar el elemento de antena y la eventual fabricación de arreglos más grandes. Cabe destacar, que en la literatura no se había realizado un estudio similar. De ahí las contribuciones de este trabajo.

Entre las características deseables se encontraron: estabilidad en el escalamiento de la antena, regularidad/simetría en el patrón de radiación, así como en la banda de interés, facilidad para fabricarse y escalar a arreglos más grandes.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ansoft L., An introduction to hfss fundamental principles, concepts, and use, ANSYS Inc., 2013
- [2] Balanis C, Antenna theory-analysis and design. John Wiley & Sons, 2nd ed., 1997.
- [3] Chen C. et al, Finite large antenna arrays for massive mimo: Characterization and system impact, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, pp. 6712–6720, Dec 2017.
- [4] Huang H., Overview of antenna designs and considerations in 5G cellular phones, 2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2018.
- [5] Lozano-Plata L., Herramientas software en el mundo del electromagnetismo computacional, Tecnológicas, 2011.
- [6] Shafi M. et al., 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 35 , Issue: 6, 2017.
- [7] Wu Y. et al, A Survey on MIMO Transmission With Finite Input Signals: Technical Challenges, Advances, and Future Trends, Proceedings of the IEEE, 2018.