

## EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CAPACIDAD MIMO DE ARREGLOS DE ANTENAS PIFA COMPACTOS EN BANDA DE 2,45 GHz<sup>1</sup>

### EXPERIMENTAL EVALUATION OF MIMO CHANNEL CAPACITY FOR COMPACT ARRAYS OF PIFA ANTENNAS AT 2.45 GHz BAND

Héctor Carrasco E.<sup>2</sup>

Recibido 2 de agosto de 2007, aceptado 16 de octubre de 2007

Received: August 2, 2007 Accepted: October 16, 2007

#### RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados experimentales de medición de canal y evaluación de capacidad MIMO (Multiple Input Multiple Output) de *arrays* de antenas PIFA (Planar Inverted "F" Antenna) compactos en la banda de frecuencia de 2,45 GHz, en entornos interiores ricos en multitrayecto. Se evalúan dos configuraciones básicas de *arrays*, Lineal y Cuadrada de cuatro antenas PIFA, cuyas características de bajo perfil y grados de libertad de construcción y configuración constituyen ventajas comparativas para aplicaciones con terminales compactos portables. Las mediciones de la matriz de canal MIMO se hacen utilizando un VNA (Vector Network Analyzer) controlado vía estándar GPIB (General Purpose Interface Bus). La capacidad MIMO se evalúa estadísticamente para un gran número de medidas del canal, en espacio y frecuencia, con separación de antenas en cada *array* de 0,1 a 0,8 longitudes de onda, con el objetivo principal de estudiar el efecto del acoplamiento mutuo en la capacidad MIMO. Los resultados de capacidad medida muestran que las configuraciones propuestas más eficientes pueden operar como mínimo hasta separaciones de antenas en el rango de 0,3 a 0,4 longitudes de onda, sin producir gran degradación de capacidad debido al acoplamiento y bloqueo de señal. Este resultado implica separaciones cercanas a 4 cm y, en consecuencia, *arrays* significativamente compactos.

Palabras clave: Medición de matriz de canal MIMO, capacidad de canal MIMO, antenas PIFA, acoplamiento mutuo, *arrays* de antenas.

#### ABSTRACT

*This paper presents experimental results of indoor MIMO wireless channel and channel capacity evaluation for compact PIFA (Planar Inverted "F" Antenna) antenna arrays at the 2.45 GHz frequency band. Linear and square array configurations are evaluated using PIFA antenna elements because of its advantages of low profile and flexible configuration design for compact and portable mobile terminals. Measurements are performed using a VNA with GPIB standard for automatic data acquisition. MIMO channel capacity results are calculated from a large amount of data combining uncorrelated space and frequency measurements, obtaining results that are statistically representative. Antenna array size from 0.1 to 0.8 wavelengths are tested to evaluate the effect of mutual coupling. Results show that the most efficient configurations can provide high capacity for array size as small as 0.3 to 0.4 wavelengths, which is a significant compact array size for portable wireless terminals (about 4 centimeters for the tested frequency).*

*Keywords: MIMO channel matrix measurement, MIMO channel capacity, PIFA antennas, mutual coupling, antenna arrays.*

#### INTRODUCCIÓN

Los sistemas multiantena para comunicaciones inalámbricas MIMO (Multiple Input Multiple Output) [1-3] basan su extraordinario potencial de capacidad o eficiencia espectral en condiciones donde la correlación entre señales de cada

elemento de antena del *array* sea baja. Esto se puede lograr en entornos de propagación multicamino dispersivos y con *arrays* cuyo espaciado entre elementos sea suficiente [4]. Sin embargo, la implementación de *arrays* multiantenas en equipos portables requiere que éstos sean compactos y, en consecuencia, esto es una limitante para lograr los

<sup>1</sup> Este trabajo está apoyado por los proyectos Anillo PBCT-ACT-11/2004, Fondecyt 1070742 2007/8, Fondec D04-I1392 2006/7 y UTFSM 230721 2007.

<sup>2</sup> Departamento de Electrónica. Universidad Técnica Federico Santa María. Av. España 1680. Casilla Postal: 110-V. Valparaíso, Chile. Email: hce@elo.utfsm.cl

beneficios de los sistemas MIMO. Poca investigación experimental se ha hecho respecto a tipos de antena y configuraciones de *arrays* que exploten de forma eficiente la capacidad MIMO con restricciones de espacio utilizado, excepto [5, 6], por lo que los resultados obtenidos en este trabajo constituyen un aporte en este sentido.

En este trabajo se presentan resultados experimentales de medición de canal y evaluación de capacidad MIMO 4x4 para dos configuraciones básicas de *arrays*, Lineal y Cuadrada, utilizando como elemento la antena PIFA (Planar Inverted “F” Antenna) [7,8], cuyas características de bajo perfil, pequeñas dimensiones, gran ancho de banda, y en particular su estructura con varios grados de libertad geométrica, permiten una mayor flexibilidad de diseño y configuraciones que ameritan ser estudiadas. Las mediciones se realizaron en la banda de frecuencia de 2,45 GHz, de redes WiFi (Wireless Fidelity) 802,11b en entornos interiores ricos en multitrayecto. Se utiliza principalmente un VNA (Vector Network Analyzer, marca Rohde&Schwarz) controlado vía estándar GPIB (General Purpose Interface Bus) y un sistema de posicionamiento de los *arrays* controlado vía puerta paralela de un *laptop*. El objetivo principal del trabajo es proponer y evaluar experimentalmente configuraciones de *arrays* y cuantificar qué tan compactos pueden implementarse éstos sin que se produzca un deterioro significativo de la capacidad MIMO, respecto al máximo práctico sin restricciones de tamaño del *array*.

Se comparan las capacidades medidas para las dos configuraciones propuestas, con dos variantes cada una, en función de la separación de las antenas en cada *array* en un rango de 0,1 a 0,8 longitudes de onda. La evaluación de la capacidad se hace combinando mediciones de canal en espacio y frecuencia, con una gran cantidad de muestras descorrelacionadas en ambos casos, obteniéndose resultados estadísticamente adecuados. Los resultados obtenidos son una herramienta importante de referencia al diseño de *arrays* compactos para el tipo de aplicaciones inalámbricas consideradas, que no ha sido reportado en la literatura especializada.

### CANAL Y CAPACIDAD MIMO

En general un canal MIMO puede representar diferentes situaciones de comunicación con antenas múltiples [1, 2], como, por ejemplo, entre los dos extremos de un enlace entre una estación base celular dotada de un *array* y un terminal móvil equipado también con más de una antena, o también cuando se usan múltiples antenas en forma distribuida espacialmente, donde cada una de las antenas

constituyentes del *array* transmisor y/o receptor pueden estar inmersas en un entorno de propagación diferente. Dado el interés y alcance del presente trabajo, el canal considerado supone *arrays* con antenas concentradas, es decir, lo que podría representar una situación rica en multitrayectos típica de comunicación estación base a Terminal, exterior-exterior, exterior-interior o interior-interior, móvil o fija.

La figura 1 muestra la situación genérica de transmisión entre un conjunto de  $T$  antenas transmisoras y un conjunto de  $R$  antenas receptoras.

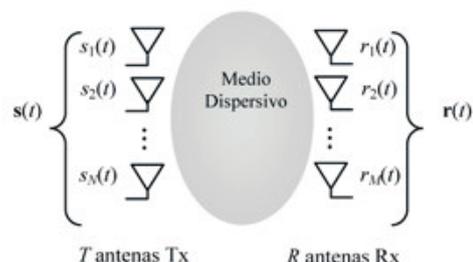


Figura 1. Esquema del canal MIMO.

El modelo de señal banda base complejo en general selectivo en frecuencia que describe la conexión entre los extremos transmisor y receptor puede ser representado por una matriz de canal  $\mathbf{H}(\tau) \in \mathbb{C}^{R \times T}$  definida como [9]

$$\mathbf{H}(\tau) = \sum_{l=1}^L \mathbf{A}_l \delta(\tau - \tau_l) \quad (1)$$

donde  $L$  es el número de rayos resolubles, y las matrices  $\mathbf{A}_l$  se definen como

$$\mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} h_{11}^{(l)} & h_{12}^{(l)} & \dots & h_{1T}^{(l)} \\ h_{21}^{(l)} & h_{22}^{(l)} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ h_{R1}^{(l)} & \dots & & h_{RT}^{(l)} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{R \times T} \quad (2)$$

El conjunto  $\mathbf{A}_l$  describe la transformación lineal de señales entre los dos *arrays* para cada retardo  $\tau_l$ , siendo  $h_{rt}^{(l)}$  el coeficiente de transmisión complejo desde la antena transmisoras  $t$  a la antena receptora  $r$ , para el retardo  $\tau_l$ . Nótese que (1) corresponde al modelo de canal SISO de banda ancha clásico [10] extendido al caso MIMO, el cual está basado en una combinación lineal de versiones retardadas de la señal transmitida, donde los coeficientes

de combinación a su vez son modelos de canal de banda estrecha [11].

El caso de modelo de canal de banda estrecha supone que la dispersión temporal del canal es despreciable frente al periodo de señalización de la señal transmitida, lo que permite agrupar todos los coeficientes de canal asociados a los multitrajetos en un solo término y representar la matriz de canal (1) con  $L=1$ .

La capacidad MIMO  $C$ , expresada en b/s/Hz, para un canal no selectivo en frecuencia se calcula de acuerdo a la fórmula (3) log-det [1][2], donde  $\mathbf{I}_R$  es la matriz identidad de dimensión  $R$ ,  $SNR$  es la relación señal a ruido promedio y  $(\bullet)^H$  denota la operación transpuesto-conjugado. La expresión (3) corresponde a la capacidad para un sistema MIMO para el caso en que no se conoce el estado del canal en el extremo transmisor, es decir, con distribución espacial uniforme de potencia transmitida [1].

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_R + \frac{SNR}{T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (3)$$

La capacidad del canal MIMO depende, por una parte, de la aleatoriedad de los coeficientes de la matriz  $\mathbf{H}$  que representa al canal MIMO y, por otra, de la potencialidad de esta matriz de producir canales paralelos (ortogonalidad de  $\mathbf{H}$ ). En condiciones de canal MIMO rico en multitrajetos en torno los *arrays* transmisor y receptor, los coeficientes de la matriz tienden a estar descorrelacionados a poca separación de antenas en cada *array* [5], generándose con alta probabilidad un máximo de canales paralelos ( $\max\{R, T\}$ ) y, en consecuencia, mayor capacidad MIMO. Dado que el canal en un entorno rico en multitrajetos es aleatorio, típicamente gaussiano complejo [1], la capacidad también es aleatoria, por lo que la manera estándar de cuantificarla es en su valor medio o en un valor de porcentaje *outage*, que corresponde al porcentaje de disponibilidad de la capacidad [1].

### ANTENAS PIFA Y CONFIGURACIONES DE ARRAYS PROPUESTOS

Las características de bajo perfil, dimensiones pequeñas, gran ancho de banda y estructura con varios grados de libertad de implementación individual y en *arrays* hacen de la antena PIFA una alternativa interesante para estudiar alternativas que permitan controlar el efecto del acoplamiento sobre la correlación de señal y la potencial capacidad MIMO de *arrays* con restricciones de espacio utilizado.

Una antena PIFA es una variación de una antena ILA (Invertid-L Antenna). La antena ILA está conformada por un corto monopolo con un segmento adicional de conductor en la punta como carga capacitiva para reducir el tamaño. La impedancia de la antena ILA es casi equivalente a la del monopolo, más la reactivancia causada por el segmento adicional sobre el plano tierra, lo que provoca una mala adaptación a líneas de transmisión estándares. Debido a esto se modifica la estructura de la antena ILA y se obtiene una mejor adaptación con la antena IFA (Inverted-F Antenna), que agrega una conexión a tierra en sentido opuesto al segmento conductor, respecto al punto de alimentación de la antena ILA. Una desventaja de construir una antena IFA usando conductores relativamente delgados es que el ancho de banda es bajo (típicamente 2%). La solución a esto es reemplazar los conductores por placas, dando origen a la antena PIFA [7, 8], cuyo esquema se muestra en la figura 2.

La frecuencia de resonancia de una antena PIFA depende del ancho de la placa ( $w$ ), de la altura de la placa paralela ( $h$ ), de su longitud ( $l$ ) y del punto de alimentación en la placa horizontal de largo  $l$  (ver figura 2). La alimentación es típicamente coaxial, desde abajo del plano de tierra hacia el centro inferior de la placa vertical central. El diagrama de radiación es aproximadamente omnidireccional, con polarización vertical, según la referencia de la figura 2.

El diseño de la antena individual para este trabajo se realizó para una frecuencia de resonancia de 2,45 GHz. Las dimensiones principales del diseño de esta antena son  $w = 10$  mm,  $l = 22,5$  mm y  $h = 10,5$  mm.

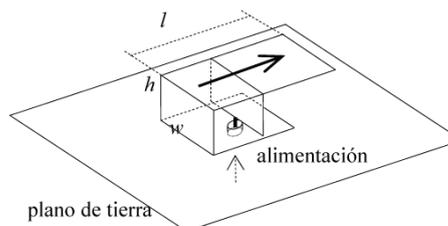


Figura 2. Esquema de antena PIFA.

Un ejemplo de resultado de medición del coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ), en forma individual, de una de las antenas se muestra en la figura 3, donde se aprecia un gran ancho de banda de algo más de 400 MHz.

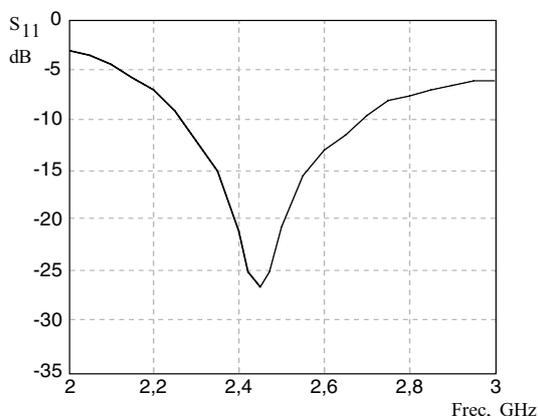


Figura 3. Coeficiente de reflexión  $S_{11}$  vs. frec. de las antenas PIFA construidas.

Por las características asimétricas de forma de la antena PIFA, resulta particularmente interesante su estudio en términos de acoplamiento mutuo y, en consecuencia, por la posibilidad de controlar este efecto a favor de la capacidad de sistemas MIMO que utilicen *arrays* compactos. En [13] se demuestra experimentalmente que el acoplamiento mutuo entre antenas PIFA es altamente dependiente de la orientación relativa de dos antenas, por tanto se espera que en configuraciones de *array* con más antenas estas diferencias de acoplamiento se manifiesten también al evaluar la capacidad MIMO. Por lo anterior, en este trabajo se han considerado estudiar experimentalmente dos configuraciones básicas de cuatro antenas en transmisión y recepción (MIMO 4x4), Lineal y Cuadrada, con dos variantes extremas de acoplamiento máximo y mínimo, de acuerdo a [13]. Las configuraciones implementadas y evaluadas se muestran en la figura 4. El plano de tierra tiene perforaciones cada 0,1 longitudes de onda para evaluar *arrays* con  $d_\lambda$  de 0,1 a 0,8.

### SISTEMAS Y PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Los equipos que conforman el sistema de medición utilizado son fundamentalmente un VNA, dos amplificadores de RF, un *switch* de cuatro entradas, un brazo giratorio con motor paso a paso controlado por computador y los dos *arrays* de cuatro antenas PIFA cada uno. En la figura 5 se puede apreciar el esquema general básico del sistema de medición.

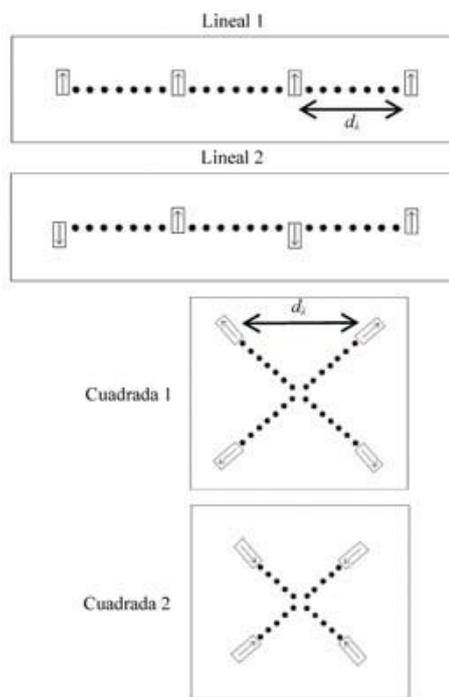


Figura 4. Configuraciones de *arrays* de antenas PIFA propuestos y evaluados.

El modo de operación del sistema es secuencial, de forma que las mediciones se deben realizar procurando al máximo la condición estática del entorno medido. Las mediciones se realizan en ambiente interior, de noche, sin presencia de personas circulando. El operador del equipo tampoco interfiere, pues inicialmente el programa de medición, realizado en Matlab, incluye una pausa adecuada antes de empezar a realizar las mediciones de los coeficientes de **H**.

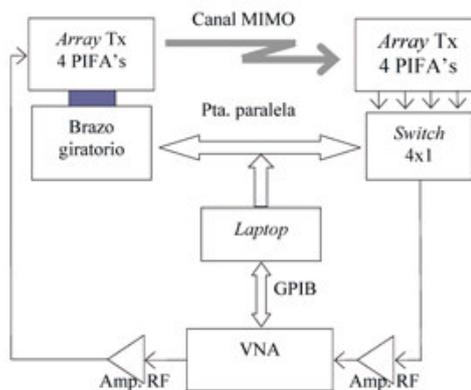


Figura 5. Esquema general del sistema de medición de canal MIMO utilizado.

La medición de la matriz de canal se hace coeficiente a coeficiente, para cada configuración, cada tamaño de *array* y cada una de las antenas del *array* Tx. Se mide la respuesta compleja del canal secuencial y automáticamente para las cuatro puertas del *switch*, es decir, para las cuatro antenas receptoras, obteniéndose así una columna de la matriz  $\mathbf{H}$ . El procedimiento es tal que lo anterior se realiza automáticamente para todas las posiciones programadas del brazo posicionador. Una vez terminado el ciclo se cambia manualmente la conexión de antena en el Tx y se repite el proceso, y así para cada tamaño de *array*, que por simplicidad se hacen iguales en Tx y Rx. Las cuatro antenas en el Tx están siempre conectadas, una al amplificador y tres a una carga de  $50 \Omega$  según corresponda. Esto porque aun cuando la medición es secuencial, el cálculo de la capacidad MIMO a partir de las mediciones de  $\mathbf{H}$  supone operación simultánea del sistema MIMO, por tanto el acoplamiento mutuo real es suponiendo todas las antenas alimentadas con fuentes de  $50 \Omega$ . Para cada coeficiente se miden 60 posiciones distintas con el brazo giratorio, separadas en aproximadamente media longitud de onda, y por tanto con suficiente descorrelación espacial. El barrido en frecuencia de medición del VNA es de 2 a 3 GHz, en pasos de 2,5 MHz, lo que resulta en muestras también descorrelacionadas en frecuencia. Con esto se obtiene un total de 24.060 muestras descorrelacionadas de matriz por configuración y tamaño de *array*. Sin embargo, dado el ancho de banda de las antenas, sólo se evalúa la capacidad para el rango de 2,3 2,6 GHz, lo que da 7.260 muestras, cantidad suficiente estadísticamente. La relación señal a ruido de medición se estima de unos 40 dB como mínimo, lo que es suficiente para una medición con despreciable error de estimación de capacidad, de acuerdo a [14], donde se demuestra que con una relación mayor a 30 dB para un sistema MIMO 4x4, el incremento en capacidad aparente por efecto del ruido aleatorio es despreciable.

El programa que controla el procedimiento de medición permite comunicación con el VNA vía interfaz estándar GPIB con una tarjeta PCMCIA en el *laptop*. El manejo del posicionador con motor paso a paso, con reducción mecánica, es controlado secuencialmente vía puerta paralela del *laptop*. Cada medición se inicia con el posicionamiento del brazo, luego una pequeña pausa para eliminar oscilaciones mecánicas y termina con las cuatro mediciones de barrido del VNA intercaladas con los cambios del *switch* vía puerta paralela.

La medición correcta de la matriz  $\mathbf{H}$  requiere un cuidadoso procedimiento de calibración previo del sistema, donde se deben compensar las respuestas de cada componente

de la cadena de medición que no corresponden al canal propiamente tal, excepto las antenas, ya que éstas necesariamente forman parte del canal que el sistema MIMO ve en los conectores a nivel de RF hacia abajo.

## RESULTADOS DE MEDICIÓN DE CANAL Y EVALUACIÓN DE CAPACIDAD

Las mediciones se hacen en dependencias interiores de un recinto universitario, sin línea de vista y a unos 15 a 20 metros entre *arrays* transmisor y receptor. Como ejemplo de medición en un barrido en frecuencia del VNA, se muestra en la figura 6 la magnitud de uno de los coeficientes de la matriz  $\mathbf{H}$ , para una posición del *array* Lineal 1. De la figura 6 se aprecia efectivamente que en la banda de frecuencia medida el canal experimenta cambios suficientes para disponer de un conjunto de muestras estadísticamente adecuado. También se aprecia una tendencia a mayor señal en el centro de la banda, lo que corresponde a la banda de adaptación de las antenas.

La correcta evaluación de la capacidad  $C$  en (3) requiere que la matriz  $\mathbf{H}$  esté normalizada en potencia. Esto corresponde a que la esperanza de la norma de Frobenius al cuadrado de  $\mathbf{H}$  sea iguala a  $R_x T_r$ , de lo contrario, la relación *SNR* de cálculo de  $C$  en (3) no corresponde y se obtendrá una capacidad aparente mayor o menor según la potencia absoluta de  $\mathbf{H}$  medida.

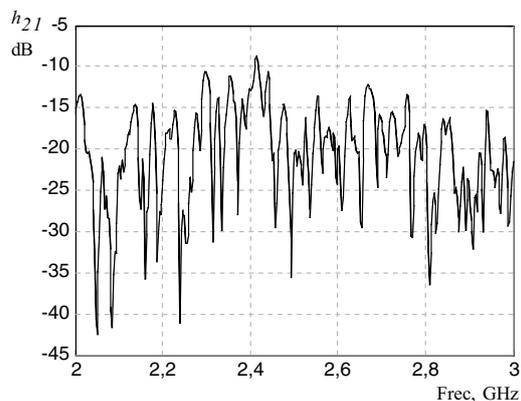


Figura 6. Ejemplo de un coeficiente de la matriz  $\mathbf{H}$  medido en el rango total de frecuencia.

La figura 7 muestra un resumen de la variación de la potencia media relativa de  $\mathbf{H}$  medida para cada configuración, y para todas las separaciones de antena en cada caso. En cada curva,  $P_r$  es la relación de potencia respecto a la medida para máxima separación de antenas, es decir, la

situación que supone mínimo acoplamiento mutuo. Se aprecia en general que la tendencia es a recibir cada vez menos potencia en la medida que el *array* es más compacto. Este comportamiento obedece a dos factores: el primero, debido a que el mayor acoplamiento a menor separación de antenas cambia la impedancia de las antenas, y por tanto deteriora la adaptación de impedancias; el segundo, debido a que a menor separación se produce un mayor bloqueo efectivo de señal entre antenas. Como resultado en combinación se reducen considerablemente la eficiencia del *array* para las separaciones más pequeñas.

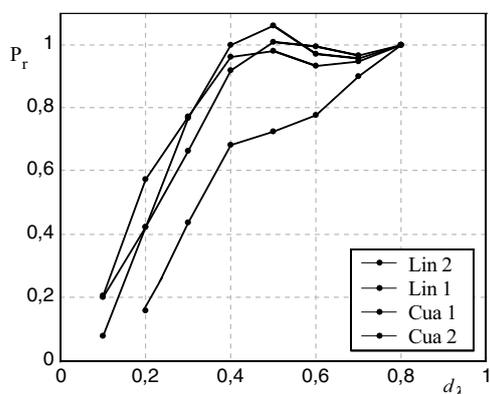


Figura 7. Potencia media recibida de la matriz **H** relativa a la de máxima separación ( $d_\lambda=0,8$ ), vs.  $d_\lambda$ , para las cuatro configuraciones evaluadas.

A partir de las mediciones de **H**, se evalúan las capacidades estadísticamente, para una relación *SNR* de operación de 21 dB, para todos los casos. En la figura 8 se muestran como ejemplo los resultados para la configuración Lineal 1. Se presenta la probabilidad acumulada complementaria o CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function). Las curvas sólidas corresponden a la capacidad medida, de izquierda a derecha, con  $d_\lambda$  de 0,1 a 0,8, las curvas punteadas corresponden a los límites teóricos cuando el canal está 100% correlacionado (curva izquierda) y 100% descorrelacionado (curva derecha), ambos para canal gaussiano complejo. En este caso la normalización de potencia es a cada caso de separación, no al máximo medido que supone mínima correlación, como una forma de separar los efectos del aumento de correlación y acoplamiento, de la pérdida de potencia media por disminución de eficiencia de adaptación y bloqueo.

En la figura 9 se muestra el mismo caso anterior, pero con normalización de potencia al caso de máxima separación. Esta situación es más realista y justa de comparar que la anterior, pues en el caso real los efectos de correlación

y acoplamiento y pérdida de eficiencia se combinan, implicando una mayor disminución de capacidad.

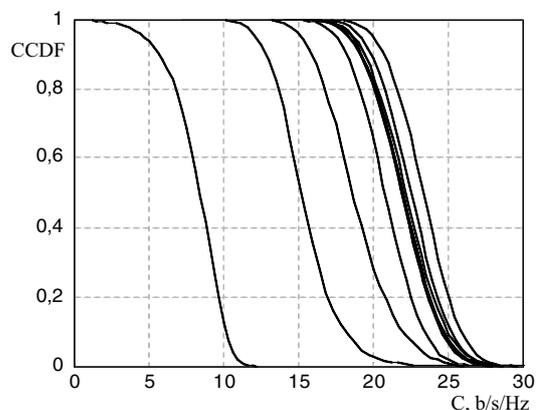


Figura 8. Probabilidad acumulada complementaria de la capacidad *C* del *array* configuración Lineal 1. Potencia media sin normalizar.

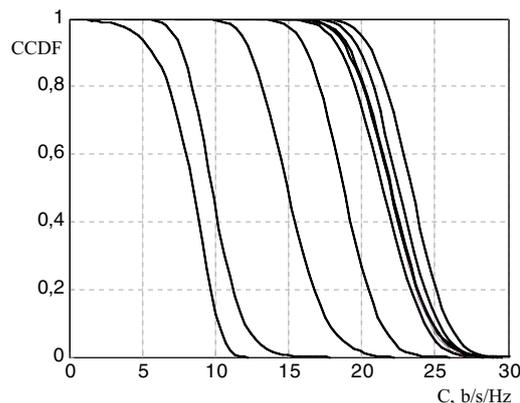


Figura 9. Probabilidad acumulada complementaria de la capacidad *C* del *array* configuración Lineal 1. Potencia media normalizada a la de máxima separación ( $d_\lambda=0,8$ ).

En la figura 10 se muestra un resumen comparativo de las capacidades absolutas al 90% de confiabilidad (o *outage*) de las cuatro configuraciones propuestas y evaluadas, considerando normalización de potencia al caso de máximo tamaño de *array*.

Este último resultado se considera el más relevante, ya que permite en definitiva comparar las distintas configuraciones y estimar el tamaño mínimo de *array* para el cual el efecto de cercanía de las antenas sobre el deterioro de la capacidad sea despreciable. En este sentido, se puede concluir que para las tres mejores configuraciones propuestas el umbral de deterioro de la

capacidad está entre 0,3 y 0,4 longitudes de onda. Este resultado implica separaciones cercanas a 4 cm y, en consecuencia, *arrays* significativamente compactos. La configuración menos eficiente resulta ser la Cuadrada 2, lo que se explica al referirse a la figura 4 y según [13], ya que para menores separaciones el acoplamiento y bloqueo es más crítico cuando las antenas PIFA se “enfrentan” ( $\rightarrow \leftarrow$ ). Aun cuando puede resultar poco preciso comparar en tamaño las configuraciones Lineal y Cuadrada, y por tanto en capacidad, estos resultados dan una referencia importante de diseño según se disponga de espacio lineal o superficial en el equipo terminal donde se requiera implementar *arrays* compactos.

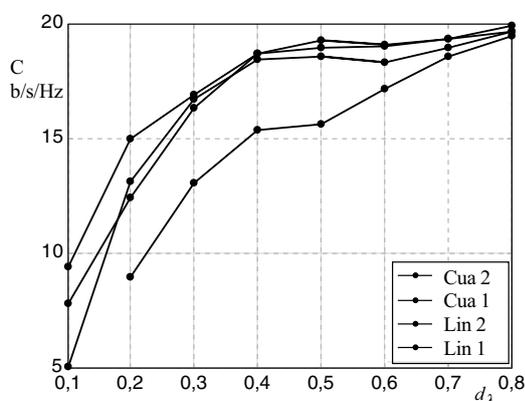


Figura 10. Capacidad al 90% outage de las cuatro configuraciones de *arrays* evaluados, vs.  $d_\lambda$ .

Finalmente, en la figura 11 se hace una comparación de la capacidad medida de un caso y simulada a partir de un modelo de canal MIMO que controla la correlación de señal por medio de matrices de correlación de potencia en los extremos Tx y Rx [15].

Los coeficientes de las matrices de correlación se extraen de los datos medidos. Con estas matrices se simulan datos de canal y se evalúa la capacidad. Se observa un muy buen ajuste entre medición y simulación, líneas continuas y segmentadas, respectivamente, para ambos extremos de correlación (o separación de antenas). Se comprueba entonces que el modelo de [15] es una buena herramienta de evaluación de sistemas y algoritmos MIMO que requieran muchos datos de canal con correlación controlada.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado experimentalmente la capacidad MIMO de *arrays* compactos de antenas PIFA

en la banda de frecuencia de 2,45 GHz, en entorno interior. Se evalúan dos configuraciones básicas de *arrays* de cuatro antenas (MIMO 4x4), Lineal y Cuadrada con dos variantes cada uno, con el fin de estudiar los límites prácticos de tamaño sobre el cual la correlación de señal y acoplamiento mutuo entre antenas no degrade significativamente la capacidad. A partir de los resultados, la configuración más eficiente en cuanto a menor separación entre antenas es la Lineal 1, resultado que se explica a partir de lo reportado en [13], es decir, cuando la correlación entre antenas es mínima, tendiendo a estar las antenas en lo posible “opuestas”. El caso significativamente menos eficiente corresponde cuando las antenas se “enfrentan”, Cuadrada 2. En general para los tres casos más eficientes el umbral de separación se estima entre 0,3 y 0,4 longitudes de onda, lo que resulta en *arrays* significativamente compactos de cerca de 4 cm de separación entre antenas.

El deterioro en la capacidad para separaciones menores entre antenas se debe a dos razones que se combinan. Una es el aumento de correlación de señales por acoplamiento mutuo y propio comportamiento del canal multitrayecto, y la otra por la disminución de eficiencia de los *arrays* debido a la desadaptación de impedancias y bloqueo de señales.

Una línea posible de trabajo derivada de esta investigación, que se visualiza como una posibilidad de optimización de los *arrays* compactos propuesto y evaluados, es el diseño conjunto de las antenas formando parte del *array*. De esta manera se esperaría mejorar la eficiencia del *array*, por cuanto la adaptación de impedancia se vería, por diseño, menos afectada por la cercanía de las antenas.

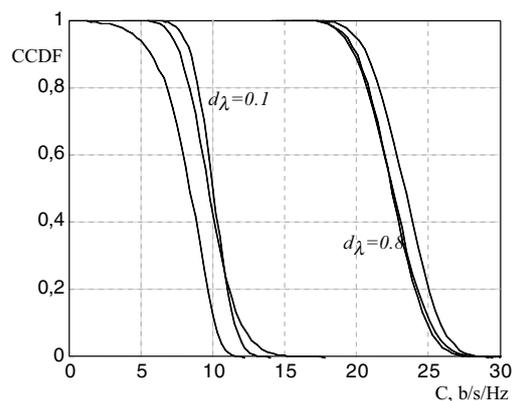


Figura 11. Probabilidad acumulada complementaria del *array* configuración Lineal 1, medida y simulada, para dos casos extremos de separación.

## REFERENCIAS

- [1] G. Foschini and M.J. Gans. "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiples antennas". *Wireless Personal Communications*. Vol. 6, pp. 331-335. 1998.
- [2] I.E. Telatar. "Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels". AT&T Bell Lab. Internal Tech. Memo. June, 1995.
- [3] D. Gesbert, H. Bölcskei, D.A. Gore and A.J. Paulraj. "MIMO wireless channels: Capacity and performance prediction". *Proc. GLOBECOM*. Vol. 2, pp. 1083-1088. IEEE. 2000.
- [4] D.S. Shiu, G.J. Foschini, M.J. Gan and J.M. Kahn. "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems". *IEEE Trans. Commun.* Vol. 48, pp. 502-513. March, 2000.
- [5] D.W. Browne, M. Manteghi, M.P. Fitz and Y. Rahmat-Samii. "Antenna Topology Impacts on Measured MIMO Capacity". *IEEE Vehicular Technology Conference*. September, 2005.
- [6] D.W. Browne, M. Manteghi, M.P. Fitz and Y. Rahmat-Samii. "Experiments with Compact Antenna Arrays for MIMO Radio Communications". Submitted to publication.
- [7] T. Taga and K. Tsunekawa. "Performance Analysis of a Built-In Planar Inverted F Antenna for 800 MHz Band Portable Radio Units". *IEEE Trans. Selected Areas in Communications*. Vol. 5 N° 5, pp. 921-929. June, 1987.
- [8] R. Feick, H. Carrasco, M. Olmos & H.D. Hristov. "PIFA Input Bandwidth Enhancement by Changing of Feed Plate Silhouette". *Electronics Letters*, pp. 921-923. 2004.
- [9] K.I. Pedersen, J.B. Andersen, J.P. Kermaol and P.E. Mogensen. "A stochastic multiple-input multiple-output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms". *Proc. Vehicular Technology Conf.* Boston, MA, pp. 893-897. September 2000.
- [10] J.G. Proakis. "Digital Communications". 3rd ed. McGraw-Hill, New York. 1995.
- [11] W.C. Jakes. "Microwave Mobile Communications". John Wiley and Sons. New York. 1974.
- [12] J.B. Andersen. "Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends". *IEEE J. Select. Areas Commun.* Vol. 18, pp. 2172-2178. November, 2000.
- [13] H. Carrasco, H.D. Hristov, R. Feick and D. Cofré. "Mutual Coupling Between Planar Inverted-F Antennas". *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 224-227. 2004.
- [14] P. Kyritsi, R.A. Valenzuela and D.C. Cox. "Channel and capacity estimation errors". *IEEE Communications Letters*, pp. 517-519. December, 2002.
- [15] J.P. Kermaol, L. Schumacher, K.I. Pedersen, P.E. Mogensen and F. Frederiksen. "A Stochastic MIMO Radio Channel Model with Experimental Validation". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 20 N° 6, pp. 1211-1226. August, 2002.