

Eficiencia espectral y capacidad en un canal MIMO masivo con alta densidad de usuarios

A. Rodríguez⁽¹⁾, Jesús R. Pérez⁽¹⁾, Luis Valle⁽¹⁾, Rafael P. Torres⁽¹⁾, Lorenzo Rubio⁽²⁾ Vicent M. Rodrigo⁽²⁾,
Juan Reig⁽²⁾

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria, 39005.Santander, España

⁽²⁾ iTEAM Research Institute. Universitat Politècnica de Valencia, 46022 Valencia, España.

E-mail: jesusramon.perez@unican.es, lrubio@dcom.upv.es

Abstract- This paper presents an analysis of the massive MIMO channel in an indoor picocell with a high number of active user terminals. The analysis is based on the results of a measurement campaign carried out in the 3.2 to 4 GHz band in a scenario of reduced size, in which users (up to 20) are placed in an orderly manner. In order to evaluate the performance of the resulting massive MIMO channel, results concerning both the sum capacity as well as the spectral efficiency are included. Furthermore and concerning the channel spectral efficiency, an analysis showing the spread and differences between the individual contributions of each active user is reported and discussed.

I. INTRODUCCIÓN

El uso en la quinta generación de sistemas de comunicaciones móviles (5G) de la tecnología de entrada múltiple y salida múltiple masivo (m-MIMO) es ya una realidad. No obstante, su despliegue en puntos de alta concentración de usuarios y tráfico, así como el desarrollo de la próxima generación (6G) requerirán el uso cada vez más eficiente del canal de radio, mejorando la eficiencia espectral por usuario y área. Además de la incuestionable necesidad de espectro adicional, el despliegue de celdas más pequeñas y el desarrollo de sistemas evolucionados (MIMO) son algunas de las tecnologías habilitadoras más relevantes [1]. En el ámbito de lo que se denomina MIMO multiusuario, los sistemas MIMO masivos son los que han alcanzado un mayor desarrollo [2-7].

El rendimiento de un sistema m-MIMO con respecto a la eficiencia espectral alcanzable depende en gran medida de la ortogonalidad entre los subcanales establecidos entre los diferentes terminales de usuario activos simultáneamente y la estación base (BS). Para el caso de un canal teórico, i.i.d. Rayleigh, está bien establecido que esta ortogonalidad aumenta a medida que aumenta el número de elementos de antena del array en la BS. En aquellos casos en que ocurre este hecho, diremos que el canal cumple con la condición de "propagación favorable". Por el contrario, dicha ortogonalidad tiende a disminuir con el número de usuarios simultáneamente activos y con la cercanía entre ellos [5]. Por lo tanto, es importante contrastar empíricamente en qué medida esta condición se verifica en escenarios reales. En los últimos años, se ha realizado un número de campañas de medida para caracterizar empíricamente los canales m-MIMO en diferentes entornos y bandas de frecuencia [7-9].

A diferencia de los trabajos de investigación anteriores, la característica distintiva de este trabajo es la consideración de

un entorno de propagación pequeño con una alta densidad de usuarios activos, hasta 20. El pequeño tamaño de la celda junto con su simetría, la escasez de muebles y la relativa proximidad entre usuarios, forman un entorno realista en el que resulta interesante medir la eficiencia espectral obtenible para el sistema, y también el grado de equidad en que ésta se reparte entre los usuarios. Para el cálculo de la eficiencia espectral se ha optado por el método de combinación zero forcing (ZF), que mantiene un buen equilibrio entre complejidad y rendimiento [5].

II. MODELO DEL CANAL MIMO MASIVO

Centrando el análisis en el enlace ascendente, el sistema MIMO masivo que se considera es un sistema celular simple donde la BS está equipada con M antenas, hay Q usuarios activos, cada terminal de usuario tiene una sola antena y los usuarios transmiten una potencia total P . Además, se considera que la BS conoce el canal, que los usuarios no colaboran entre sí y que se trata de un sistema OFDM con N_f subportadoras. Bajo estas hipótesis, la señal recibida en la BS para la subportadora k -ésima cuando los Q usuarios están activos viene dada por (1), [10].

$$\mathbf{y}[k] = \sqrt{SNR} \mathbf{G}[k] \cdot \mathbf{s}[k] + \mathbf{n}[k]; k = 1, 2, \dots, N_f \quad (1)$$

En (1), $\mathbf{y}[k]$ es un vector columna con M elementos que contiene las señales recibidas para la subportadora k -ésima; $\mathbf{G}[k]$ es la matriz de canal de orden $M \times Q$, y en la que cada una de sus columnas se corresponde con el canal de banda estrecha $\mathbf{g}_q[k]$ de orden $M \times 1$; $\mathbf{s}[k]$ ($Q \times 1$) es el vector de señales transmitidas por los usuarios y normalizado de forma que $E\{\|\mathbf{s}\|^2\} = 1$; y $\mathbf{n}[k]$ es el vector de ruido Gaussiano i.i.d. cuyos elementos tienen varianza unidad. Finalmente, SNR representa la relación señal a ruido media en el receptor.

La matriz en (1) está normalizada tal que cumple con (2). En el caso experimental que nos ocupa, la matriz \mathbf{G} se obtiene de la matriz de las medidas del canal sin procesar, \mathbf{G}^{raw} , mediante la expresión (3).

$$\{\|\mathbf{G}\|_F^2\} = M \cdot Q \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_{M \times Q} = \mathbf{G}_{M \times Q}^{\text{raw}} \mathbf{J}_{M \times Q} \quad (3)$$

En (3), la matriz de normalización \mathbf{J} es diagonal de orden $Q \times Q$, y sus elementos (j_q) vienen dados por (4).

$$j_q = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} |g_q^{raw}[k]|^2}}; \quad q = 1, \dots, Q \quad (4)$$

Los elementos de \mathbf{J} toman valores diferentes para que todas las columnas en \mathbf{G} se normalicen a la unidad; y así se elimina el desequilibrio de potencia entre los canales asociados a cada UT, aunque se mantienen las variaciones de canal entre antenas dentro de la matriz del receptor y los tonos de frecuencia. La matriz \mathbf{G} ya normalizada, puede interpretarse como aquella asociada con un sistema en el que se realiza un control de potencia ideal. La potencia total disponible transmitida por los usuarios no se distribuye equitativamente, sino que a cada usuario se le asigna la potencia necesaria para que todos alcancen la BS con la misma potencia media.

Bajo la hipótesis inicial de que la BS conoce el canal, podemos obtener la capacidad suma del sistema MIMO masivo mediante la descomposición en valores singulares de la matriz del canal según (5), donde λ_q representa el q -ésimo autovalor de la matriz $\mathbf{G}^H \mathbf{G}$, es decir, el cuadrado del q -ésimo valor singular de la matriz \mathbf{G} .

$$C(k) = \sum_{q=1}^Q \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{Q} \cdot \lambda_q \right); \quad k = 1, 2, \dots, N_f \quad (5)$$

Como extensión a la capacidad, puede obtenerse la eficiencia espectral (SE) de cada usuario y la SE suma. Consideremos que la señal recibida se procesa en el receptor utilizando un método de combinación lineal de señales como el ZF, con la matriz de combinación dada por:

$$\mathbf{V} = \mathbf{G}(\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1}. \quad (6)$$

entonces, la señal procesada en el receptor puede expresarse como:

$$\hat{\mathbf{s}}[k] = \mathbf{V}^H[k] \mathbf{y}[k] \quad (7)$$

donde $\hat{\mathbf{s}}[k]$ es un vector columna con Q elementos que representa la estimación de las señales transmitidas por los Q usuarios a la frecuencia k -ésima.

La relación señal a interferencia más ruido (SINR) del usuario q -ésimo para la subportadora k -ésima viene dada por (8), la SE de cada usuario activo se obtiene mediante (9) y, por último, la SE suma viene dada por (10).

$$SINR_q[k] = \frac{\frac{SNR}{Q} |\mathbf{v}_q^H \mathbf{g}_q|^2}{\frac{SNR}{Q} \sum_{i=1, i \neq q}^Q |\mathbf{v}_q^H \mathbf{g}_i|^2 + |\mathbf{v}_q|^2} \quad (8)$$

$$SE_q[k] = \log_2(1 + SINR_q[k]) \quad (9)$$

$$SE[k] = \sum_{q=1}^Q SE_q[k] \quad (10)$$

Por último, se utilizará el factor Jain's Fairness Index (JFI) [11] como métrica para analizar la equidad con la que el canal reparte la SE entre los diferentes usuarios activos. Este factor viene dado por (11), donde $E\{\cdot\}$ representa el valor esperado sobre todos los tonos de frecuencia. El factor JFI toma valores

entre $1/Q$ y 1, siendo el valor 1 el correspondiente a la máxima equidad entre la eficiencia espectral de los usuarios.

$$JFI = E \left\{ \frac{\left(\sum_{q=1}^Q SE_q[k] \right)^2}{Q \sum_{q=1}^Q SE_q^2[k]} \right\} \quad (11)$$

III. CAMPAÑA DE MEDIDAS

A. Entorno.

Las medidas del canal radio interior se han llevado a cabo en una sala de reuniones que tiene seis filas de mesas con sus correspondientes asientos, y el mobiliario adicional se reduce a una mesa presidencial y dos armarios. En lo que respecta a los materiales de construcción, el edificio tiene una estructura de hormigón armado, una partición interior con paredes formadas por paneles de fibroyeso, paneles para el techo colocados a una altura de 2.98 m del suelo, y carpintería metálica tanto para ventanas como para puertas [10].

En la Fig. 1 se muestra una vista en planta del escenario de medida, incluyendo en detalle la posición de los usuarios / transmisores, así como del emplazamiento elegido para el array receptor. Centrando el análisis en el enlace ascendente, la antena transmisora (Tx) se ha colocado sobre las mesas, en un mástil de 25 cm de altura (a una altura de 1.07 m del suelo) y en 20 posiciones. En lo que respecta al array virtual receptor (Rx), está colocado al fondo de la sala con el centro del mismo situado a una altura de 2 m del suelo.

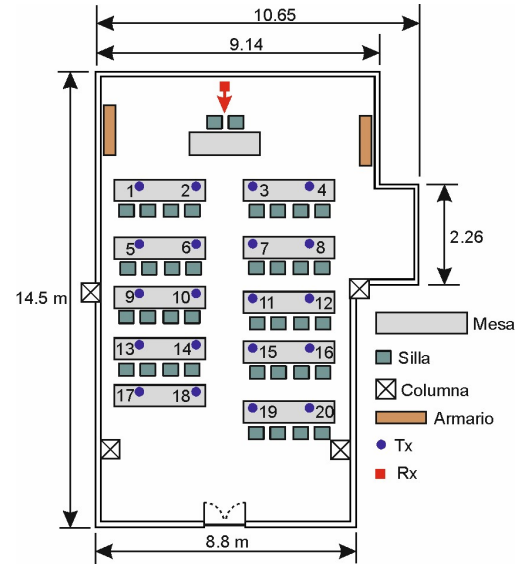


Fig. 1. Entorno de medida y distribución de Tx y Rx.

B. Sonda de canal.

Las medidas se han realizado utilizando el sistema que se presenta en la Fig. 2. Básicamente, la sonda de canal está formada por un escáner plano y un analizador vectorial de redes, ambos controlados desde un ordenador, para medir en el dominio de la frecuencia el parámetro de scattering $S_{21}(f)$ entre un Tx y cada punto Rx del array vertical (AV). La traza con información del parámetros S_{21} se corresponde con la función de transferencia compleja del canal $H(f)$ [12] y ofrece una caracterización completa del canal establecido entre un Tx, es decir un terminal de usuario activo, y el Rx del AV, es decir, el array en la BS.

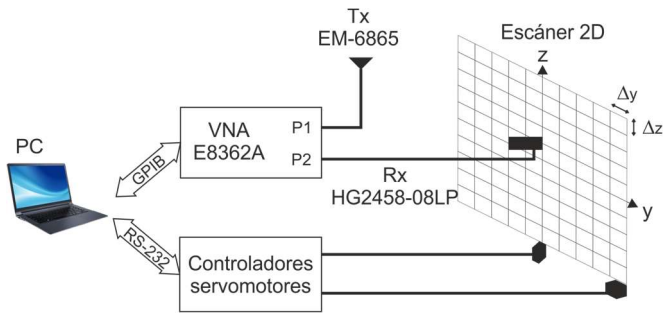


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema de medida.

C. Configuración de medida.

De acuerdo con la Fig. 1, las medidas tratan de emular el enlace ascendente de un sistema MIMO masivo con 20 usuarios activos (20 posiciones del Tx), considerando para el AV virtual un array cuadrado de 10×10 elementos uniformemente espaciados 50 mm en ambas direcciones y en el plano YZ. Centrando el interés en la banda comercial 3.4-3.8 GHz de los primeros despliegues de redes 5G, las medidas se han realizado en la banda 3.2-4 GHz, considerando para la traza S_{21} 641 tonos de frecuencia equiespaciados 1.25 MHz. Debe remarcar que la SNR promedio en cualquiera de las 20 posiciones del Tx estaba por encima de los 40 dB.

Respecto a las antenas, se ha utilizado una antena omnidireccional bicónica (el modelo EM-6865 de Electrometrics) como antena transmisora, y en el receptor se ha utilizado una antena periódica logarítmica (el modelo HG2458-08LP de L-Com), ambas polarizadas linealmente [13].

En la Tabla I se resumen los principales parámetros que establecen la configuración de medida.

TABLA I
PARÁMETROS GENERALES DE MEDIDA

Rango de frecuencias (GHz)	3.2-4
Tonos de frecuencia, N_f	641
Resolución en frecuencia (MHz)	1.25
Potencia en Transmisión, puerto 1 (dBm)	7
Ancho de banda de IF (kHz)	1
Tamaño AV (y x z)	10×10
Separación entre elementos del AV a 3.2 GHz (mm / λ)	50 / 0.53
Área del AV (m^2)	0.1225
Altura al centro del AV, h_{Rx} (m)	2
Altura de la antena Tx, h_{Tx} (m)	1.07
Rango de distancias Tx-Rx (m)	4.1-11.2
Tiempo de medida para cada posición Tx (s)	1000

IV. RESULTADOS

Con el objetivo de analizar en primer lugar las posibles diferencias existentes entre el canal que experimenta cada usuario por separado, y cómo influyen éstos en la eficiencia espectral suma, en la Fig. 3 se incluyen los resultados para el caso de considerar sólo 10 Tx (distribuidos simétricamente ocupando toda la sala) y el conjunto completo de los 20 Tx o usuarios activos. Como complemento a la Fig. 3, en la Tabla II se resumen los valores numéricos extraídos de las curvas para ambos casos, 10 y 20 Tx o usuarios activos, y para dos

probabilidades de corte o outage de 10 y 50%. Más allá de la dispersión de valores que se puede intuir en la Fig. 3, la Tabla II deja entrever el comportamiento que experimenta el canal para cada usuario en concreto.

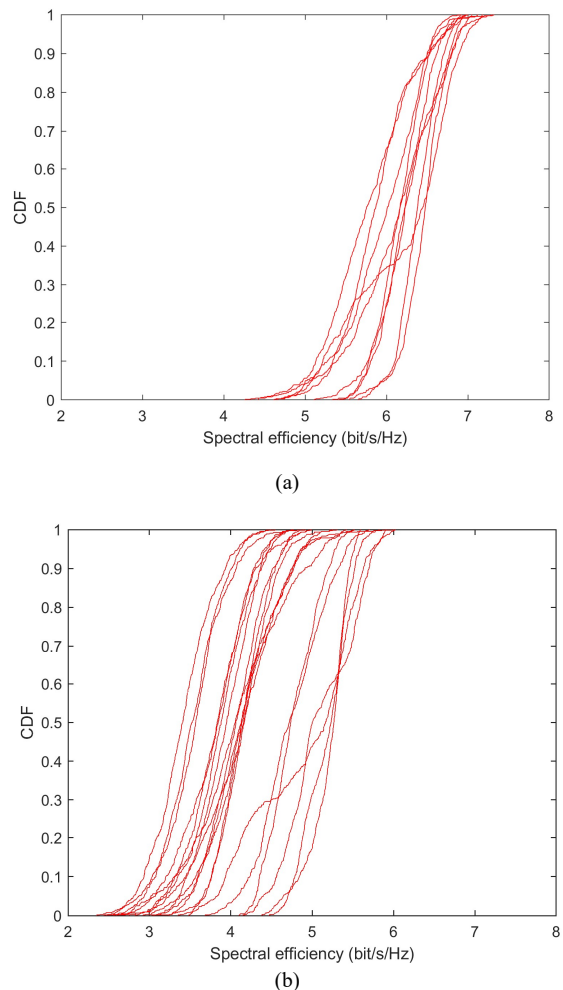


Fig. 3. Eficiencia espectral individual de cada Tx / usuario. (a) Conjunto con 10 Tx del total, (b) Eficiencia espectral de los 20 Tx.

Teniendo en cuenta las dimensiones y simetría del escenario de medida, se puede afirmar que el sistema está ofreciendo un servicio uniforme, con diferencias máximas en la eficiencia espectral debidas al canal que experimenta cada usuario que están por debajo de los 2 bit/s/Hz. Hay una dependencia también de los valores con la distancia Tx-Rx y, de acuerdo con los resultados de la Tabla II, los Tx más alejados tienen valores más bajos de SE. Con los 20 Tx activos, la mayor diferencia en términos de SE alcanza los 1.91 y 1.86 bit/s/Hz para los transmisores Tx1 y Tx11, considerando los límites de outage del 10 y 50%, respectivamente.

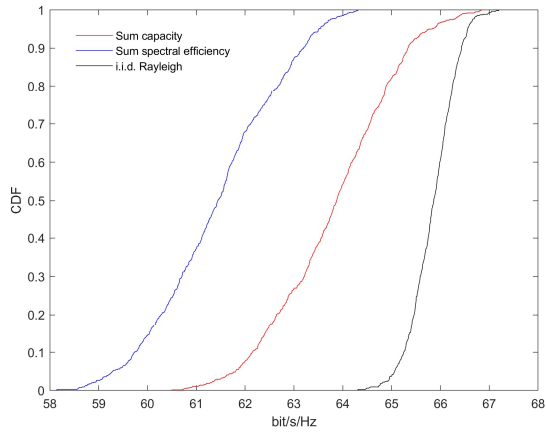
Tal y como se comentó en (11), el parámetro de equidad de usuario arroja información sobre el canal y su influencia en los usuarios. De acuerdo a (11), el JFI toma valores medios de 0.9957 y 0.9754 para 10 y 20 Tx activos, respectivamente.

Considerando los dos mismos conjuntos de Tx o usuarios activos, en la Fig. 4 se muestran las CDF de la capacidad y eficiencia espectral suma. Considerando sobre las CDF el valor mediano (50%) como punto de comparación entre los valores de capacidad de canal y eficiencia espectral, la diferencia entre capacidad y eficiencia espectral alcanza los 2.44 y 14.86 bit/s/Hz para 10 y 20 Tx activos, respectivamente. En el límite

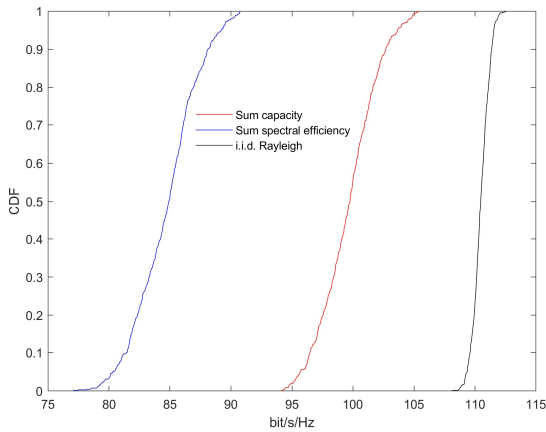
inferior de las CDF, para un 10% de outage, estas diferencias se mantienen prácticamente constantes, con valores de 2.41 y 14.99 bit/s/Hz para 10 y 20 Tx activos, respectivamente.

TABLA II
EFICIENCIA ESPECTRAL INDIVIDUAL PARA 10 Y 20 TX.
VALORES PARA 10 Y 50% DE CORTE (OUTAGE)

Tx	10 Tx		20 Tx	
	SE (10%)	SE (50%)	SE (10%)	SE (50%)
1	6.13	6.47	4.84	5.26
2			4.56	5.00
3			4.78	5.23
4	5.21	6.44	3.93	5.16
5			4.35	4.73
6	6.10	6.38	3.20	3.83
7	5.78	6.16	3.76	4.13
8			4.23	4.71
9	5.77	6.22	3.60	4.06
10			3.07	3.52
11			2.93	3.40
12	5.80	6.22	3.76	4.16
13			3.46	3.94
14	5.13	5.75	3.57	4.15
15	5.27	6.01	3.03	3.56
16			3.34	3.88
17	5.38	6.16	3.44	4.13
18			3.31	4.05
19			3.31	3.84
20	5.34	5.86	3.59	4.12
Suma	59.71	61.45	81.49	84.99



(a)



(b)

Fig. 4. Capacidad y eficiencia espectral suma. (a) Conjunto con 10 Tx del total, (b) Resultados con los 20 Tx activos.

V. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, puede concluirse que el algoritmo de combinación ZF es capaz de separar a los usuarios aun en el caso de tener los 20 activos. Por otra parte, la equidad de la eficiencia espectral alcanzable por cada usuario es alta, empeorando ligeramente cuando se activan todos los usuarios. Aunque la eficiencia espectral suma es claramente mayor cuando se activan los 20 usuarios, la eficiencia por usuario disminuye debido al aumento del término de ruido adicional que introduce el procesamiento con ZF. La diferencia entre la eficiencia espectral suma y la capacidad del canal es del 4% para el caso de 10 Tx, mientras que es del 15% para el caso de 20 Tx activos. No obstante, los valores de eficiencia espectral alcanzados en ambos casos son muy elevados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación TEC2017-86779-C2-1-R y TEC2017-86779-C2-2-R.

REFERENCIAS

- [1] G. J. Foschini, and M. J. Gans, "On Limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311–335, Mar. 1998, DOI: 10.1023/A:1008889222784.
- [2] T. L. Marzetta, "How much training is required for multiuser MIMO?," in *Proc. Fortieth Asilomar Conf. on Signals, Systems, & Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2006, pp.359-363.
- [3] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010, DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [4] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, "Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3899-3911, Jul. 2015, DOI: 10.1109/TWC.2015.2414413.
- [5] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E.G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013, DOI: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [6] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014, DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [7] B. Zhang, Z. Zhong, B. Ai, R. He, F. Tufvesson, J. Flordelis, Q. Wang, and J. Li, "Empirical evaluation of indoor multi-user MIMO channels with linear and planar large antenna arrays," in *Proc. IEEE Int. Symp. Personal Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Montreal, Canada, 2017, pp. 1-6.
- [8] J. Hoydis, C. Hoek, T. Wild, and S. ten Brink, "Channel measurements for large antenna arrays," in *Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS)*, Paris, France, 2012, pp. 811-815.
- [9] S. Payami, and F. Tufvesson, "Channel measurements and analysis for very large array systems at 2.6 GHz," in *Proc. European Conf. on Antennas and Propag.*, Prague, Czech Republic, 2012, pp. 433-437.
- [10] R.P. Torres, J. R. Pérez, J. Basterrechea, L. Valle, M. Domingo, L. Rubio, V. M. Rodrigo, J. Reig, "Análisis experimental de un canal massive MIMO en una picocelda de interior," in *Proc. XXXV symposium Nacional de la URSI*, Málaga, España, 2020, pp. 1-4.
- [11] R. K. Jain, D.-M. W. Chiu, and W. R. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination," Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA, 1984.
- [12] J. R. Pérez, R. P. Torres, L. Rubio, J. Basterrechea, M. Domingo, V. M. Rodrigo, and J. Reig, "Empirical Characterization of the Indoor Radio Channel for Array Antenna Systems in the 3 to 4 GHz Frequency Band," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94725-94736, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928421.
- [13] J. R. Pérez, R. P. Torres, M. Domingo, L. Valle, and J. Basterrechea, "Analysis of Massive MIMO Performance in an Indoor Picocell With High Number of Users," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107025-107034, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000602.