

ANTENA PARA BEAMFORMING EN REDES 802.11AD/AY EN 60 GHZ

Raúl Hans Hartmam Basaistegui, Mauricio González Nappa, Juan Pablo González Rivero, Benigno Rodríguez Díaz

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay

e-mail: {rhartmam, mgnappa, juanpg, benigno}@fing.edu.uy

RESUMEN

Las siempre crecientes demandas de tráfico de las redes inalámbricas y la saturación de las bandas más bajas del espectro radioeléctrico han llevado a la industria a adoptar el uso de bandas de frecuencia cada vez más altas. Una de esas bandas es la de 60 GHz que ha sido incorporada a los estándares de redes WiFi dentro del grupo 802.11 de IEEE en la pasada década. En este trabajo se presenta el diseño de una antena para uso con técnicas de beamforming en la banda de 60 GHz. Se revisan los estándares de operación en la banda, de los que se obtienen requerimientos y criterios para el diseño. Se realizan simulaciones y comparan con el diseño teórico, realizando ajustes y mejoras al diseño original. Se aplican técnicas para reducción de lóbulos secundarios y se evalúa la antena con técnicas de transmisión multiusuario, con el objetivo de incrementar la eficiencia espectral.

PALABRAS CLAVES: Beamforming, Ondas Milimétricas, Arreglos de Antenas, Diversidad Multi Usuario.

BEAMFORMING ANTENNA FOR 802.11AD/AY NETWORKS IN 60 GHZ

ABSTRACT

The ever-increasing traffic demands of wireless networks and the saturation of the lower bands of the radio spectrum have led the industry to adopt the use of ever higher frequency bands. One of those bands is the 60 GHz band that has been incorporated into the Wi-Fi network standards within the IEEE 802.11 group in the past decade. In this work, the design of an antenna for use with beamforming techniques in the 60 GHz band is presented. The operating standards in the band are reviewed, from which requirements and criteria for the design are obtained. Simulations are performed and compared with the theoretical design, making adjustments and improvements to the original design. Techniques are applied to reduce secondary lobes and the antenna is evaluated with multi-user transmission techniques, with the aim of increasing spectral efficiency.

KEY WORDS: Beamforming, Millimeter Waves, Array Antennas, Multi User Diversity.

1. INTRODUCCIÓN

La banda de 60 GHz, denominada banda V, surge como no licenciada en EE.UU. a partir de 1994 cuando el ente regulador FCC declara el bloque de 59-64 GHz como de uso libre. Organizaciones reguladoras en países de todo el mundo han destinado bloques similares, aunque en general no idénticos, también para uso no licenciado. Actualmente este bloque no licenciado en EE.UU. fue ampliado a 57-71 GHz, disponiendo de 14 GHz. Durante la segunda década de este siglo la banda de 60 GHz comienza a tener uso para las siguientes aplicaciones: redes de área personal (WPAN), redes de área local (WLAN), redes de acceso fijo inalámbrico de alcance metropolitano (WMAN) para acceso a Internet o backhaul de redes celulares y por último aplicaciones de radar de corto alcance (por ejemplo asistencia a estacionamiento, redes intra e inter vehiculares y otros).

En el presente trabajo se comienza describiendo las condiciones particulares de propagación en la banda, en la Sección II, justificando la necesidad del uso de beamforming. En la Sección III se comentan modelos de arquitecturas de transceptores con arreglos de antena y beamforming. En la Sección IV se

presentan los estándares de operación WLAN/WMAN de IEEE 802.11ad/ay y los requerimientos que generan sobre el diseño de la antena. En la Sección V se presenta el diseño de la antena y los resultados de las simulaciones. En la Sección VI se aplican técnicas de cancelación de lóbulos laterales y por último en la Sección VII se aplican técnicas para transmisiones multiusuario.

En las referencias [1], [2] se presenta el estándar IEEE 802.11ad y en [3]-[5] se presentan aplicaciones prácticas del mismo. En [6] se presenta el estándar 802.11ay, en [7] las mejoras que introduce en beamforming y en [8] un repaso de problemas abiertos para su implementación. En [9] se describen arquitecturas y compromisos de diseño para sistemas en bandas milimétricas, con énfasis en 60 GHz. En [10] se presentan algunos elementos de beamforming propios de la banda de 60 GHz. Por último en [11]-[13] se presentan implementaciones de sistemas multiusuario.

2. PROPAGACIÓN EN 60 GHZ

En esta banda existen algunos condicionantes particulares fundamentales que disminuyen el rango de distancias en los que es posible establecer enlaces confiables. En primer lugar, las tecnologías de circuitos de radiofrecuencia integradas de bajo costo, previstas para estas aplicaciones, presentan límites en la potencia de transmisión típicamente menores a 10 dBm, por limitaciones intrínsecas de las tecnologías de los dispositivos que se emplean. Esto típicamente es un orden de magnitud inferior que lo disponible en otras bandas empleadas para WLAN, como 2.4 o 5 GHz. En segundo lugar, la atenuación por moléculas de oxígeno presenta un pico en la banda de 60 GHz, que llega a valores de hasta de 15 dB/km. Esta limitación no es importante para redes desplegadas en interiores WLAN de corto alcance, pero sí es un factor limitante del rango de operación de redes exteriores WMAN. En tercer lugar, la necesidad siempre creciente de tasas de transmisión de datos de usuario, requiere emplear anchos de canal más amplios de hasta 2 GHz o más, que generan un piso de ruido alto comparado con los otros estándares de transmisión para WLAN o WPAN en bandas de frecuencia inferiores.

A continuación se comenta un ejemplo para esta banda de balance de potencias (link budget), empleando antenas omnidireccionales dipolares (de uso común en otras bandas). Considerando los siguientes parámetros: frecuencia (GHz) 60 GHz, ganancias de antenas de 2.15 dBi, potencias de transmisión conducidas de 10 dBm; se obtiene un margen de señal de 0.9 dB para apenas 2 m de distancia. En este ejemplo se observa que solo es posible establecer enlaces de ese orden de alcance, lo que restringiría las aplicaciones a redes de área personal. Es necesario entonces implementar antenas de alta ganancia para resolver estas limitaciones.

Para esta banda existen algunos aspectos que son favorables para el empleo de antenas de alta directividad mediante arreglos (arrays) de antenas individuales. En primer lugar, en 60 GHz la longitud de onda es de 5 mm en espacio libre, lo que permite arreglos de antenas de muy alta directividad con dimensiones físicas factibles de implementación, comparando con otras bandas a frecuencias más bajas. En segundo lugar la propagación es posible en general solo en condiciones de línea de vista, lo que facilita la aplicación de técnicas de conformación de haces (beamforming) mediante los arreglos mencionados. Además, para una aplicación WLAN al menos es conveniente que la directividad de las antenas sea adaptativa y permita enlaces móviles o al menos nómades, es decir que puedan cambiar su ubicación fija dentro del área de cobertura.

Por los aspectos mencionados es que en esta banda se implementan transmisiones direccionales, con lo que se logran mitigar las condiciones adversas de propagación, aprovechando aspectos favorables para su implementación.

3. ARQUITECTURAS PARA BEAMFORMING

De acuerdo a [9], existen tres modelos generales para implementar transceptores de radiofrecuencia basados en arreglos de antenas, de acuerdo a la etapa en el procesamiento de la señal en la que se controlan las amplitudes y fases de las señales que alimentan a cada antena. En la Fig. 1 a) se muestra el modelo de beamforming digital, se modifican digitalmente en banda base (BB) mediante procesamiento digital (DSP, Digital Signal Processing) amplitudes y fases de alimentación de entrada a cada elemento. Se requiere una cadena de radio (RF) y amplificador de potencia (PA, Power Amplifier) por elemento de

antena (ANT). En la arquitectura para beamforming puramente analógico, mostrado en la Fig. 1 b), el enfoque de la directividad se realiza modificando amplitudes y fases relativas de las señales de radiofrecuencia a la entrada de cada antenna. Esto se logra de forma adaptativa con variadores de fase (PS, phase shifters) y amplificadores de ganancia variables (VGA, variable gain amplifiers) en la red de alimentación de cada elemento del arreglo de antenas. Se utiliza solo una cadena de radio para transmisión a un usuario simple. En el modelo de beamforming híbrido se implementa un esquema intermedio entre los dos anteriores. Existen menos cadenas de radio que elementos de antenna, cada una se conecta a un subgrupo ("sub array") como el mostrado en la Fig. 1 c), o a todos los elementos del arreglo ("fully connected array"), como en la Fig. 1 d).

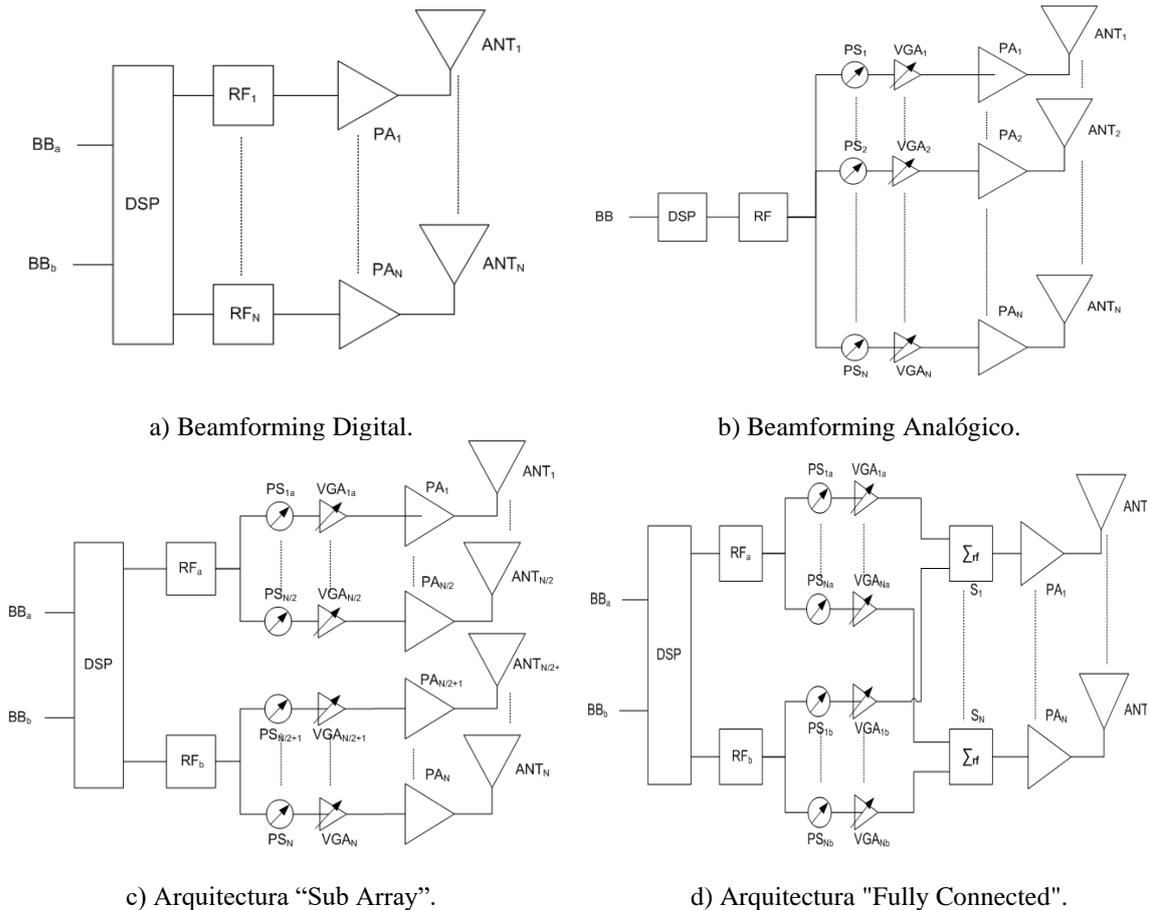


Figura 1: Arquitecturas de RF para beamforming.

4. ESTÁNDARES EN 60 GHZ

El estándar 802.11ad [1], [2] de IEEE publicado en 2012, impulsa el desarrollo en la banda de 60 GHz para aplicaciones WLAN que requieran velocidades de transmisión altas, por ejemplo video de alta definición o acceso a Internet de alta velocidad. El estándar contempla los requerimientos de beamforming que se vieron antes, asumiendo que las estaciones disponen de una o más antenas de varios elementos cada una y que son capaces de realizar beamforming analógico con ellas. Se especifican mecanismos para que dos estaciones o una estación y un punto de acceso (genéricamente llamados usuarios DMG por Directional Multi Gigabit) puedan elegir las configuraciones de antenna óptimas para maximizar el alcance y capacidad del enlace entre ambos.

La estructura de la trama de este estándar se modifica respecto a las de las anteriores versiones de 802.11 para incorporar períodos de entrenamiento de la configuración de beamforming. En el período de la trama denominado como BHI (Beacon Header Interval) se realiza el entrenamiento de barrido a nivel de sector

(SLS, Sector Level Sweep), en el que los dispositivos en cuestión alternan fases de transmisión y recepción con diferentes pesos (AWP, Antenna Weight Pattern) para cada elemento de antena, correspondientes a diferentes orientaciones predeterminadas de los haces conformados, mientras el otro dispositivo mantiene su configuración cuasi omnidireccional. Este mecanismo permite el establecimiento de un canal de control (Control PHY) de baja velocidad de transmisión y alta codificación redundante. Además, se incluye un mecanismo para poder refinar (BRP, Beamforming Refinement Protocol) la configuración de antena hacia valores específicos y óptimos para el dispositivo par, mejorando las condiciones de operación del enlace por sobre lo logrado con las orientaciones predeterminadas empleadas en la fase de barrido SLS. Con este mecanismo se logra establecer un canal de transmisión de datos de usuario a la mayor tasa de transmisión posible.

El estándar IEEE 802.11ay, ratificado en 2021, parte del esquema base de 802.11ad e introduce mejoras manteniendo la compatibilidad hacia atrás. Las mejoras permitirán llegar a tasas teóricas de 100 Gbps o más, soportadas por modulaciones de mayor eficiencia espectral, agregación de canales y técnicas MIMO para usuario simple y múltiple. En cuanto a los aspectos de beamforming, introduce técnicas adicionales entre las que se destacan TXSS (Transmit Sector Sweep) durante el período BRP y entrenamiento de beamforming asimétrico.

5. DISEÑO DE ANTENA

La tecnología de uso más extenso para antenas en ondas milimétricas es el diseño integrado al chip transceptor. La técnica microstrip, consistente en un arreglo de dipolos de tipo parche ("patches") sobre un plano reflector, separados por un sustrato de material dieléctrico, puede ser una alternativa para desarrollos experimentales. Las dimensiones relativamente pequeñas de las antenas pueden traer otros problemas de diseño a nivel de hardware y del método de fabricación.

En el patrón de radiación de arreglos de antenas se generan lóbulos múltiples cuando las separaciones entre los elementos son mayores a la longitud de onda. Para evitarlos la separación entre elementos debe ser una fracción de la longitud de onda, típicamente 0.5λ . El fenómeno físico de acoplamiento mutuo entre los elementos del arreglo distorsiona los diagramas de radiación respecto a las predicciones del factor de arreglo, para las que no se tiene en cuenta ese fenómeno. Para evitar este acoplamiento, se recomienda que la separación entre elementos del arreglo sea mayor a una longitud de onda. Existe entonces un compromiso para el diseño de la separación entre elementos entre evitar el fenómeno del acoplamiento mutuo por un lado y el de lóbulos múltiples por otro lado.

Requerimientos

Se asume que la antena a diseñar se empleará para una aplicación WLAN en interiores, tanto como punto de acceso (AP, Access Point) o estación (STA, Station). Se considera una apertura en acimut de 90° para configurar un concentrador de cuatro AP aprovechando que se dispone en la banda de cuatro canales de operación diferentes para evitar interferencias. De acuerdo a los estándares de operación 802.11ad/ay son relevantes las configuraciones quasi omnidireccional y la configuración en haz direccional para barrido SLS. Ambas configuraciones determinan en el caso de 802.11ad la cobertura del sector concentrador. Considerando el esquema de red arriba mencionado los enlaces se establecerán entre la configuración cuasi omnidireccional para el punto de acceso y la configuración en haz para la estación. Debido al spreading code de la capa física de control que suma 15 dB de ganancia de codificación, el estándar pide una ganancia de beamforming de 15 dB respecto a la antena cuasi omni, para poder mantener el enlace cuando se opere en la fase de transmisión de datos.

Software de simulación

El software de simulación NEC disponible para uso no comercial está basado en el método de los momentos para resolución de problemas electromagnéticos con condiciones de frontera. Este método plantea ecuaciones integrales, en lugar de ecuaciones diferenciales como se emplea en otras aplicaciones basadas en métodos por diferencias finitas, por ejemplo CST (Computer Simulation Technology) entre otros. La unidad básica de construcción de modelos es un alambre con el que se simula naturalmente elementos de antena del tipo dipolo y mediante grillas elementos de superficie. A su vez, cada alambre es

divido en segmentos. La aplicación 4nec2 es un desarrollo de uso libre que implementa las bibliotecas de distribución libre de NEC versión 2. Puede operar también con las bibliotecas NEC versión 4, versión que corrige algunas limitaciones de la versión 2 pero no es de uso libre. Algunas reglas básicas para modelos en 4nec2: a) Largo de cada segmento debe estar entre 5 y 10% de la longitud de onda, b) La razón entre largo del segmento y radio del alambre es crítica: si es mayor que 8 requiere "Thin Wire Kernel", si está entre 2 y 8 requiere "Extended thin Wire Kernel" y si este valor es menor que 2 la precisión de la simulación baja notoriamente.

Array de N antenas

En la Fig. 2 se muestra el diseño del arreglo de $N=11$ columnas y $M=3$ filas de dipolos de media longitud de onda con polarización vertical. Los 33 elementos deberían asegurar una ganancia de 15 dB o mayor ($10\log(M \times N)$) respecto a la ganancia en la configuración cuasi omnidireccional. La elección de un número impar de elementos facilita la simetría en el diagrama de radiación cuasi omnidireccional. El número mayor de elementos en los arreglos horizontales fue elegido para generar un mayor número de haces para el barrido en acimut respecto al del barrido en elevación, que es lo habitual en los escenarios WLAN. La separación horizontal de los elementos individuales es de 0.5λ para evitar el fenómeno de lóbulos de radiación en el semiplano frontal de la antenna. Para la separación vertical de la antenna en cambio se empleó 0.65λ como separación entre elementos, lo que evita solapamientos y además agrega ganancia a expensas de lóbulos en elevación, que no son problemáticos para la aplicación considerada.

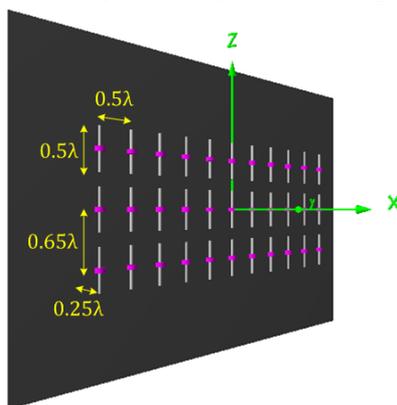


Figura 2: Array de 11x3 elementos.

Diagrama cuasi omnidireccional

Durante una parte de la fase de entrenamiento de beamforming, el dispositivo debe mantener un diagrama de radiación cuasi omnidireccional, de acuerdo al estándar 802.11ad. En el caso de una antenna sectorial, debe mantener un esquema lo más uniforme posible de ganancia en la apertura esperada para el sector. En la simulación, este diagrama en transmisión se realizó alimentando solamente el elemento central. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de radiación que se obtuvo en la simulación.

En la Tabla 1 se muestran algunos de los parámetros obtenidos en las simulaciones y que pueden considerarse apropiados de acuerdo a las limitaciones del simulador, incluyendo la apertura angular de media potencia (HPBW, Half Power Beam Width). Como ya se explicó cuando se habló del sustrato, estas simulaciones se enfocaron a nivel de sistema, con el objetivo de observar los efectos de los diferentes algoritmos considerados. El VSWR variará según el sustrato que se elija en una etapa de diseño de la antenna previa a su fabricación, lo que requiere simulaciones a un nivel más físico del desempeño de la antenna. Adicionalmente en esa etapa del diseño de la antenna se podría optimizar su diseño considerando la mejor adaptación de impedancias posible o incluso evaluar la conveniencia del uso de redes de adaptación de impedancia adicionales. La optimización del VSWR en base a simulaciones físicas que antecedería a la fabricación de este sistema de antenas quedó fuera del alcance de este trabajo, que pretende mostrar el alcance que puede tener la aplicación de los algoritmos considerados, con una antenna

de este tipo, que posteriormente fuera optimizada físicamente para obtener un funcionamiento real adecuado.

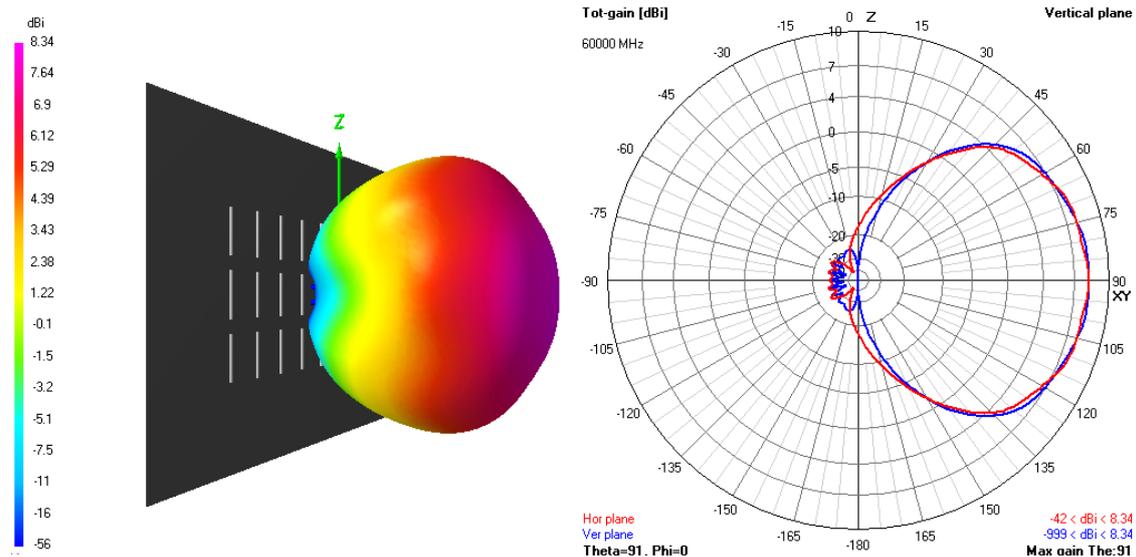


Figura 3: Diagramas de radiación de antena cuasi omnidireccional.

Tabla 1: Parámetros de antena cuasi omnidireccional.

Parámetro	Unidades	Valor
Ganancia máxima	dBi	8.34
Apertura H (HPBW)	°	82
Apertura V (HPBW)	°	86
F/B ratio	dB	34.9

Barrido SLS

En la fase SLS del proceso de entrenamiento de beamforming, el dispositivo debe presentar un haz de máxima ganancia apuntado a las direcciones a cubrir dentro del área deseada de cobertura. En base al ángulo de máxima directividad deseado, se calcularon los valores de la fase progresiva β necesaria en cada elemento del arreglo, mediante la expresión clásica [14]:

$$\beta = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\alpha) \quad (1)$$

siendo α el ángulo de acimut o elevación deseado de máxima directividad, d la separación horizontal entre elementos de antena individuales en el arreglo y λ la longitud de onda. En la Fig. 4 se muestra el diagrama de radiación obtenido para un acimut de -20° , medido a partir de la dirección frontal, y para una elevación 95° medida a partir del eje vertical.

En la Tabla 2 se muestran algunos de los parámetros de antena obtenidos. Se obtuvo una ganancia de aproximadamente 13 dB sobre la ganancia de la antena en configuración cuasi omnidireccional, por lo que no se alcanzó el objetivo de diseño de 15 dB. Es posible que las impedancias mutuas entre elementos de las antenas puedan explicar la discrepancia con lo esperado.

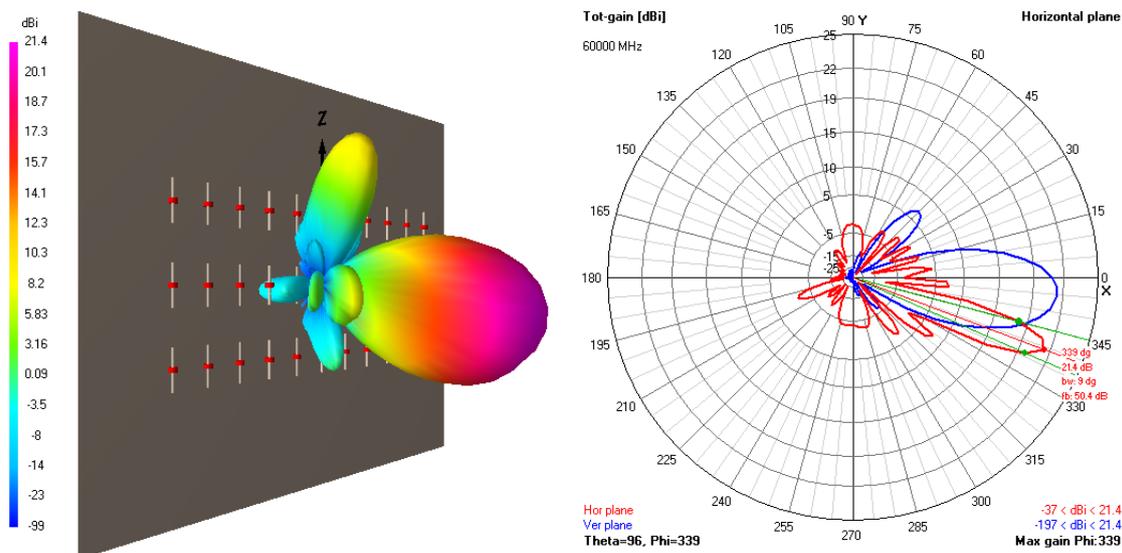


Figura 4: Diagramas de radiación para barrido SLS.

Tabla 2: Parámetros para configuración SLS.

Parámetro	Unidades	Valor
Ganancia máxima	dB	21.19
Apertura H (HPBW)	°	10
Apertura V (HPBW)	°	26
F/B ratio	dB	24.1

En la Fig. 5 se observa la correlación entre los ángulos de máxima ganancia alcanzados y los deseados. Se muestra que el ángulo de mayor directividad horizontal coincide con el simulado para valores dentro del espacio visible del arreglo. El error obtenido es mayor a medida que se acerca a los bordes de la cobertura.

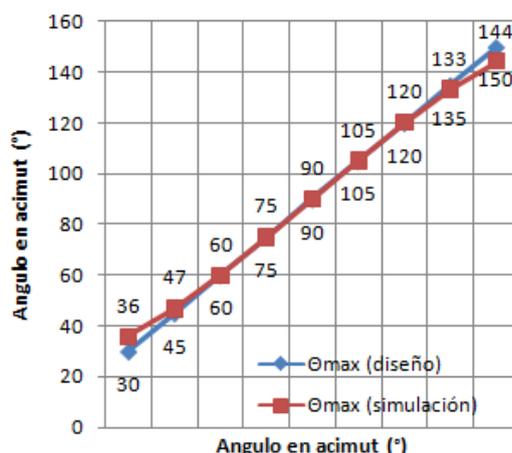


Figura 5: Correlación entre diseño y simulación.

En la Fig. 6 se muestran superpuestos los patrones de radiación horizontal y vertical respectivamente, para una selección de haces que realizan las fases de SLS. El criterio para elegir los haces se basó en elegir una cantidad igual a la de los elementos de antena en cada plano y de acuerdo a esa elección hacer los

haces equiespaciados para tener una cobertura uniforme. En base a lo anterior se obtuvieron once haces horizontales y tres haces verticales.

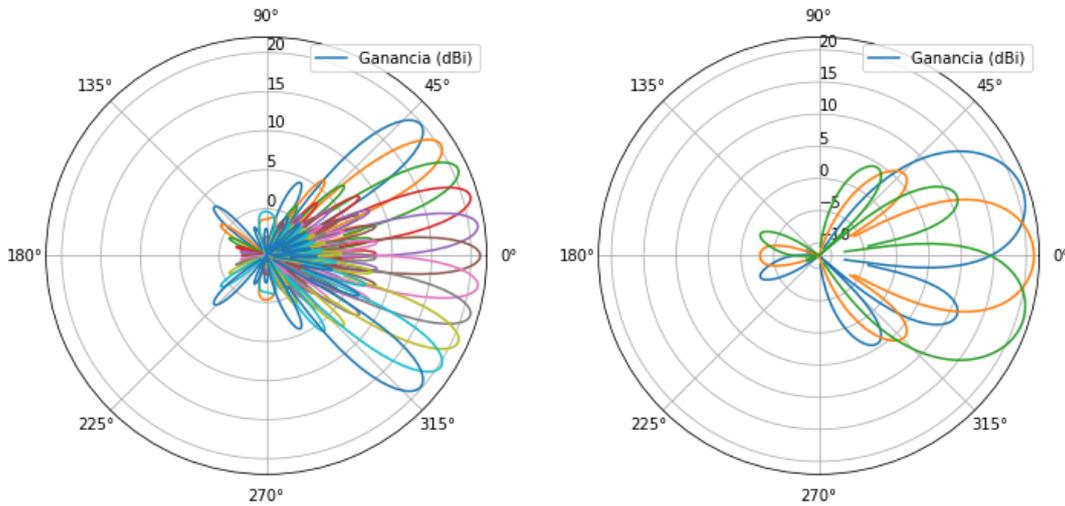


Figura 6: Barridos SLS en acimut (izquierda) y en elevación (derecha).

Para el estándar 802.11ad, en el balance de potencias que determina el alcance del enlace intervienen la antena cuasi omnidireccional del punto de acceso contra el haz conformado SLS en la estación. De acuerdo a lo anterior, un nuevo balance de potencias considerando un enlace con la antena diseñada en ambos dispositivos presenta 21 dBi para la antena de transmisión en configuración SLS y 8 dBi par la antena de recepción en configuración cuasi omnidireccional. Con esos parámetros, el nuevo balance de potencias muestra la mejora en el alcance de este nuevo enlace (30m) respecto al presentado en la Sección II de antenas omnidireccionales (2m).

6. LOBULOS SECUNDARIOS

Para restringir la aparición de los lóbulos secundarios en el diagrama de radiación, se utilizaron diferentes tipos de ventanas sobre las amplitudes de los elementos de antena. Los lóbulos secundarios tienden a disminuir la CINR para los terminales operando en la celda, en el caso de usar transmisiones múltiples. Se probaron ventanas Hamming, Blackman y Dolph-Chebyshev, siendo las últimas las de mejor resultado. En la Fig. 7 se compara la aplicación de Dolph-Chebyshev donde se muestra la cancelación completa de los lóbulos secundarios a costa de una reducción de la ganancia máxima de 2 dB y ampliación en el ancho del haz a 16°. Los parámetros de la antena con ventana se muestran en la Tabla 3.

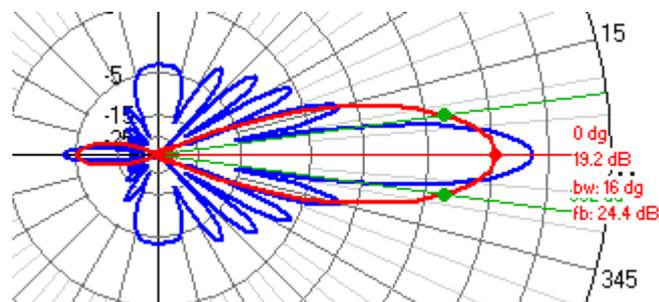


Figura 7: Diagrama horizontal con ventana (rojo) y sin ventana (azul), para el haz $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$.

Tabla 3: Parámetros de antena con ventana.

Parámetro	Unidades	Valor
Ganancia máxima	dBi	19.20
Apertura H (HPBW)	°	16
Apertura V (HPBW)	°	26
F/B ratio	dB	24.4

7. CONFIGURACION MULTIUSUARIO

De acuerdo con la evolución propuesta por el estándar 802.11ay [6]-[8] de implementar transmisiones multiusuario y tomando un esquema como el mostrado en la Sección III de arreglo completamente conectado, se simuló la capacidad de la antena diseñada para poder soportar tráfico multiusuario. En referencia a la Fig. 1 d) con dos cadenas de radio, se considera que existen en el área de cobertura dos usuarios A y B con interés de cursar tráfico simultáneo. Para poder transmitir a ambos al mismo tiempo realizando multiplexación espacial, el sub arreglo debe conformar un haz que maximice la señal sobre el usuario A (usuario deseado) y minimice la señal sobre el usuario B (usuario no deseado), maximizando entonces la relación señal a ruido (SNR) para el usuario A. De forma análoga el sub arreglo b debe maximizar la SNR para el usuario B, que es el usuario deseado para este sub arreglo. Se considera en este modelo solamente el aporte del beamforming analógico de la configuración multiusuario, sin incluir la codificación en banda base necesaria para la ecualización coherente del canal inalámbrico y que esta prevista en el estándar 802.11ay.

Considerando el arreglo, se simularon haces conformados para compartir el medio con un usuario A en acimut 0 (“boresight”) y con el usuario B ubicado en diferentes posiciones para poder evaluar la efectividad de los diferentes algoritmos. Para simplificar la evaluación se consideraron los ángulos de barrido SLS como posiciones para el usuario B. En la Fig. 8 a) se muestran cortes de los diagramas de radiación horizontales de la solución más sencilla, que consiste en aplicar a cada usuario el haz resultado del proceso del entrenamiento de beamforming.

Dado que los valores de SNR obtenidos no son suficientes para modulaciones de índice alto se simuló un algoritmo para maximizar SNR, dadas las direcciones o AWP conocidas para los dos usuarios intervinientes, que minimiza la ganancia del arreglo en la dirección del usuario B. El algoritmo de cancelación logra el objetivo de cancelar al usuario B obteniendo valores de SNR mayores que 30 dB, pero como se ve en la Fig. 8 b) el nivel de lóbulos secundarios se mantiene alto, lo que genera los problemas mencionados en la Sección VI.

Considerando lo anterior, para el esquema multiusuario se implementó una combinación de los algoritmos de cancelación y de ventana para minimizar los lóbulos secundarios. En la Fig. 8 c) se muestran los diagramas de radiación simulados en condiciones similares a la simulación sin ventana. La nueva configuración de cancelador más ventana logra el objetivo de minimizar los lóbulos secundarios y como consecuencia mejorar los valores de SNR para valores alejados del acimut deseado de 0°. Sin embargo, para el acimut “adyacente” de 8°, se observa que la cancelación de los lóbulos laterales es menor y además el haz para el usuario A se desenfoca en unos 4°. Esto es consecuencia de que con la ventana se agranda el haz principal y el algoritmo de cancelación pierde su capacidad de discriminar acimuts cercanos.

En simulaciones numéricas, considerando el mismo factor de arreglo y ventana se obtienen resultados similares para usuarios A y B en 0 y 8 grados respectivamente, como se muestra en la Fig. 8 d). En la Fig. 9 se muestran los resultados resumidos para las cuatro simulaciones. Se observa la mejora introducida por el algoritmo de SNR máxima y el efecto de la ventana para los acimuts a cancelar más alejados del acimut cero.

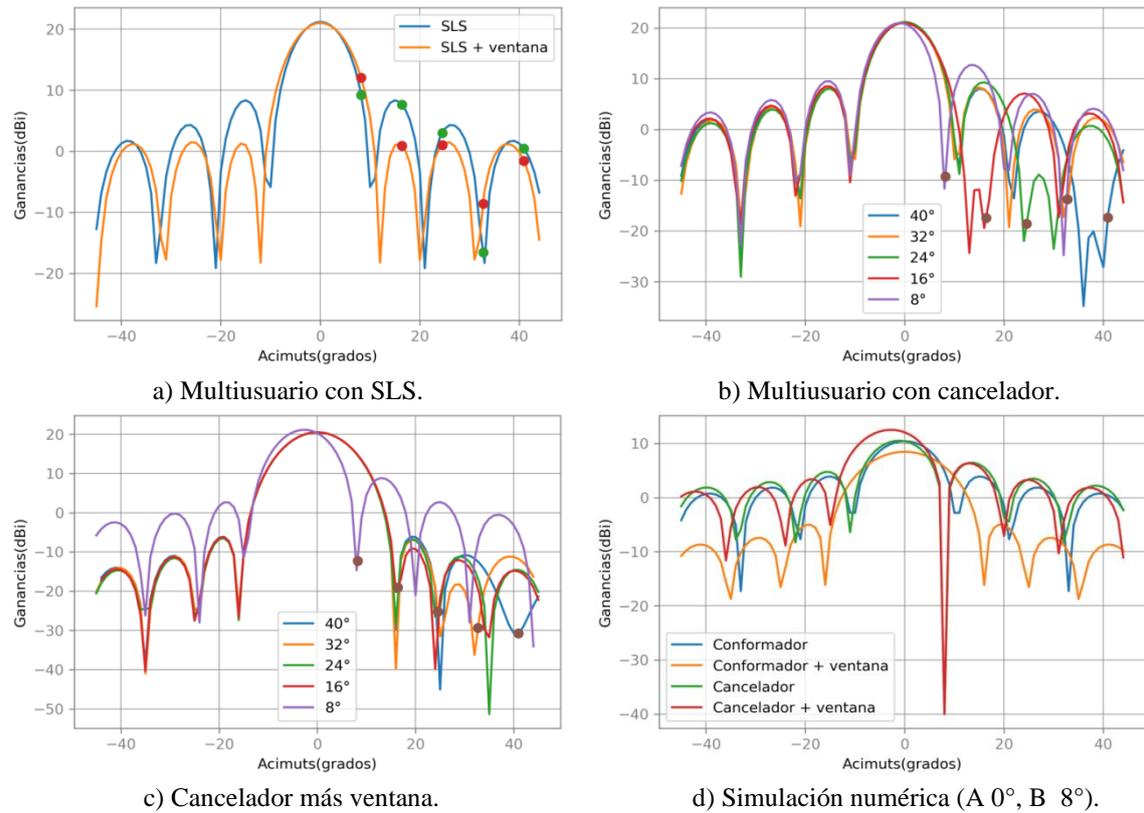


Figura 8: Configuraciones de beamforming para transmisión multiusuario.

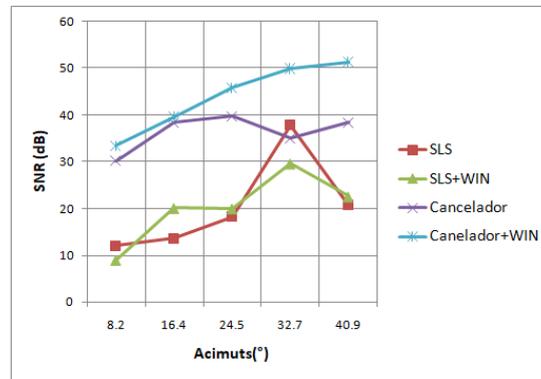


Figura 9: SNR para los diferentes métodos.

La mejora en la capacidad de la celda debida a la configuración multiusuario depende directamente de la capacidad de discriminación angular del arreglo de antenas de la estación base. Para realizar una estimación se considera que la estación base tiene por antena el arreglo visto y dos cadenas de radio con bandas base independientes, con las que puede transmitir a un máximo de dos usuarios en simultáneo. Para simplificar el análisis se consideran solamente los haces estáticos empleados para el barrido SLS. La estación base podrá transmitir simultáneamente a dos usuarios a los que les corresponda haces diferentes y además no adyacentes, considerando la distorsión vista arriba en los haces adyacentes. En la Fig. 10 se muestra el escenario y las combinaciones de haces admisibles para multiplexación. Asumiendo que los usuarios están uniformemente espaciados en acimut, la ganancia máxima en capacidad por esta configuración multiusuario es entonces aproximadamente 74% superior a la capacidad de usuario simple.

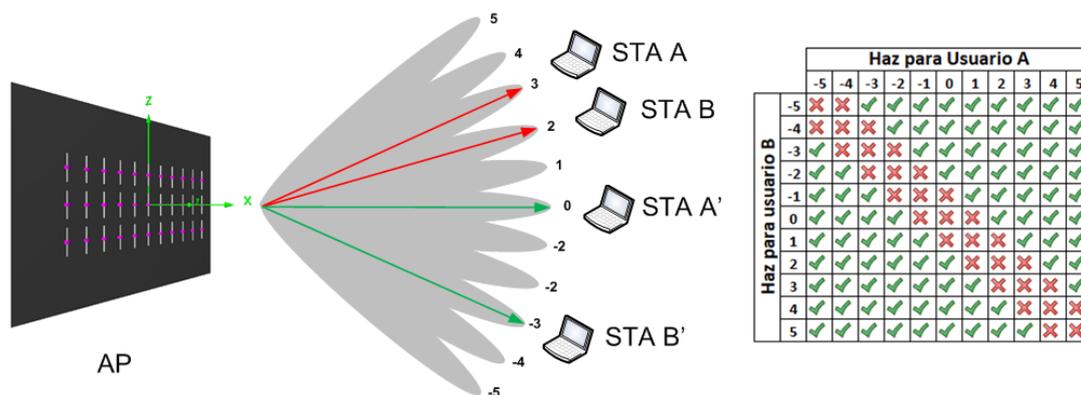


Figura 10: Oportunidades de multiplexación de dos usuarios A y B.

8. CONCLUSIONES

Se revisaron los estándares 802.11ad y 802.11ay en lo concerniente a beamforming y se realizó el diseño de una antena para la aplicación de referencia en configuración de usuario simple. Con este diseño de antena se estima una cobertura de 30 m, superior a la cobertura con antenas dipolares de 2m y permitiendo aplicaciones de cobertura interior. Se implementaron algoritmos de cancelación de usuarios interferentes para una configuración multiusuario con dos cadenas de radio y beamforming analógico exclusivamente, obteniendo una mejora en la capacidad de la celda de aproximadamente 74% respecto a la capacidad de la celda con usuario simple.

REFERENCIAS

- [1] Nitsche, Thomas et al. «IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gigabit-per-Second Wi-Fi». *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, núm. 12, pp. 132-141.
- [2] IEEE 802.11 WG. *Amendment 3: Enhancements for Very, High Throughput in the 60 GHz Band*. IEEE 802.11ad. IEEE. 2012.
- [3] Nitsche, Thomas. et al. «Boon and Bane of 60 GHz Networks: Practical Insights into Beamforming, Interference, and Frame Level Operation». *Proceedings of the 11th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, 2015, núm. 17, pp. 1-13.
- [4] Verma, L. et al. «Backhaul need for speed 60 GHz is the solution». *IEEE Wireless Communications*, 2015, vol. 22, núm. 6.
- [5] P. Legg et al. «Meshed Backhauling of Small Cells Using IEEE802.11ad at 60GHz». *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2015.
- [6] Ghasempour, Yaman et al, «IEEE802.11ay: Next Generation 60 GHz Communication for 100 Gbps Wi-Fi», *IEEE Communications Magazine*, 2017.
- [7] Da Silva, Claudio et al, «Beamforming Training for IEEE 802.11ay Millimeter Wave Systems», *Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, San Diego USA, 2018.
- [8] Phei Zhou et al, «IEEE 802.11ay based mmWave WLANs: Design, Challenges and Solutions», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, Vol. 20.
- [9] Han Yan et al, «Performance, power and area design trade-offs in millimeter wave transmitter beamforming architectures», *IEEE Circuit and systems*, Vol. 12, Núm 2, 2019.
- [10] Gouri Nayana, «An Overview on Beamforming and its Issues for 60 GHz Wireless Communications», *ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering (ITSI-TEEE)*, Volume -1, Issue -4, 2013.
- [11] Pisek, E.; Abu-Surra,S.; Mott, J.; Henige, T. and Sharma, R. «High throughput millimeter-wave MIMO beamforming system for short range communication», *IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2014, pp. 537-543.
- [12] Honda, A. et al. «System validation of millimeter-wave beam multiplexing with interleaved hybrid beam-forming antennas», *IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2016, pp. 1-5.

- [13] Blandino, Steve et al, «Multi-User Frequency-Selective Hybrid MIMO Demonstrated Using 60 GHz RF Modules», IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Portugal, 2018.
- [14] Balanis, Constantine. *Antenna theory, analysis and design (4th edition)*, Wiley, 2016, pp. 1104, ISBN: 978-1-118-64206-1.

SOBRE LOS AUTORES

Raúl Hartmam obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico, en la Facultad de Ingeniería (FING) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 2004. Desde 1998 a 2000 desempeñó tareas docentes en UdelaR. Entre 2005 y 2008 participó por UdelaR en proyectos de evaluación de desempeño de redes celulares, en conjunto con el operador público Antel. Desde 2000 a 2007 se desempeñó como ingeniero en varias empresas privadas locales de integración de tecnología. Desde 2007 a la fecha trabaja para la firma Dedicado S.A., Montevideo, Uruguay, actualmente desempeñándose como responsable de ingeniería de redes de acceso inalámbricas. Desde 2018 cursa Maestría en Ingeniería Eléctrica en UdelaR, teniendo como principales áreas de estudio Beamforming, MIMO Masivo, Arreglos de antenas y Transmisiones Multiusuario. Desde 2018 también integra el grupo de Sistemas Inalámbricos y Radiofrecuencia (SIRF), en el IIE, FING, UDELAR. ORCID 0000-0003-4060-2631.

Mauricio González nació en Montevideo, el 4 de diciembre de 1987. Egresó en 2012 como Ingeniero Electricista, perfil Telecomunicaciones, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (FING-UdelaR). Durante 2014-15 realizó sus estudios de maestría en la Universidad Politécnica de Valencia. Su tesis “*Detección no coherente en Sistemas Massive MIMO*” fue dirigida por Vicenc Almenar Terré. Su interés principal es en el área de redes inalámbricas móviles GSM, WCDMA, LTE, 5G. Es Asistente (G2), en el Instituto de Ingeniería Eléctrica desde 2016 y forma parte del cuerpo docente de las asignaturas Antenas y Propagación y Multimedia sobre IP, además de integrar el grupo SIRF. Adicionalmente, se desempeña profesionalmente en la industria. ORCID 0000-0002-4454-6609.

Juan Pablo González nació en Montevideo, el 3 de Febrero de 1983. Egresó en 2009 como Ingeniero Electricista, perfil Telecomunicaciones, en la FING, UdelaR. En 2019 obtuvo el título del postgrado de Especialización en Telecomunicaciones en FING-UdelaR. Actualmente es candidato a Doctor en la misma institución. Su tesis “*Improvements of OFDM Networks by Using Polarization Diversity and Beamforming*” es dirigida por Dr.-Ing. Benigno Rodríguez Díaz. Su interés principal está en el área de redes inalámbricas móviles 4G, 5G, 802.11*, IoT, Aprendizaje de Máquinas y Ciencia de Datos. Es Asistente (G2), en el Instituto de Ingeniería Eléctrica desde 2011 y forma parte del cuerpo docente de las asignaturas Antenas y Propagación, Temas Avanzados de Sistemas Inalámbricos y Diseño de Redes Inalámbricas de Clase Empresarial, además de integrar el grupo SIRF. Adicionalmente, se desempeña profesionalmente en la industria como Senior ML Research Engineer. ORCID 0000-0003-4632-5612.

Benigno Rodríguez obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico y el grado de Magister en Ingeniería Eléctrica (opción Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 1997 y 2004 respectivamente. En 2007 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Telecomunicaciones, de la Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburgo, Alemania. Desde 1993 a 1999 se desempeñó como Asistente de Investigación en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería (FING), UdelaR. Desde 1998 a 2004 se desempeñó como Asistente de Investigación en el Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE), FING, UdelaR. Desde 1997 a 2004 ocupó el cargo de Jefe del departamento de Ingeniería en Carisul S.A. (NEC de Uruguay). Desde 2008 a 2016 fue Profesor Adjunto del Depto. de Telecomunicaciones del IIE, FING, UdelaR. Desde 2008 a 2014 se desempeñó también como Responsable de la Planificación de Red en la empresa Dedicado S.A., Montevideo, Uruguay. Desde junio de 2014 a junio de 2015 ocupó el cargo de Coordinador de Carrera en el área de Mecatrónica en la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), creando la carrera de Tecnólogo en Mecatrónica, como un título intermedio de una Ingeniería en Mecatrónica. Actualmente integra el Sistema Nacional de Investigación (SNI), Nivel I y ocupa el cargo de Profesor Agregado (G4), en Régimen de Dedicación Total en el IIE, FING, UdelaR. Sus principales intereses como investigador se centran en las áreas de: sistemas inalámbricos basados en OFDM, Láseres en Espacio Libre, Ondas Milimétricas y Redes de Sensores Inalámbricos, liderando el grupo SIRF en el IIE, FING, UdelaR. ORCID 0000-0002-0046-4281.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses de los autores o de las instituciones a las cuales pertenecen en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Raúl Hans Hartmam Baisastegui:** Conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo.
- **Mauricio González Nappa:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y sugerencias acertadas para la elaboración de este.
- **Juan Pablo González Rivero:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y sugerencias acertadas para la elaboración de este.
- **Benigno Rodríguez Díaz:** Contribución a la idea y organización del artículo, seguimiento del trabajo, revisiones detalladas y sugerencias acertadas para la elaboración del artículo.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

