

# Arreglo de Antenas Parche con distribución Dolph–Tchebyscheff para la Banda de 2.4 GHz

Juan E. Ise, Diego Zimmerman y Alon Druck

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.

## Resumen

El diseño de un arreglo lineal de antenas de tipo parche para la banda de 2.4 GHz es abordado. A los efectos de conseguir una antena de alta ganancia para uso en la banda de WiFi 2.4 GHz se diseña un arreglo de 4x1 antenas parche rectangulares excitadas con un divisor de líneas microcinta de tipo paralelo. La distribución de amplitudes es de tipo Dolph–Tchebyscheff buscando el balance óptimo entre ganancia y lóbulos secundarios. La adaptación de impedancias y distribución de potencia se logra a partir del diseño de líneas con diferentes impedancias características y transformadores de  $\lambda/4$ .

En un primer paso se procede al diseño de una antena parche rectangular, su simulación, construcción y mediciones, para evaluar la respuesta individual, previa a la conformación del arreglo. A continuación, se diseña el arreglo lineal con la red de alimentación.

Para el proyecto se utiliza un sustrato epoxi FR-4, material este de bajo costo y fácil de conseguir.

Los resultados obtenidos muestran una ganancia cercana a los 14 db y son acordes a lo esperado, las discrepancias entre lo simulado y lo medido son analizadas.

**Palabras clave:** Arreglos de Antenas, Antenas Parche, Dolph–Tchebyscheff.

## **Patch Antenna Array with Dolph–Tchebyscheff distribution for 2.4 GHz Band**

### **Abstract**

*In this work, we designed a linear 4x1 array of rectangular patch antennas for the 2.4 GHz Wi-Fi band excited with a parallel microstrip splitter. In order to obtain the best ratio between antenna gain and secondary lobes, a Dolph – Tchebyscheff distribution of amplitudes was used. The impedance matching and the power distribution are obtained from the design of microstrip lines with different characteristic impedances and  $\lambda/4$  impedance transformers.*

*First, we proceeded to design, simulate and build the rectangular patch antenna to test the individual behavior. The substrate used was FR-4 epoxy due to its properties and low cost. As a next step, the linear 4x1 array including the feed network was designed.*

*The results obtained are consistent with expectations with gain values around 14 dB. The discrepancies between the simulated and the measured are also analyzed.*

**Keywords:** Antenna Array, Patch Antenna, Dolph–Tchebyscheff.

## Introducción

Actualmente la demanda de conectividad inalámbrica, en bandas de libre acceso, para diferentes servicios y dispositivos está en constante crecimiento, cambiando sustancialmente el entorno en el cual se despliegan estas redes. El constante incremento de las redes dentro de una misma área, genera una situación de interferencia mutua del canal de comunicaciones afectando la disponibilidad y capacidad de cada enlace. El nuevo estándar IEEE 802.11 ax, **Khorov et al.** (2018) es un ejemplo de la constante evolución para poder sobrellevar los nuevos desafíos que se presentan, siendo una componente importante de esta solución el uso de arreglos e implementación de técnicas de formación de haz (beamforming) en las antenas que emplean los dispositivos como se sugiere en **Nair et al.** (2015). Este trabajo trata sobre el diseño y desarrollo de un arreglo de antenas parche que permita incrementar la ganancia del sistema y con ello mejorar el canal de comunicación entre dispositivos, **Aji et al.** (2016).

Las antenas son una componente esencial de todo sistema de comunicaciones inalámbricos, y por lo tanto es deseable que las mismas estén optimizadas para lograr el máximo rendimiento. Existen diferentes tipos de antenas que pueden utilizarse para una misma aplicación con sus correspondientes ventajas y desventajas, dependiendo la elección final de considerandos diversos, como tamaño, forma, peso, perfil aerodinámico, etc.

Los sistemas de comunicaciones utilizan conjuntos de antenas, llamados arreglos (*array*), más que elementos individuales por dos motivos:

- Incremento de la ganancia
- Capacidad de modificar la dirección del máximo de la ganancia (beamforming)

El presente trabajo consiste en el diseño y desarrollo de un arreglo lineal de cuatro antenas de tipo parche (patch) con una distribución de amplitud del tipo Dolph-Tchebyscheff, **Kraus** (1988), para la banda de 2.4 Ghz.

Las antenas seleccionadas son de tipo parche rectangular, y se caracterizan por:

- Bajo peso
- Bajo volumen (configuración plana)
- Adaptación a superficies no planas

- Fácil construcción y producción
- Compatibilidad con técnicas de construcción de circuitos integrados

Siendo sus principales desventajas:

- Baja ganancia y eficiencia
- Poca capacidad para manejo de potencia
- Ancho de banda moderado

Son similares en construcción un capacitor de placas paralelas, siendo de particular interés las líneas de campo que salen de la estructura, y que serán las que otorgan a este tipo de estructura su capacidad radiante, según se puede ver en la figura 1.

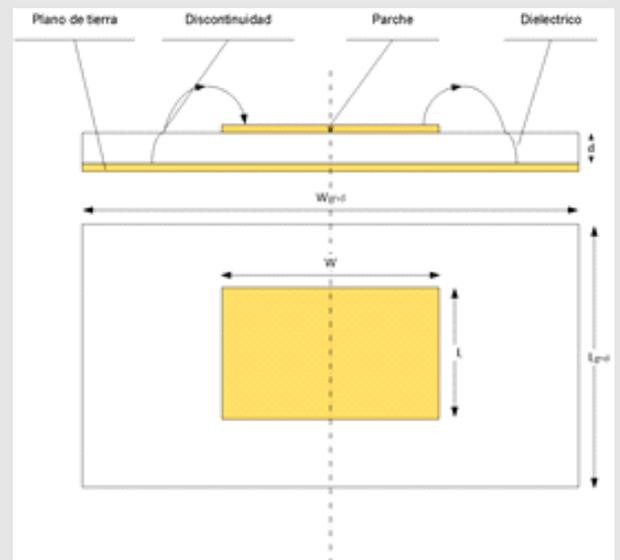


Fig. 1 Antena parche rectangular.

El trabajo se estructura de la siguiente manera:

- Diseño de una antena parche rectangular
- Diseño red de alimentación Dolph Tchebyscheff
- Diseño del arreglo de antenas
- Resultados de las simulaciones y mediciones
- Conclusiones

## Diseño de antena parche rectangular

Como se puede ver en la figura 1 las líneas de campo eléctrico se establecen entre el parche superior y el plano de tierra, atravesando en su recorrido el medio que rodea a la antena y el sustrato dieléctrico. El cam-

bio de medio origina una discontinuidad en la línea de campo eléctrico, y es debido a esto, que para el cálculo de la antena se considera la permitividad eléctrica efectiva  $\epsilon_{eff}(1)$  que sería la equivalente de considerar a la antena inmersa en un medio homogéneo, **Balanis** (2005).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}} \quad (1)$$

Donde  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa del sustrato,  $d$  su espesor y  $W$  el ancho del parche.

En cuanto a la geometría del parche, las variables de interés son, la longitud física  $L$  y el ancho  $W$ . La longitud se relaciona con la frecuencia de resonancia  $f_r$  de la antena, mientras que el ancho está relacionado con la eficiencia de la misma.

En una primera aproximación se puede considerar  $L$  como:

$$L = \frac{\lambda}{2} \text{ m} \quad (2)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el medio de trabajo, y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

$$\lambda = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

Sin embargo, debido al efecto de borde de las líneas de campo (*fringing*), la antena se ve desde el punto de vista eléctrico más grande, dando lugar a la longitud efectiva del parche  $L_e$  que resulta ser ligeramente mayor a la longitud física del mismo.

La diferencia entre la longitud física y la eléctrica será:

$$\Delta L = 0.412 d \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{d} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{d} + 0.8\right)} \quad (4)$$

Finalmente, la longitud real del parche  $L$  será:

$$L = L_e - 2\Delta L \text{ m} \quad (5)$$

El ancho del parche  $W$  se determina a partir de la siguiente expresión, **Balanis** (2005):

$$W = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\epsilon_0 * \mu_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (6)$$

Por último, es importante destacar que el alto del sustrato  $d$ , como así también el valor de su permitividad relativa  $\epsilon_r$  afecta el desempeño del elemento radiante, influyendo positivamente cuando  $d$  aumenta y negativamente cuando  $\epsilon_r$  disminuye.

Si bien el objetivo del trabajo consiste en el diseño de un arreglo de 4 elementos, a los efectos de poder hacer mediciones comparativas se construyó un prototipo de antena parche individual, para lo cual se consideró la misma alimentada por medio de una línea de transmisión como muestra, la figura 2.

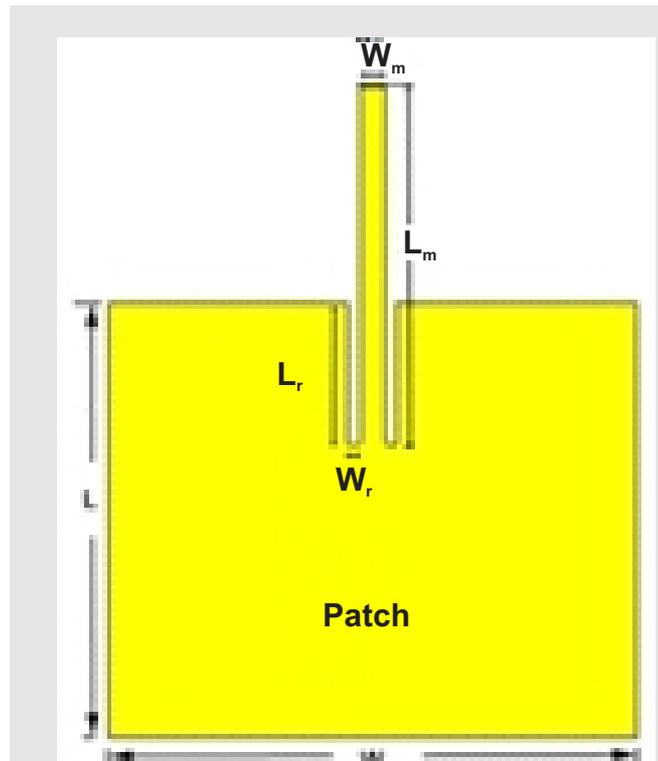


Fig. 2 Antena parche alimentada con línea de transmisión con ranuras.

Para lograr la adaptación de la antena se recurre al uso de ranuras colocadas a ambos lados de la línea de alimentación como muestra la figura 2.

La impedancia de entrada de una antena parche se puede aproximar como sigue, **Balanis** (2005):

$$G_{in} = \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda}\right)^2 & \text{si } W < 100\lambda \\ \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda}\right) & \text{si } W > 100\lambda \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{G_{in}} \quad (3)$$

Mientras que las dimensiones de las ranuras se pueden estimar a partir del siguiente ábaco, que se ilustra en la figura 3.

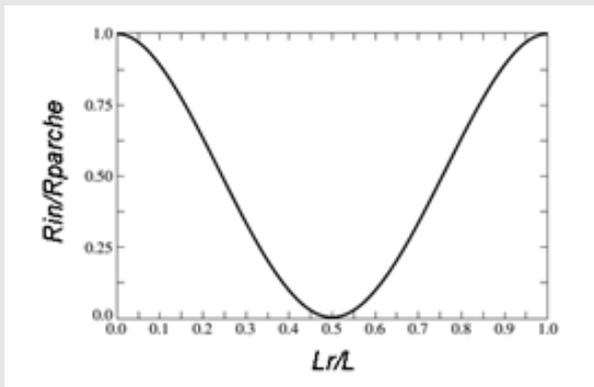


Fig. 3 Relación entre la resistencia de entrada y la resistencia del parche en función de la longitud relativa de las ranuras de adaptación.

Para la construcción del prototipo se utilizaron placas cobreadas simple faz del tipo FR4 cuyas características eléctricas se listan en la tabla 1. Los parámetros de diseño son:

$$f_r = 2.4 \text{ Ghz} \quad Z_{in} = 50 \Omega$$

Tabla 1: Especificaciones de la placa FR4

Parámetro	Valor
Tipo de sustrato	FR4
Permitividad dieléctrica relativa	4.2
Altura del sustrato	1.588 mm
Tangente de pérdida	0.02
Elemento conductor	cobre
Altura del elemento conductor	35 μm

Para la alimentación de la antena se utilizó una línea de transmisión de las siguientes dimensiones:

$$W_m = 3.082 \text{ mm} \quad L_m = 17.44 \text{ mm.}$$

A partir de los cálculos realizados se procede a la simulación de dicha antena con herramientas de análisis computarizadas, optimizando los parámetros calculados según las expresiones arriba detalladas, los resultados se listan en la tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones de la antena parche prototipo

Parámetro	Valor de diseño	Valor optimizado
W	52.07 mm	57 mm
L	41.83 mm	39.3 mm
L <sub>r</sub>	12.13 mm	7.66 mm
W <sub>r</sub>	1.21 mm	0.77 mm
W <sub>GND</sub>	83.12 mm	60 mm
L <sub>GND</sub>	72.88 mm	50 mm
W <sub>m</sub>	3.08 mm	3.07 mm
L <sub>m</sub>	17.44 mm	18.36 mm

Durante el proceso de optimización se logró una mejora sustancial modificando el diseño de la antena a partir de la utilización de dos placas de FR4 separadas por una pequeña sección de aire aumentando así la altura  $d$  del dieléctrico, mientras disminuye la permitividad dieléctrica efectiva del sustrato.

Los resultados de la simulación para la antena prototipo se ilustran en las figuras 4 y 5.

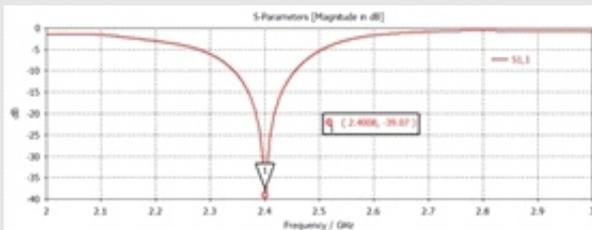


Fig. 4 Coeficiente de reflexión antena prototipo.

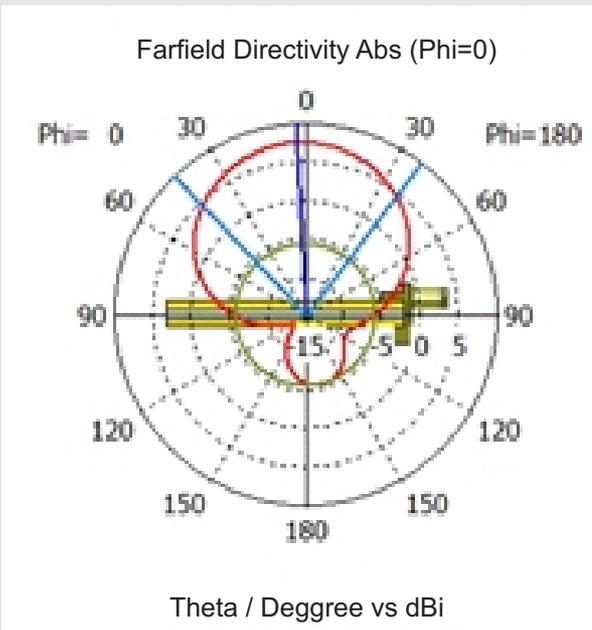


Fig. 5 Diagrama de radiación antena prototipo.

La tabla 3 lista los valores del prototipo.

También a los efectos de aproximar los resultados obtenidos en el simulador con las mediciones efec-

tuadas sobre el prototipo, diferencias que tienen que ver con la frecuencia de resonancia observada entre ambos procesos, se aplica una pequeña modificación sobre el valor de la permitividad relativa que usa el simulador, debido a que no se disponen datos directos del fabricante de la placa.

Tabla 3: Parámetros antena prototipo

Parámetro	Valor
Frecuencia	2.4 GHz
Eficiencia de Radiación	-0.6615 dB
Eficiencia Total	-0.6622 dB
Magnitud del lóbulo principal	7.51 dBi
Dirección del lóbulo principal	3 grados
Ancho de Banda Angular	80.5 grados
Nivel de los lóbulos secundarios	-13.2 dB

### Diseño red de alimentación Dolph Tchebyscheff

Los arreglos de antenas permiten mejorar la ganancia del sistema, controlar la dirección del máximo y mejorar la relación entre el lóbulo principal y los secundarios, básicamente tenemos tres variables a conjugar en su diseño:

- Posición de los elementos
- Potencia de los elementos
- Fase de los elementos

De esta forma es posible sintetizar el patrón de radiación de un sistema de acuerdo con los requerimientos del proyecto.

En este caso se utiliza la distribución de amplitud Dolph-Tchebyscheff que se caracteriza por una asig-

nación de amplitud no uniforme que permite obtener una distribución óptima, maximizando la relación entre el lóbulo principal y los lóbulos laterales. Para lograr esto se debe especificar el nivel deseado de los lóbulos laterales frente al lóbulo principal en la etapa de diseño, el esquema del circuito propuesto se ilustra en la figura 6.

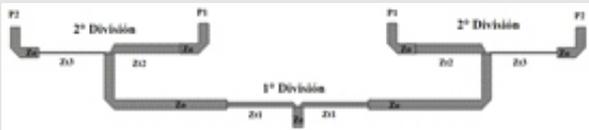


Fig. 6 Esquema de circuito alimentador.

El diseño de dicho circuito considera la misma configuración de dieléctricos dispuestas para la antena parche individual (FR4-aire-FR4). Los valores finales que se adoptan para la construcción del circuito alimentador se listan en la tabla 4, estos valores aseguran una relación de potencia entre el puerto P1 y el puerto P2 igual a:

$$\frac{P_2}{P_1} = 0.353 \equiv -4.27 \text{ dB}$$

muy próximo al valor teórico de  $-4.79 \text{ dB}$  de diseño.

Tabla 4: Dimensiones del circuito alimentador simulado

Parámetro	Valor
$W_{t1}$	1.88 mm
$W_{t2}$	3.30 mm
$W_{t3}$	0.47 mm
$W_0$	3.03 mm
$L_{t1}$	25.81 mm
$L_{t2}$	25.81 mm
$L_{t3}$	25.81 mm
$L_{t0}$	6.92 mm

## Diseño del arreglo de antenas parche

El diseño final del arreglo se muestra en la figura 7:

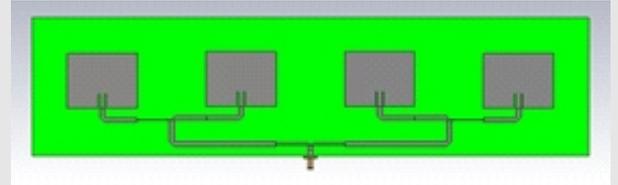


Fig. 7 Arreglo final de antenas.

Como en las mediciones sobre el prototipo se observó que la frecuencia de resonancia estaba levemente corrida, se ajustaron los valores de diseño de las antenas parche buscando que la frecuencia central de estas sea 2.435 GHz, con un ancho de banda total de 70 MHz (Banda WiFi de 2.4 GHz), según se detalla en la tabla 5.

Tabla 5: Dimensiones del elemento radiante utilizado en el arreglo

Parámetro	Valor de diseño
$W$	47.82 mm
$L$	39.31 mm
$W_r$	9.23 mm
$L_r$	0.92 mm

Las dimensiones finales del arreglo se asientan sobre un plano de masa con dimensiones:

$$L_{GND} = 10 \text{ cm} \text{ y ancho } W_{GND} = 40 \text{ cm.}$$

En la figura 8 se observa el módulo del coeficiente de reflexión, este se encuentra por debajo de  $-10$  dB en el rango entre 2.4 - 2.47 GHz por lo cual, se considera que el arreglo, dentro de la banda de interés, se comporta de acuerdo a lo indicado en la bibliografía de referencia.

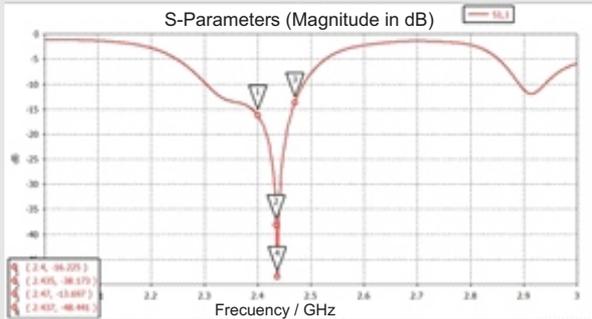


Fig. 8 Módulo del coeficiente de reflexión del arreglo.

En las figuras 9 y 10 se observan el patrón de radiación del arreglo y su representación en 3D, en la tabla 6 sus valores principales.

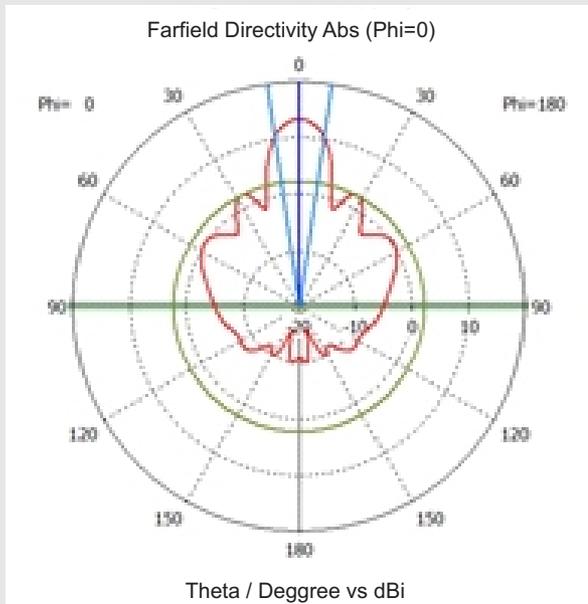


Fig. 9 Diagrama de radiación del arreglo de antenas.

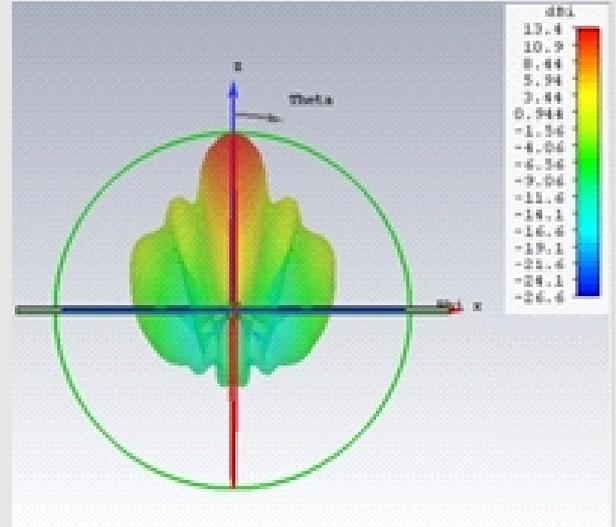


Fig. 10 Diagrama de radiación 3D del arreglo de antenas.

Tabla 6: Parámetros del arreglo de antenas

Parámetro	Valor
Frecuencia	2.435 GHz
Eficiencia de Radiación	-1.145 dB
Eficiencia Total	-1.146 dB
Magnitud del lóbulo principal	13.44 dBi
Dirección del lóbulo principal	0 grados
Ancho de Banda Angular	16.8 grados
Nivel de los lóbulos secundarios	-11.1 dB

Resultados de las simulaciones y mediciones

Las figuras 11 y 12 muestran las antenas construidas:



Fig. 11 Antena parche prototipo.

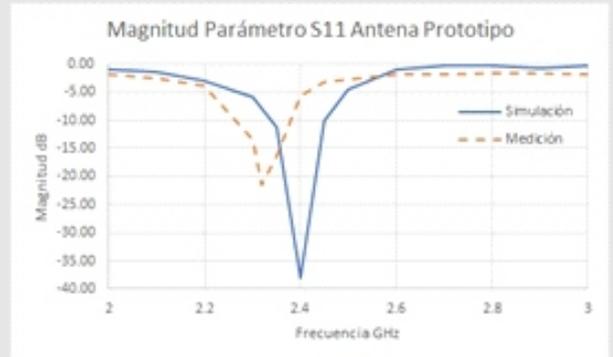


Fig. 13 Comparativa del coeficiente de reflexión del prototipo.

Como se había comentado, se observa que la frecuencia de resonancia está desplazada del valor de 2.4 GHz, estando situada finalmente en aproximadamente 2.32 GHz, menor al 4% del valor de diseño.

En la figura 14 vemos los resultados comparativos para el arreglo de antenas, observando una mayor correspondencia entre lo diseñado y lo medido (la frecuencia de resonancia se encuentra en 2.42 GHz en vez del valor de 2.435 GHz de diseño, menor al 1%).



Fig. 12 Arreglo de antenas parche.

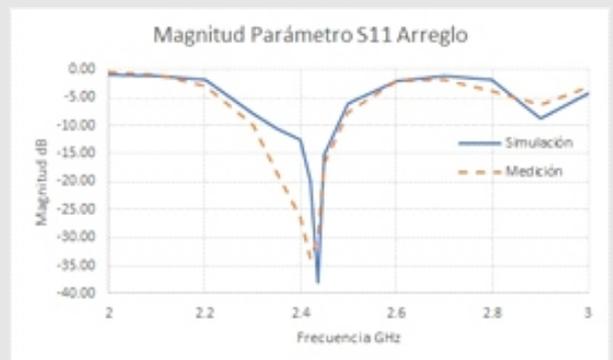


Fig. 14 Comparativa del coeficiente de reflexión del arreglo de antenas.

Para las mediciones de los dispositivos construidos se utilizó un analizador vectorial Deviser VNA TA 7300, un generador de señal y un analizador de espectro, como proceso alternativo al uso de una cámara anecoica, no disponible.

En la figura 13 se muestra el coeficiente de reflexión para el prototipo de antena.

El arreglo cubre casi en su totalidad la banda de WiFi cumpliendo con el objetivo de ancho de banda propuesto, la figura 15 muestra los valores de relación de onda estacionaria para el arreglo.

potencia de 18°, y una relación de -13 *db* con respecto a los lóbulos secundarios, valores estos similares a los resultados de la simulación.

### Conclusiones

El trabajo presenta el diseño y desarrollo de un arreglo de antenas parche. El arreglo muestra algunas discrepancias, en lo referente a la frecuencia de operación, que dependen principalmente del valor adoptado para la permitividad  $\epsilon$  ajustando este valor en la simulación se consigue mayor correspondencia entre los valores simulados y medidos. El arreglo muestra una buena adaptación en toda la banda, aunque podría mejorarse corrigiendo la frecuencia de resonancia a un valor más cercano a 2450 MHz, esto se puede ver en la figura 15, donde el ROE es inferior a 2 en un ancho de banda superior a 100 MHz, pero centrado en 2400 Mhz. Se puede concluir que el procedimiento adoptado para la construcción del arreglo de cuatro antenas parche fue satisfactorio, partiendo del diseño de un prototipo individual, se realizaron ajustes que permitieron obtener una buena correspondencia entre las herramientas de simulación y las mediciones.

A futuro se podrían obtener mejoras ensayando otro tipo de placas y así avanzar en un diseño que incluya un control de fase en los elementos para poder variar la posición del máximo de radiación en forma electrónica.

### Agradecimientos

Al proyecto PICT-0511-2015 por soportar parcialmente estas investigaciones.



Fig. 15 Comparativa de la relación de onda estacionaria para el arreglo.

Por último, se presentan los resultados de una medición que tiene como intención verificar el patrón de radiación de los dos elementos construidos, para ello se hizo un barrido de 45° para ambos lados, partiendo de un punto central, manteniendo un radio constante mientras se verifica la potencia recibida por una antena comercial que opera en la banda de WiFi. Estos resultados se exponen en figura 16.



Fig. 16 Patrón de radiación de los elementos construidos.

La gráfica resultante se encuentra referenciada a un nivel de potencia relativo de 0 *dB*, correspondiente al punto donde se registra el máximo de potencia medido.

Se observa la mayor directividad del arreglo frente al prototipo individual, aproximadamente 7 *db*, que es lo esperado, con un ancho de banda de media

## Referencias Bibliográficas

**Aji, G., Wibisono, M. and Munir, A.** (2016) "High Gain 2.4GHz Patch Antenna Array for Rural Area Application", *22nd Asia-Pacific Conference on Communications 2016, IEEE*.

**Balanis, C.** (2005) Microstrip antennas, En: *Antenna Theory (3° Ed.)*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New York, E.E.U.U., pp. 811-826.

**Balanis, C.** (2005) *Antenna Theory (3° Ed.)*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New York, E.E.U.U.

**Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A. and Bianchi, G.** (2018) "Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 21, pp.197-216.

**Kraus, J.** (1988) Linear array with nonuniform amplitude distributions, En: *Antennas*, McGraw-Hill, E.E.U.U., pp. 162-175.

**Kraus, J.** (1988) *Antennas*. McGraw-Hill, E.E.U.U.

**Kraus, J. and Marhefka, R.** (2003) *Antennas for all applications (3° Ed.)*. Tata McGraw-Hill. Dheli, India.

**Kumar, G. and Ray, K.** (2003) *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House, Inc. Norwood, Massachusetts, E.E.U.U.

**Nair, A., Singh, B. and Thakur, S.** (2015) "Design of Rectangular Microstrip 4x2 Patch Array Antenna at 2.4GHz for WLAN Application", *2015 Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering, IEEE*.

El trabajo fue llevado a cabo en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación (DEEC) de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán (UNT), durante el primer semestre del año 2019.

**Juan Eduardo Ise**

Ingeniero Electricista Orientación Electrónica Universidad Nacional de Tucumán (1989). Profesor Adjunto de las asignaturas Electromagnetismo I y II, de la carrera de Ingeniería Electrónica, FACET, UNT. Director del Laboratorio de Telecomunicaciones, FACET, UNT. E-mail: [jise@herrera.unt.edu.ar](mailto:jise@herrera.unt.edu.ar)

**Diego Zimmerman**

Alumno de las carreras de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Biomédica, FACET, UNT. Auxiliar estudiantil en las asignaturas de Electromagnetismo I y II de la carrera de Ingeniería Electrónica, FACET, UNT. E-mail: [dzimmerman2611@gmail.com](mailto:dzimmerman2611@gmail.com)

**Alon Druck**

Alumno de la carrera de Ingeniería Electrónica, FACET, UNT. E-mail: [drukalon@gmail.com](mailto:drukalon@gmail.com)