

Diseño de una antena MIMO para dispositivos móviles 5G

A MIMO antenna design for 5G mobile devices

María del Carmen Hernández-Serrano⁺, Elizabeth Santiago-Cortés[§]
y Luis Alejandro Iturri-Hinojosa⁺¹

⁺ ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Edif. 5, 1^{er} Piso,
Col. Lindavista C.P. 07738, CDMX, México

[§] Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Autónoma del
Cauca, Colombia

[§] Departamento de Ciencias, Escuela de Ingeniería y Ciencias,
Tecnológico de Monterrey - ITESM, Campus Santa Fé, México

Abstract. Se presenta el diseño de una antena MIMO con elemento de microcinta rectangular con línea de alimentación insertada diseñado para dispositivos móviles 5G a la frecuencia 28 GHz. La antena esta impresa sobre sustrato Neltec NY9220 de 0.508 mm de espesor, permitividad relativa igual a 2.2 y pérdida tangencial de 0.0009. La geometría de la antena MIMO presenta un doblez en la sección de la línea de alimentación para su instalación en los terminales móviles. Se presentan los parámetros de desempeño de la antena MIMO obtenidos con el software de simulación electromagnético HFSS de Ansys. La separación adecuada entre los dos elementos para un máximo aislamiento electromagnético es de 3 cuartos de longitud de onda, es decir, de 8.036 mm, para la cual el coeficiente de transmisión entre puertos alcanza -25.8 dB. La respuesta de pérdida de retorno es igual a -16.38 dB en 28 GHz y alcanza un ancho de banda de operación de 2.22 GHz, desde 26.86 GHz a 29.08 GHz. La ganancia máxima estimada para la antena MIMO con separación entre elementos de 3 cuartos de longitud de onda es igual a 7.84 dB en la dirección $\phi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, en el plano XZ.

Palabras Claves. Antena MIMO; 5G; antena doblada 28 GHz.

Abstract. The design of a MIMO antenna with inset line fed rectangular microstrip patch elements designed for 5G mobile devices at a frequency of 28 GHz. The antenna is printed on a 0.508 mm thick Neltec NY9220 substrate, a relative permittivity equal to 2.2 and a tangential loss of 0.0009. The geometry of the MIMO antenna presents a bend in the section of the line feed for its installation in mobile devices. The performance parameters of the MIMO antenna obtained with the HFSS electromagnetic simulation software from Ansys are presented. It is verified that the adequate separation between the two elements, for a maximum electromagnetic isolation is 3 quarters of a wavelength, that is, equal to 8.036mm, for which the transmission coefficient between ports reaches -25.8 dB. The return loss response is equal to -16.38 dB at 28 GHz and achieves an operating bandwidth of 2.22 GHz, from 26.86 GHz to 29.08 GHz. The maximum estimated gain for the MIMO antenna is equal to 7.84 dB in the direction $\phi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, in the XZ plane.

Keywords. MIMO antenna; 5G; folded antenna 28 GHz.

¹ aiturri@ipn.mx

Como citar. M. Hernández-Serrano, E. Santiago-Cortés y A. Iturri-Hinojosa, "Diseño de una antena MIMO para dispositivos móviles 5G", *Jou. Cie. Ing.*, vol. 14, no. 2, pp. 24-33, 2022. doi:10.46571/JCI.2022.2.4

Recibido: 06/07/2022 **Revisado:** 13/09/2022 **Aceptado:** 17/11/2022

1. Introducción

La tecnología de quinta generación o 5G proveerá acceso ilimitado a la información, así como disponibilidad de compartirla en cualquier parte, a cualquier hora, por cualquier persona o dispositivo, para el beneficio de la sociedad, según [2]. Las tecnologías inteligentes del Internet de las Cosas (IoT) a gran escala utilizarán a la tecnología 5G como medio de comunicación [2,6].

Actualmente se está realizando un gran esfuerzo de investigación sobre la viabilidad de las bandas de ondas milimétricas (30 GHz - 300 GHz) para aplicaciones de sistemas celulares 5G, hasta un pico de velocidad de 20 Gbps [8]. Parte de esa iniciativa incluye el análisis del efecto de la geometría de los edificios, tanto en el despliegue inicial como en el sostenimiento de los niveles de cobertura RF, que garanticen un nivel de potencia de recepción apropiada. Dichos niveles varían en el tiempo debido a las variaciones del entorno, como los cambios en la geometría de las edificaciones en el área de servicio [1]. Las ondas milimétricas sufren de algunas limitaciones, como las elevadas pérdidas atmosféricas, la pérdida por propagación en espacio libre y los costos elevados de fabricación de los terminales de comunicación [4]. Las pérdidas por propagación son bajas en las bandas por debajo de las ondas milimétricas, como la banda de 28 GHz [7]. Surge la pregunta, si es posible el diseño de una antena con operación de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) para los terminales móviles 5G con reducido costo de fabricación, ancho de banda superior a 1 GHz, ganancia superior o igual a 8 dB para aumentar la eficiencia en comunicación del sistema y el adecuado patrón de radiación para contrarrestar pérdidas atmosféricas y por espacio libre. Actualmente existen propuestas interesantes de antenas MIMO para la frecuencia de 28 GHz de la tecnología 5G que atienden algunas de las demandas mencionadas, iniciando con el diseño del elemento de antena a partir de modelos matemáticos presentes en literatura electromagnética y la optimización de la respuesta del parámetro de coeficiente de transmisión entre puertos MIMO utilizando software electromagnético de simulación.

[3] presenta una antena de microcinta rectangular doblada con alimentación insertada en el parche para la frecuencia de 28 GHz. La antena está impresa sobre sustrato dieléctrico de policarbonato con permitividad relativa igual a 2.9, pérdida tangencial de 0.01 y 0.5 mm de espesor. El ancho de banda estimado es de 1.9 GHz, desde 27.4 GHz a 29.3 GHz.

[5] presenta una antena MIMO de 8 elementos en configuración de 2x4 para sistemas de comunicación 5G. La pérdida de retorno alcanza un mínimo igual a -19 dB en 28 GHz. Y el coeficiente de transmisión entre puertos consecutivos es inferior a -20 dB.

El artículo presenta el diseño de la antena de parche rectangular con línea de alimentación insertada a partir de ecuaciones matemáticas presentes en literatura electromagnética para la frecuencia de 28 GHz. Se realiza un doblez en la línea de alimentación para su aplicación en terminales 5G. Con dos elementos de parche rectangular se conforma la antena MIMO 2x1 y se optimiza su geometría para su operación MIMO.

2. Diseño de la Antena de Parche Rectangular a Partir de Teoría Electromagnética

Se presenta el diseño de la antena de parche con línea de alimentación insertada a partir de las ecuaciones matemáticas. El parche está impreso sobre un sustrato dieléctrico Neltec NY9220 con una constante dieléctrica de 2.2 (ϵ_r), un espesor de 0.508 mm (h), una tangente de pérdida de 0,0009 y está inicialmente diseñada para la frecuencia de 28 GHz.

La antena de parche tiene una longitud L_p , un ancho W_p , la línea de alimentación empotrada una distancia X_0 . El ancho y la longitud del plano de tierra son $W_g (= W + 10h)$ y $L_g (= L_p - 2 * X_0 + 2 * L_f)$, respectivamente.

La Fig. (1) muestra la geometría de la antena de parche rectangular.

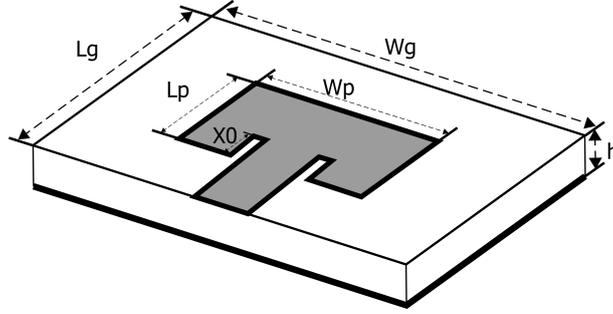


Figura 1: Geometría de antena de microcinta con línea de alimentación insertada.

El ancho del parche W_p está dado por [9].

$$W = \frac{\lambda_o}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

donde $\lambda_o (\lambda_o = c/f)$ es la longitud de onda de la señal de funcionamiento.

La constante dieléctrica efectiva se obtiene con la Eq. (2).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{10h}{W}}} \right) \quad (2)$$

La longitud incremental (ΔL) para el campo de borde se puede calcular con la Eq. (3).

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right] \left[\frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} + 0.813} \right] \quad (3)$$

Para el modo dominante TM_{010} sin franjas de radiación, considerando la longitud de onda en el sustrato (λ_g), la longitud del parche (L) es igual a $\frac{\lambda_g}{2}$, donde $\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$.

Considerando las franjas de radiación, la longitud del parche viene dada por:

$$L = \frac{\lambda_g}{2} - 2\Delta L \quad (4)$$

La longitud efectiva del parche se calcula con la Eq. (5).

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (5)$$

El empotrado de la línea de alimentación (x_0) se calcula utilizando la Eq. (6):

$$X_0 = \frac{L_p}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{50}{R_{in}}} \quad (6)$$

donde R_{in} es la resistencia de entrada resonante obtenida con:

$$R_{in} = \frac{1}{2(G+G^2)}$$

$$G = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sin\left(\frac{k_0 W_p \cos\theta}{2}\right)}{\cos\theta} \right)^2 \sin^3\theta d\theta$$

$$G_2 = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sin\left(\frac{k_0 W_p \cos\theta}{2}\right)}{\cos\theta} \right)^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta$$

donde J_0 es la función de Bessel de primer tipo de orden cero y $k_0 \left(= \frac{2\pi}{\lambda_0} \right)$ es el número de onda del espacio libre.

La frecuencia de resonancia (f_r) del elemento de antena se calcula utilizando la Eq. (7):

$$f_r = \frac{1}{2\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} L_{eff} \sqrt{\varepsilon_{ef}}} \quad (7)$$

donde μ_0 y ε_0 son la permeabilidad al vacío y la permitividad.

La antena de parche tiene una radiación ortogonal con respecto al plano del suelo. El patrón de campo eléctrico radiado se obtiene utilizando las ecuaciones 8 a 10 [9]:

$$E_\varphi^t = +j \frac{k_0 h w E_0 e^{-j k_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin(X)}{X} \frac{\sin(Z)}{Z} \right\} \cdot \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin\theta \sin\varphi\right) \quad (8)$$

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin\theta \cos\varphi \quad (9)$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos\theta \quad (10)$$

La línea de alimentación caracteriza por una longitud (l_f), un ancho (w_f) y una impedancia Z_f y conecta el parche con el conector SMA que tiene una impedancia $Z_2 (= 50\Omega)$. La impedancia del parche se calcula con la Eq. (11):

$$Z_p = \frac{90\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (11)$$

La impedancia de alimentación de línea se calcula con la Eq. (12).

$$Z_f = \sqrt{Z_p Z_2} \quad (12)$$

La longitud de la línea de alimentación (l_f) en milímetros se calcula con la Eq. (13).

$$l_f = \frac{\theta_{a,rad}}{k_0 \sqrt{e}} \quad (13)$$

donde $\theta_{a,rad} (= 90^\circ)$ es la longitud de la línea de transmisión de acoplamiento de un cuarto de longitud de onda ($\lambda/4$) y se calcula con la Eq. (14)

$$e = 0.5(\varepsilon_r + 1) + \frac{0.5(\varepsilon_r - 1)}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W_0}}} \quad (14)$$

donde $W_0 = W_d \cdot h$, para lo cual $W_d = W_{d1}$ si $W_{d1} < 2$, si $W_d = W_{d2}$ si $W_{d1} \geq 2$. Y

$$W_{d1} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (15)$$

$$W_{d2} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2 * B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} * \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right) \right] \quad (16)$$

con:

$$A = \frac{Z_0}{60} * \sqrt{0.5 * (\varepsilon_r + 1)} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r} \right) \quad (17)$$

$$B = 377 * \frac{\pi}{2 * Z_0 * \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (18)$$

Con las ecuaciones anteriores, los parámetros geométricos, eléctricos y físicos de la antena de parche de alimentación insertada a 28 GHz se resumen en la Tabla 1. La longitud de onda en la frecuencia de 28 GHz es igual a 10.71 mm.

Tabla 1: Parámetros del elemento de antena de parche.

Parámetro	Valor
W_p	4.24 mm
L_p	3.28 mm
W_g	9.32 mm
L_g	7.81 mm
ε_{eff}	1.98
ΔL	0.26 mm
f_r	28 GHz
Z_p	218.06 Ω
X_0	1.14 mm
l_f	2.02 mm
w_f	0.41 mm
Z_f	104.42 Ω

3. Desempeño del Elemento de Antena de Parche Rectangular

La longitud de la línea de alimentación fue optimizada para alcanzar una geometría de antena compacta y una mejor adaptación de la impedancia del parche a la del conductor coaxial SMA. La Fig. (2) muestra la antena de parche rectangular con todas sus dimensiones, vistas superior y posterior.

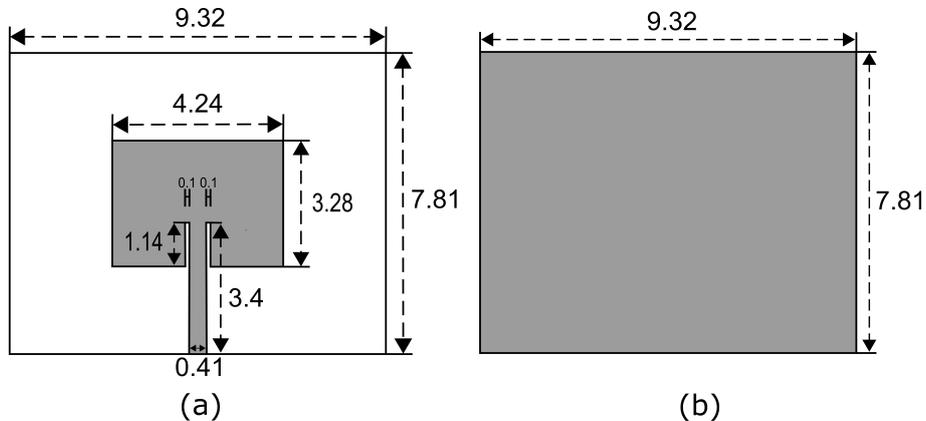


Figura 2: Geometría de la antena de parche a) vista superior y b) vista posterior. Unidades en milímetros.

La antena tiene una dimensión de 9.32 mm x 7.81 mm y un espesor de 0.508 mm. La antena de parche rectangular está impresa sobre un sustrato dieléctrico Neltec NY9220(IM) con constante dieléctrica relativa de 2.2 (ϵ_r), y el plano tierra está impreso en la cara posterior del sustrato.

Con el software de simulación electromagnética 3D HFSS de ANSYS se obtiene una estimación de la respuesta de pérdida de retorno del elemento de microcinta, presente en la Fig. (3). La respuesta mínima de pérdida de retorno es de -21 dB en la frecuencia de 28.7 GHz con un ancho de banda de 1.55 GHz.

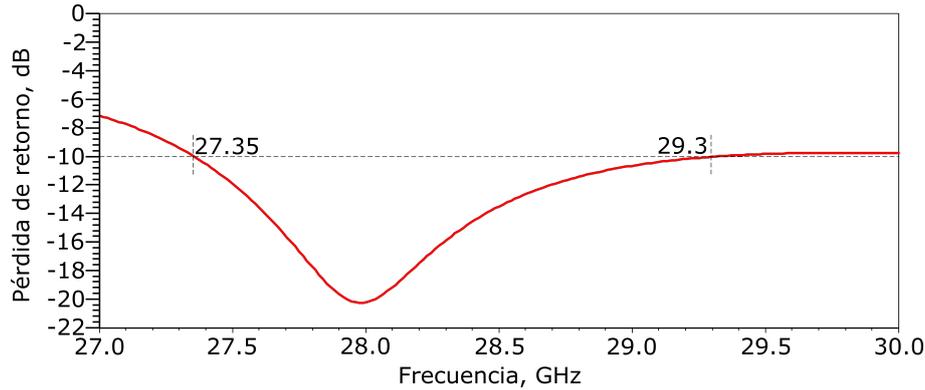


Figura 3: Pérdida de retorno simulada.

4. Diseño de la Antena de Parche Doblada para Terminales Móviles

La implementación de la antena de parche rectangular en un terminal de comunicación móvil requiere del doblez de la antena para mejorar su patrón de radiación y el espacio a ocupar en el terminal. Se elige que el doblez sea en la sección de la línea de alimentación de la antena. La ubicación del doblez y su longitud es optimizada para máxima resonancia en la frecuencia de 28 GHz utilizando el software de simulación electromagnética HFSS de Ansys.

Se obtiene la longitud del doblez en el plano tierra igual a 1.59 mm, quedando la antena con un alto de 2.1 mm. La Fig. (4) presenta la geometría de la antena rectangular doblada con línea de alimentación incrustada en el parche. Los parámetros dimensionales están en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros geométricos de la antena de parche doblada a 28 GHz.

Parámetro	Valor
W_p	4.24 mm
L_p	3.28 mm
W_{g1}	9.32 mm
L_{g1}	6.61 mm
W_{g2}	9.32 mm
L_{g2}	1.59 mm
l_f	4.14 mm
w_f	0.41 mm
g	0.10 mm

La antena de parche ocupa un área de 61.60mm^2 (9.32 mm x 6.61 mm), tiene un alto de 2.1 mm ($L_{g2} + h$) y un espesor de 0.508 mm.

Con el software de simulación electromagnético en 3D HFSS de ANSYS se obtiene la respuesta de pérdida de retorno de la antena doblada, presente en la Fig. (5). La respuesta mínima de

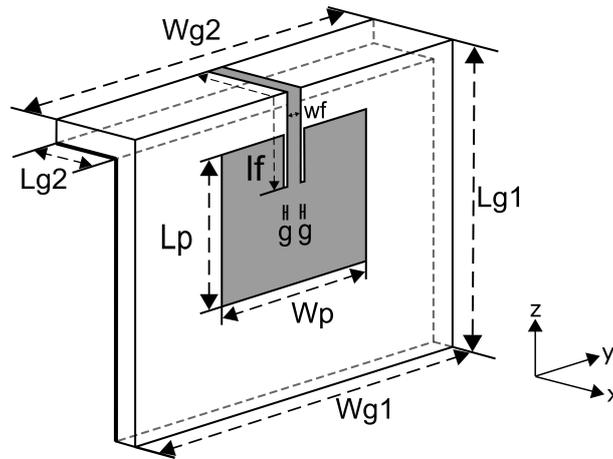


Figura 4: Geometría de la antena doblada. Unidades en milímetros.

pérdida de retorno es de -17 dB en la frecuencia de 27.9 GHz, con un ancho de banda de 2.44 GHz, desde 26.70 GHz a 29.14 GHz.

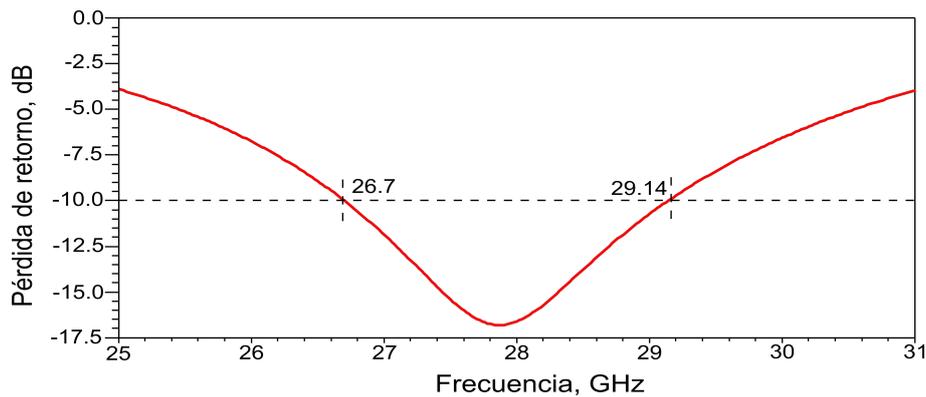


Figura 5: Pérdida de retorno de la antena doblada obtenido por simulación.

5. Antena MIMO 2x1 para Terminales Móviles

Con la antena de parche rectangular doblada se conforma la antena 2x1 compacta para su operación MIMO en la banda de 28 GHz. La Fig. (6) presenta la geometría de la antena MIMO 2x1, con los elementos espaciados 3 cuartos de longitud de onda ($= 8.03mm$).

6. Desempeño de la Antena MIMO para Terminales Móviles

La Fig. (7) presenta la pérdida de retorno para los espaciamientos entre parches de media longitud de onda ($= \lambda/2$) y de 3 cuartos de longitud de onda ($= 3\lambda/4$). La respuesta de pérdida de retorno (S_{11}) alcanza un mínimo igual a -17.26 dB y -16.38 dB para el espaciamiento entre elementos (dy) igual a $\lambda/2$ y $3\lambda/4$, respectivamente.

Si los elementos están distanciados media longitud de onda, existe un fuerte acoplamiento electromagnético, pues la respuesta del coeficiente de transmisión (S_{12}) entre puertos de alimentación es igual a -14.16 dB en 28 GHz, y superior a -17.25 dB en el ancho de banda de operación. El acoplamiento mutuo entre elementos disminuye al aumentar el espaciamiento

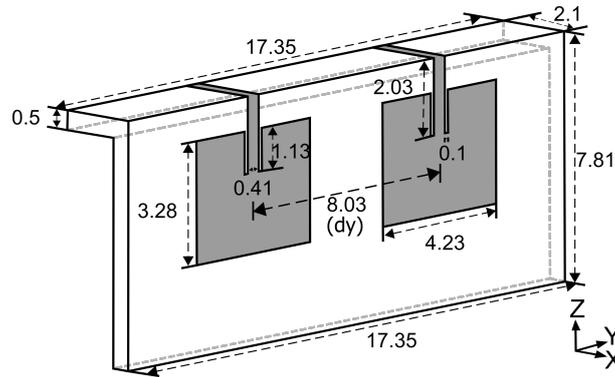


Figura 6: Geometría de la antena MIMO 2x1, unidades en milímetros.

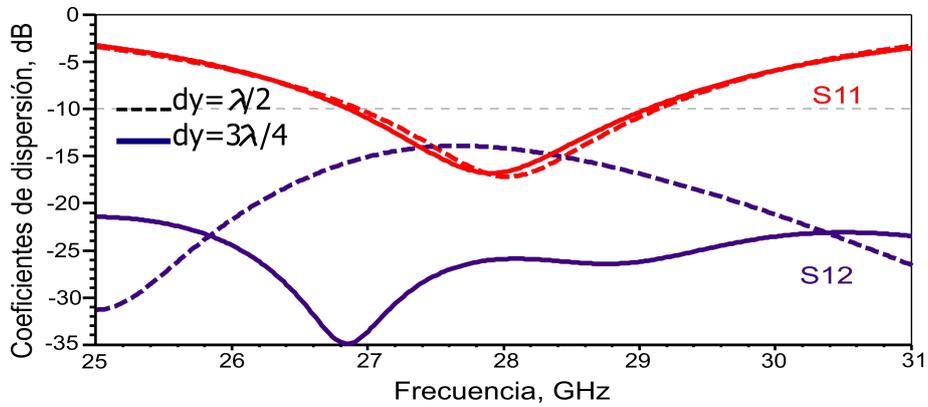


Figura 7: Respuestas de coeficientes de dispersión para las separaciones entre elementos de $\lambda/2$ y $3\lambda/4$.

entre los dos elementos hasta 3 cuartos de longitud de onda. La respuesta del coeficiente de transmisión alcanza un mínimo igual a -25.8 dB en 28 GHz.

En la Fig. (8a) se presenta el patrón de radiación en el plano XZ con una ganancia máxima igual a 7.78 dB en la dirección $\theta = 90^\circ$. Fig. (8b) presenta el patrón de radiación en el plano YZ con una ganancia máxima igual a -2.13 dB en la dirección $\theta = 0^\circ$.

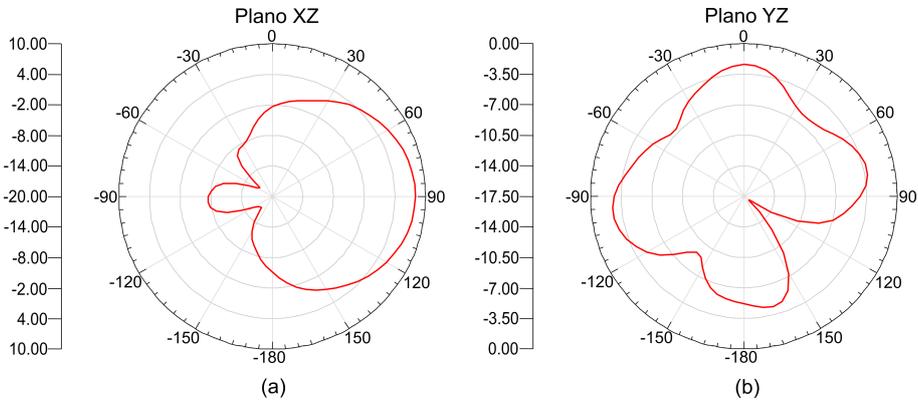


Figura 8: Patrón de radiación en el (a) plano XZ ($\phi = 0^\circ$) y en el (b) plano YZ ($\phi = 90^\circ$).

La ganancia máxima de la antena es igual a 7.84 dB en la dirección $\phi = 0^\circ, \theta = 90^\circ$, en el

plano XZ.

7. Análisis de Resultados y Recomendaciones

El ancho de banda de la antena MIMO propuesta, igual a 2.22 GHz, supera considerablemente el mínimo requerido de 1 GHz para las señales de las aplicaciones 5G. El aislamiento entre los puertos MIMO es superior a -20 dB, lo cual señala que existirá un mínimo de acoplamiento electromagnético entre los elementos de la antena, aumentando la eficiencia de operación MIMO.

Se recomienda que la instalación adecuada de la antena de parche MIMO en un terminal móvil 5G sea tal que la sección más larga de la antena, de longitud 7.81 mm, sea instalada en el borde superior del terminal móvil, como se muestra en la Fig. (9). Consecuentemente, la dirección del lóbulo principal del patrón de radiación será la del eje X positivo del plano XZ, es decir, en la coordenada $\phi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$.

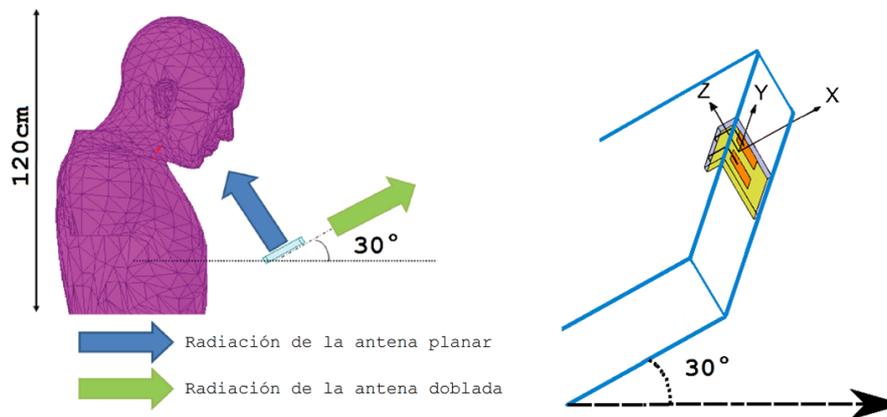


Figura 9: Dirección de radiación e instalación de la antena MIMO en el terminal móvil.

Estadísticamente hablando, las personas normalmente sostienen sus terminales móviles con un ángulo de elevación aproximadamente entre los 30° y 50° con respecto al eje horizontal, consecuentemente, el haz de la antena del terminal móvil estará enlazada con el haz de la antena de la estación base ubicada por recomendación a 3 metros de altura [3]. De esta manera la eficiencia de operación del terminal móvil 5G se verá ampliamente favorecida con un servicio de alta velocidad, pues en esa dirección la antena MIMO propuesta alcanza la ganancia máxima igual a 7.84 dB.

8. Conclusiones

La antena MIMO 2x1 con elementos de microcinta rectangular tiene aplicación directa en terminales móviles 5G a la frecuencia 28 GHz. La antena está impresa sobre sustrato Neltec NY9220 de 0.508 mm de espesor, permitividad relativa igual a 2.2 y pérdida tangencial de 0.0009. La geometría de la antena MIMO presenta un doblez en la sección de la línea de alimentación para su instalación en los terminales móviles, ocupando un área de 17.35 mm x 7.81 mm, tiene un alto de 2.1 mm y un espesor de 0.508 mm. La separación adecuada entre elementos, para un máximo aislamiento electromagnético es de 3 cuartos de longitud de onda, es decir, de 8.036 mm, para la cual el aislamiento electromagnético alcanza -25.8 dB en 28 GHz. La respuesta de pérdida de retorno estimada de la antena MIMO doblada es igual a -16.38 dB en 28 GHz, y alcanza un ancho de banda de operación de 2.22 GHz, desde 26.86 GHz a 29.08 GHz. La ganancia máxima de la antena es igual a 7.84 dB en la dirección $\phi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, en el plano XZ. Se presenta la geometría completa de la antena de parche MIMO 2x1 doblada con todas sus dimensiones, patrones de radiación y su ubicación en un terminal móvil 5G.

Agradecimiento

María del Carmen Hernández-Serrano y Luis Alejandro Iturri-Hinojosa agradecen el apoyo recibido del proyecto de investigación SIP20211550 del IPN México.

Referencias

- [1] C. Tigrero, M. Isabel, and D. E. L. Ortiz. "Diseño e implementación de un método de Ray-Tracing para determinar la influencia de la geometría de edificios en un enlace de comunicaciones en la banda de 28 GHz." *BS thesis. Espol*, 2018.
- [2] J. González and O. Salamanca. "El camino hacia la tecnología 5G." *Télématique*, 15 (1), 27-47. (2016).
- [3] S. K. Koul, et al. "Compact antenna designs for future mmWave 5G smart phones." *Microw. J*, 63 (2020): 22-40.
- [4] A. H. Naqvi y S. Lim. "Revisión de arreglos en fase recientes para comunicación inalámbrica de ondas milimétricas". *Sensores* 18.10 (2018): 3194.
- [5] Y. Rahayu, J. Wijaya y E. Syafitri. "Características Antena MIMO 2x4 para Sistema de Comunicación 5G." *TELKOMNIKA (Telecomunicación Informática Electrónica y Control)* 16.4 (2018): 1508-1514.
- [6] T. S. Rappaport, et al. "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!". *IEEE access* 1 (2013): 335-349.
- [7] W. Roh, et al. "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results." *IEEE communications magazine* 52.2 (2014): 106-113.
- [8] T. Yilmaz, and O. B. Akan. "On the use of low terahertz band for 5G indoor mobile networks." *Computers & Electrical Engineering* 48 (2015): 164-173.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, John wiley & sons, 2016, pp. 811-843.

