

# Diseño y análisis de un arreglo de antenas compacto con tecnología GGW para la Banda W

## Design and analysis of a compact antenna array with GGW technology for W-band

Jorge Luis Blanco-Orta<sup>1</sup>, María del Carmen Guerra-Martínez<sup>2</sup>, Kenneth Marichal-Leyva<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 21 de octubre, 2025*

*Fecha de aprobación: 6 de febrero, 2026*

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C; Marichal-Leyva, K.  
Diseño y análisis de un arreglo de antenas compacto con tecnología GGW para la banda W . *Tecnología en Marcha*.  
Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 78-90.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8264>



- 1 Emisora Municipal Radio Mariel. Cuba.  
 [jorgeluisblancoorta@gmail.com](mailto:jorgeluisblancoorta@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>
- 2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.  
 [mariagm@tele.cujae.edu.cu](mailto:mariagm@tele.cujae.edu.cu)  
 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>
- 3 Centro de investigación, Desarrollo y Producción "Grito de Baire". Cuba.  
 [kennethmarichal@gmail.com](mailto:kennethmarichal@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0009-0003-4518-267X>

## Palabras clave

GGW; 6G; mmWave.

## Resumen

En la presente investigación se analiza y diseña un arreglo de antena con la tecnología Groove Gap Waveguide (GGW). Esta tecnología se estudia como una alternativa apropiada para el desarrollo de los múltiples escenarios que surgirán con el despliegue de la sexta generación (6G) de la telefonía móvil. Tal concepción se adopta por las ventajas que brinda GGW para lograr una mayor eficiencia en entornos que se necesita mejor disponibilidad en las bandas milimétricas (mmWave). El enfoque aportado por GGW permite la transmisión de ondas sin la necesidad de un contacto físico entre los materiales conductores, solventando el problema del contacto físico necesario en las guías de ondas tradicionales. El análisis realizado posibilita el diseño de un arreglo de antena de ranura de  $4 \times 4$  elementos para aplicaciones satelitales en la banda W. Con una ganancia máxima de 23 dBi, un ancho de banda aproximadamente de 1 GHz, a la frecuencia de diseño (94 GHz), con una eficiencia de 94% al operar en dicha banda. Es decir, que puede solucionar problemas en futuros diseños de antenas con GGW para lograr bajas pérdidas y una alta capacidad de manejo de la potencia a altas frecuencias.

## Keywords

GGW; 6G; mmWave.

## Abstract

This research analyzes and designs an antenna array using Groove Gap Waveguide (GGW) technology. This technology is studied as a suitable alternative for the development of the multiple scenarios that will emerge with the deployment of the sixth generation (6G) of mobile telephony. This approach is adopted due to the advantages offered by GGW to achieve greater efficiency in environments requiring improved availability in millimeter-wave (mmWave) bands. The approach provided by GGW enables wave transmission without the need for physical contact between conductive materials, resolving the issue of physical contact required in traditional waveguides. The conducted analysis enables the design of a  $4 \times 4$  slot antenna array for satellite applications in the W band, with a maximum gain of 23 dBi, an approximate bandwidth of 1 GHz at the design frequency (94 GHz), and 94% efficiency when operating in this band. In other words, it can address challenges in future GGW-based antenna designs to achieve low losses and high power-handling capacity at high frequencies.

## Introducción

Cada época construye su percepción de la realidad a través de un imaginario colectivo sobre la actividad técnico-teórica, la cual gira en torno al grado de mediación que la ciencia ejerce en la vida cotidiana. Desde esta perspectiva, los ejes prioritarios de investigación en el campo de las comunicaciones inalámbricas se orientan hacia el desarrollo de infraestructuras de conectividad que optimicen la capacidad de interacción social mediante tecnologías escalables. En este contexto, adquieren especial relevancia los avances asociados a las sucesivas generaciones de telefonía móvil, cuyo despliegue tecnológico redefine constantemente los parámetros de accesibilidad y densidad de conexión en entornos digitalizados.

La implementación de estos procesos modificará sustancialmente la dinámica ciencia-sociedad, siendo el despliegue del 5G un paradigma tecnológico que reconfigura integralmente la industria de comunicaciones inalámbricas [1,2]. Esta generación se consolida como infraestructura clave al integrar cuatro pilares operativos: banda ancha móvil mejorada (eMBB) [3], comunicaciones máquina-máquina masivas (mMTC) [4], servicios ultra confiables de baja latencia (URLLC) [5] e interacciones vehículo-infraestructura (V2X) [4]. No obstante, las mejoras sustanciales en capacidad y tasa de transferencia de datos exigen una densificación extrema de redes [1]-[3], cuyos modelos actuales de escalabilidad mantienen limitaciones prácticas para materializar sociedades conectadas de modo objetivo.

La transición tecnológica hacia redes 6G emerge como respuesta crítica para optimizar la eficiencia espectral y robustecer la capa física, priorizando el manejo inteligente de recursos radioeléctricos ante los requisitos del estándar IMT-2030 [6]-[9]. El análisis identifica que la saturación actual del espectro obliga a migrar hacia bandas milimétricas, único vector viable para soportar densidades de conexión extremas requeridas en este paradigma emergente. No obstante, dicha migración plantea desafíos técnicos multifactoriales que exigen reingeniería de protocolos y arquitecturas de red.

El desarrollo de antenas de alta eficiencia constituye un eje crítico para soportar la densidad de dispositivos en escenarios móviles avanzados, abarcando desde telefonía móvil hasta ecosistemas por la Internet de las Cosas (IoT). Los enfoques tradicionales presentan limitaciones fundamentales: las líneas de transmisión impresas exhiben pérdidas elevadas [10], mientras que las guías de onda convencionales requieren interfaces multimaterial con acoplamiento imperfecto [11,12]. Frente a estos desafíos, la tecnología Gap Waveguide (GW) emerge como solución disruptiva [13,14], permitiendo propagación electromagnética sin contacto físico mediante confinamiento por estructura periódica. Esta innovación facilita guías de onda compactas sintonizadas al modo  $TE_{10}$  [15], optimizando simultáneamente integración modular, escalabilidad arquitectónica y estabilidad en entornos dinámicos, factores clave para implementaciones masivas en redes 6G.

## Metodología

Este estudio propone un análisis integral de la tecnología GW como alternativa disruptiva en el diseño de antenas para mmWave, abordando las limitaciones de eficiencia en prototipos convencionales durante procesos de fabricación. La estructura metodológica se articula en los siguientes ejes: II Análisis prospectivo de requisitos técnicos para redes móviles avanzadas; III Diseño de la estructura periódica; IV Diseño del arreglo del 4x4 con tecnología GW. Los resultados demuestran que la tecnología GW mitiga los desafíos de acoplamiento físico inherentes a las guías tradicionales, posicionándose como solución escalable para sistemas 6G que demandan pérdidas superficiales mínimas y densificación extrema. La implementación del diseño, que incorporó nuevas capas, permitió incrementar significativamente la ganancia del arreglo en comparación con configuraciones previas de GW a 94 GHz, evidenciando las ventajas del nuevo enfoque en términos de rendimiento.

## Resultados

### Análisis prospectivo de requisitos técnicos para redes móviles avanzadas

El paradigma de la infraestructura 5G, que evoluciona dentro de marcos tecnológicos relativamente estables, está cediendo espacio ante la necesidad de superar modelos técnicos obsoletos para adoptar otros más avanzados. Actualmente, la creciente demanda social de optimizar las redes móviles en dimensiones clave, es decir, eficiencia de costos, energética,

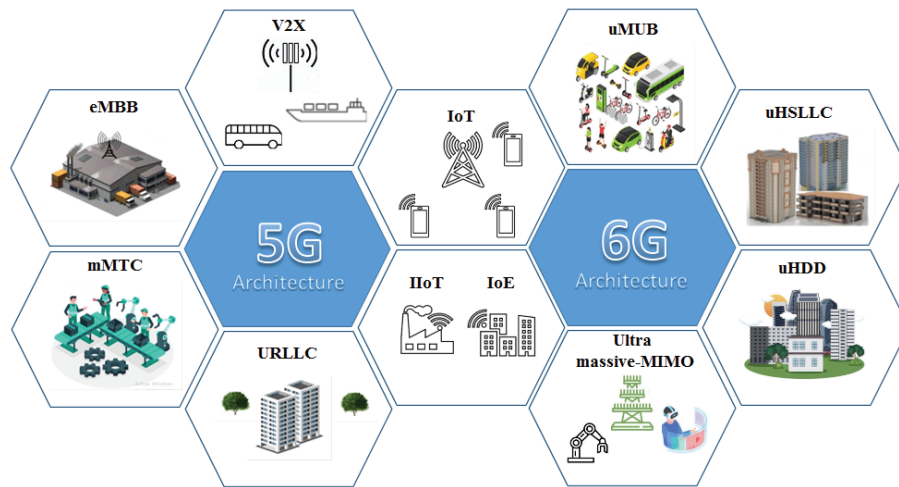
espectral y operativa, ha impulsado la estandarización 6G. Este proceso busca resolver desafíos técnicamente complejos y alinear las capacidades tecnológicas con las exigencias sociales emergentes. No obstante, persiste una brecha crítica en la comprensión de los escenarios disruptivos que plantea 6G y su impacto real en las necesidades contemporáneas de la sociedad.

Aunque la 6G aún se encuentra en fase de investigación, ya se proyecta como la sucesora de la 5G, superándolo en velocidad de transmisión (hasta Tbps), control de redes y eficiencia espectral. Las bandas de frecuencias ópticas emergen como candidatas clave para soportar este salto tecnológico, especialmente ante el crecimiento de datos masivos y la complejidad de redes heterogéneas [3,4]. No obstante, como señala [16], el despliegue de esta nueva generación de comunicaciones inalámbricas requiere el desarrollo de formas de onda flexibles en la capa física, capaces de garantizar una alta disponibilidad del servicio en escenarios de conectividad masiva, como los impulsados por IoT. Estas innovaciones, junto con otras características comparativas entre la 5G y la 6G (cuadro 1), facilitarán un uso más eficiente del ancho de banda y la integración de un número exponencialmente mayor de dispositivos interconectados [10,11].

**Cuadro 1.** Los requisitos tecnológicos planteados por las redes 5G y 6G.

| Requerimiento                               | 5G        | 6G          |
|---------------------------------------------|-----------|-------------|
| Velocidad máxima de datos                   | 20 Gbps   | 1 Tbps      |
| Capacidad de carga                          | 1Gbps     | 100Gbps     |
| Velocidad de datos percibida por el usuario | 100 Mbps  | 1 Gbps      |
| Eficiencia espectral de pico                | 30 b/s/Hz | 60 b/s/Hz   |
| Experiencia de usuario                      | 50bps     | 10Gbps      |
| Latencia de extremo a extremo               | 10 ms     | 1 ms        |
| Latencia solo de radio                      | 1 ms      | 100 $\mu$ s |
| Confiabilidad                               | 99.999%   | 99.99999%   |

Mientras la 5G se centra en escenarios como eMBB, mMTC y uRLLC, la 6G incorporará tres nuevos pilares: Banda Ancha Móvil Ubícua (uMUB), Comunicaciones de Ultra Alta Velocidad y Baja Latencia (uHSLLC) y Densidad de Datos Ultra Alta (uHDD), ampliando así las capacidades de su predecesora [10,11]. Esta evolución impulsará la transición de IoT al Internet de Todo (IoE), un ecosistema hiperconectado que integrará personas, procesos industriales mediante Internet Industrial de las Cosas (IIoT), y hasta 24.000 millones de dispositivos inteligentes para 2030 [11]. El IoE interconectará redes heterogéneas de sensores, equipos y servicios, aunque su implementación requerirá una fase híbrida 5G/6G (Figura 1) para garantizar eficiencia estructural ante la complejidad técnica de la nueva arquitectura [1]-[5].



**Figura 1.** Análisis de infraestructura 5G/6G.

### Diseño de la estructura periódica

Esta investigación adopta un enfoque exploratorio, aplicable cuando un campo de estudio es incipiente, para identificar problemas clave y metodologías viables que orienten futuros desarrollos técnicos, particularmente en el diseño de nuevas variantes de antenas. El diseño de antenas en bandas milimétricas exige evaluar tecnologías de guías de onda y sus desafíos, como la precisión en contactos eléctricos para minimizar pérdidas en la fabricación, crítica en la banda W (75-110 GHz) por sus tolerancias submilimétricas.

La tecnología GW destaca como alternativa a las antenas clásicas por lograr bajas pérdidas y simplificar su fabricación al eliminar el contacto eléctrico requerido en guías convencionales [12]. Esto permite crear metamateriales artificiales como un Conductor Magnético Artificial (PMC) con propiedades electromagnéticas inexistentes en la naturaleza, capaces de direccionar ondas entre placas metálicas paralelas; mientras que placas Conductor Eléctrico Perfecto (PEC) permiten propagación a cualquier distancia (según ecuaciones de Maxwell), una combinación PMC-PEC con separación  $< \lambda/4$  [12,13]. El objetivo es garantizar la propagación monomodo dentro del ancho de banda de trabajo, asegurando que sólo el modo  $TE_{10}$  se propague en la banda de operación.

Este efecto se produce debido a la capacidad de los pines para crear una banda de bloqueo con bajas pérdidas y dimensiones compactas, gracias a su diseño específico. Las estructuras de banda prohibida electromagnética, basadas en metamateriales de alta impedancia, suprimen la propagación de ondas en un stopband específico debido a sus propiedades isotrópicas. Dado que las dimensiones y separación de elementos impiden reducir las capas del diseño, la red de alimentación se adapta a la tecnología GGW, optimizando pines clasificados por nivel [13]. La celda unidad es una estructura periódica clave para calcular el stopband que se define en las (Figuras 2a-b), integrando este enfoque en el diseño multicapa de la antena.

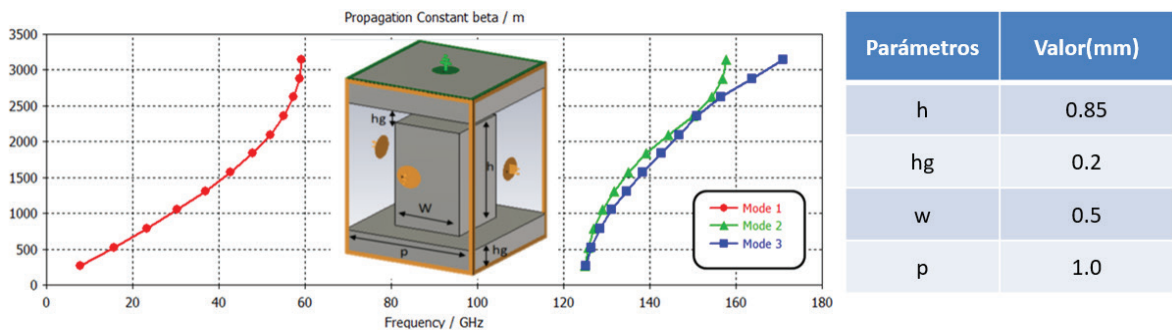


Figura 2a. Análisis del pin en la capa I.

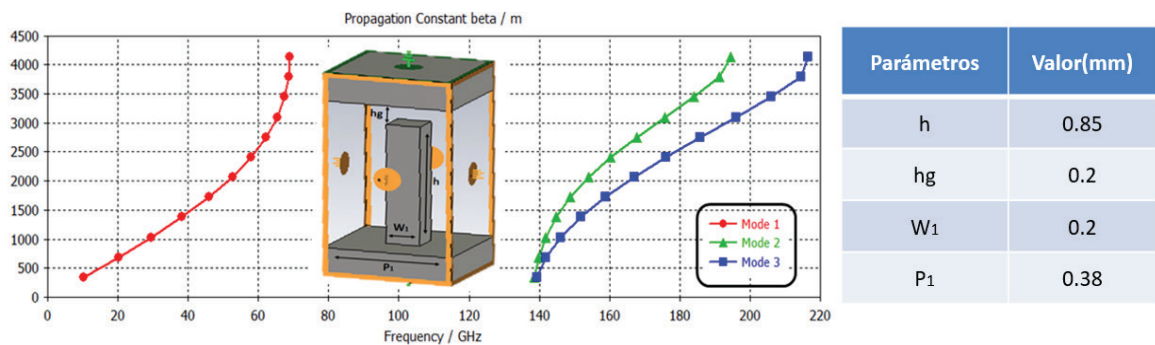


Figura 2b. Análisis del pin en la capa II.

Diseño del arreglo del 4x4 con tecnología GGW

El estudio [14] optimiza agrupaciones de ranuras en guías rectangulares para su uso en tecnología GGW, resolviendo primero el problema externo de fuentes magnéticas/eléctricas en entornos multicapa. Para distribuir equitativamente la potencia en los puertos del divisor en T, se sitúa un pin central, cuyos parámetros críticos son las distancias  $S_1/S_2$  entre el pin y la pared. La reducción de pines en las salidas ( $S_3/S_4$ ) maximiza el ancho de banda y la adaptación del arreglo GGW, minimizando su tamaño y optimizando la propagación mediante dimensiones de pines seleccionadas, como aparece en la (Figura 3).

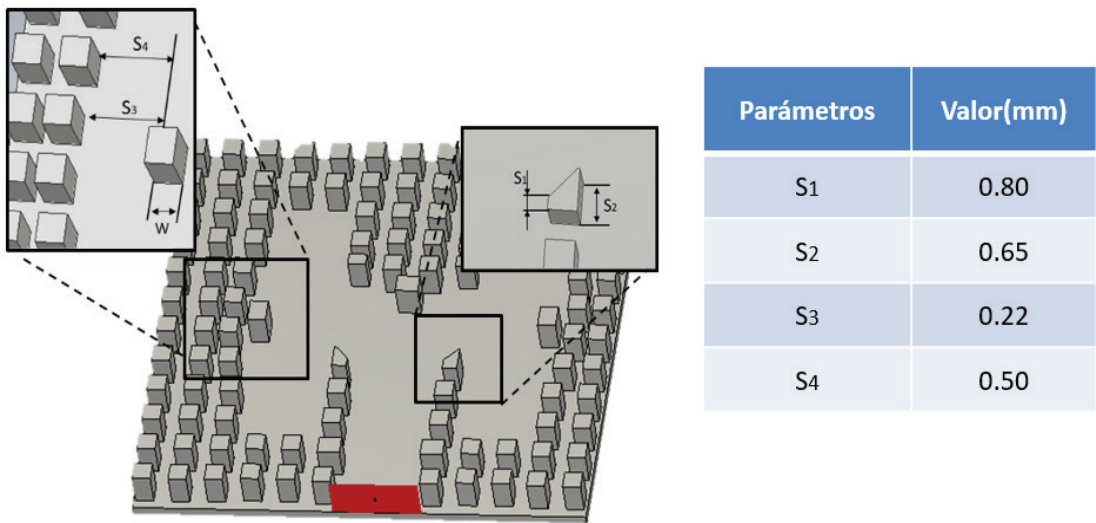
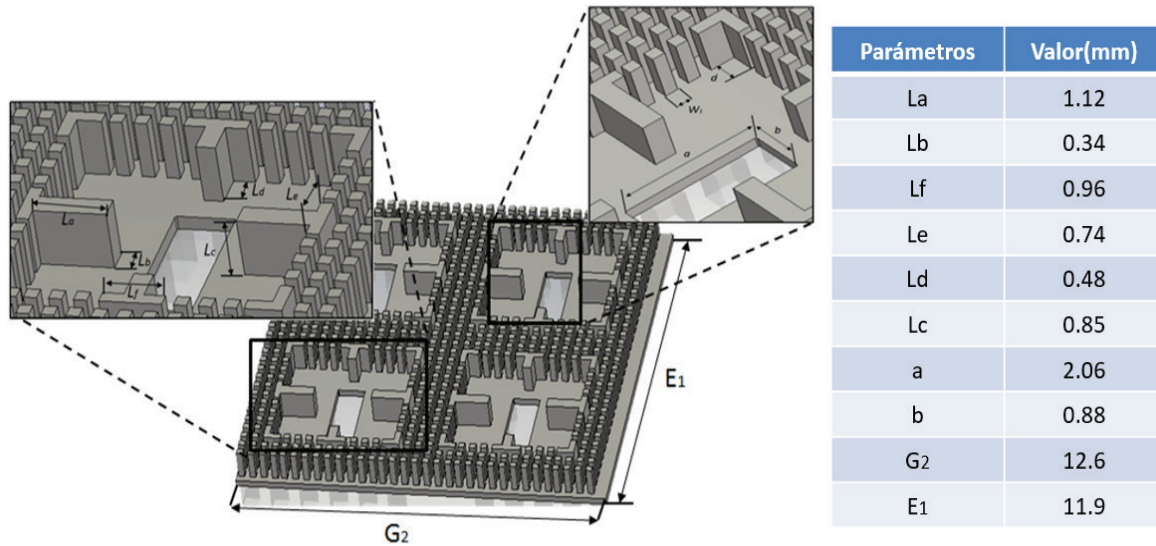


Figura 3. Capa I que componen la antena disponible y sus dimensiones.

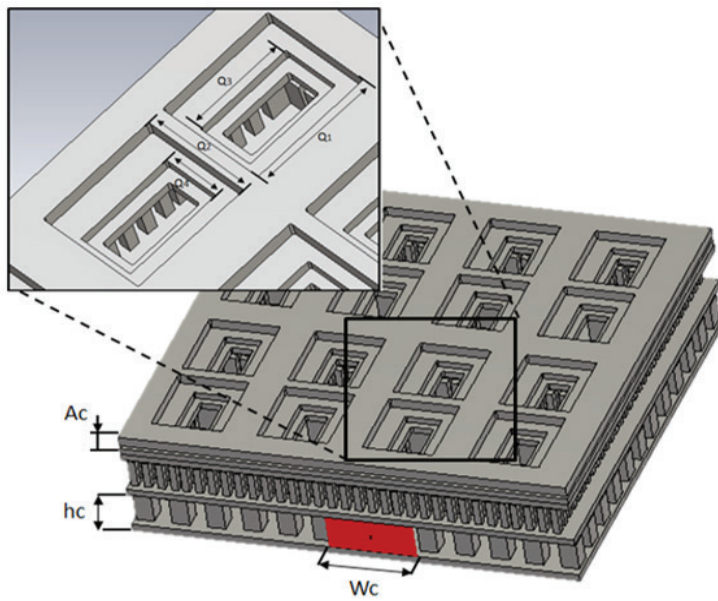


El diseño de la antena en la (Figura 3) inicia con la capa I, seguida de la adaptación de la capa II a tecnología gap para distribuir uniformemente potencia y fase a las cavidades radiantes. Para ello, se emplean pines reducidos y estructuras adaptadoras en los divisores de la (Figura 4), ajustando su longitud ( $L_a$ ) y anchura ( $L_b$ ) según el aumento de elementos y las restricciones espaciales. Estas modificaciones optimizan las ranuras de acoplamiento, garantizando un control preciso del lóbulo principal y secundario.



**Figura 4.** Capa II que componen diseño del módulo 4x4.

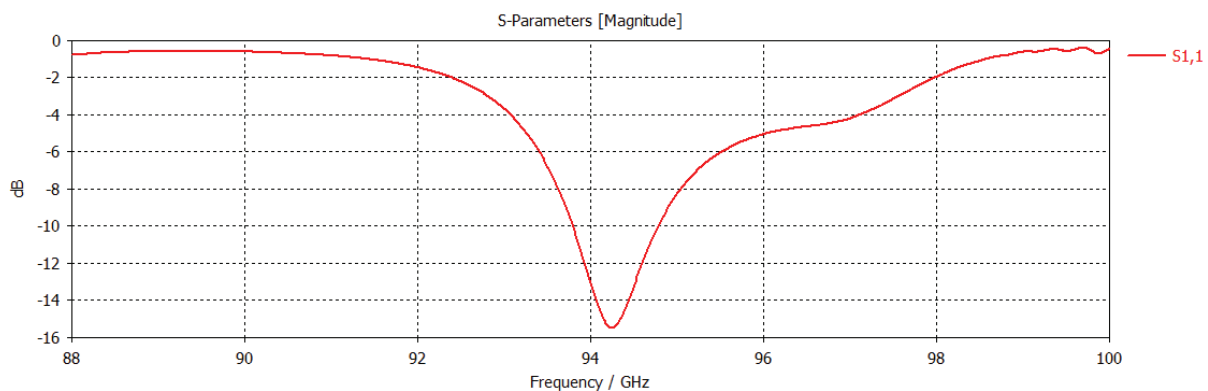
La selección de esta estructura en la capa II incrementa la ganancia y directividad de la antena, mientras que la adaptación de los elementos laterales de distribución reduce las pérdidas inherentes al diseño de dicha capa. En este contexto al implementar las capas I y II, se adaptó la capa III para maximizar la ganancia, considerando las restricciones iniciales de diseño y el comportamiento de la estructura en 94 GHz. Aunque la tecnología GGW logra pérdidas mínimas en bandas mmWave, el ancho de banda resultante era insuficiente. Para resolverlo, se incorporó una variante de excitación de elementos radiantes en la (Figura 5) que reduce pérdidas adicionales y optimiza el ancho de banda operativo.



| Parámetros | Valor(mm) |
|------------|-----------|
| Q1         | 2.16      |
| Q2         | 1.92      |
| Q3         | 1.76      |
| Q4         | 1.25      |
| Wc         | 2.48      |
| hc         | 1.05      |
| Ac         | 0.23      |

**Figura 5.** Capa III que componen diseño del módulo 4x4.

Los resultados en la (Figura 6) muestran el parámetro  $S_{11}$ , evidenciando que la configuración de la antena logra un coeficiente de reflexión inferior a -10 dB, con un pico de resonancia a 94 GHz. Este resultado indica una excelente adaptación, validando el diseño del arreglo. Para optimizar este equilibrio, se escaló el elemento radiante, identificando que las dimensiones  $Q_1/Q_2$  que influyen en la frecuencia de resonancia, y  $Q_3/Q_4$  en la eficiencia estructural. Con el objetivo de optimizar la adaptación en el diseño de antenas GW, se redujo el tamaño de la estructura.

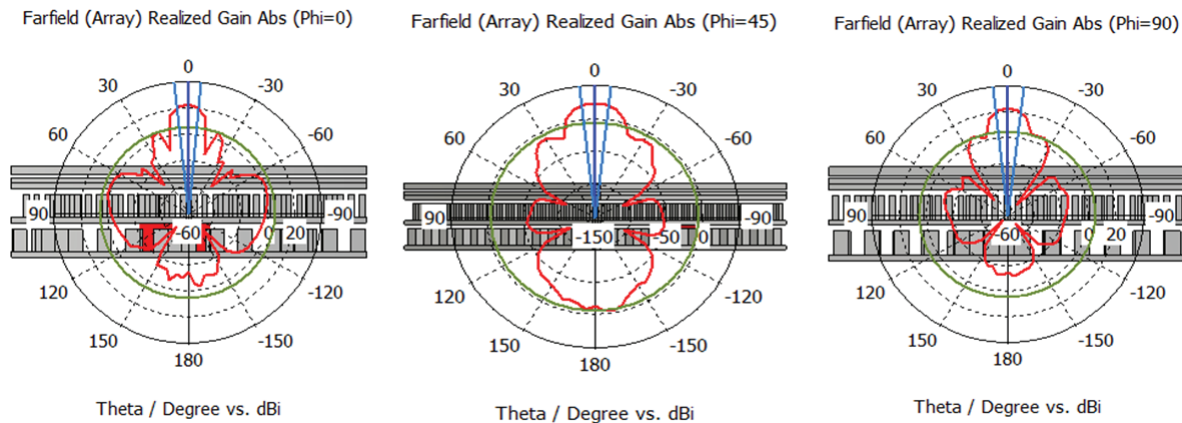


**Figura 6.** Valores obtenidos del parámetro  $S_{11}$  del arreglo.

La (Figura 7) compara el patrón de radiación en coordenadas polares del arreglo en banda W, destacando un lóbulo principal centrado en  $0.0^\circ$  con ancho de haz de  $\sim 12^\circ$  (-3 dB), confirmando su alta directividad. Esta focalización angular maximiza la concentración de energía en el eje principal ideal para enlaces en la banda W y radares milimétricos, al reducir la dispersión lateral. La coherencia entre las representaciones polar, valida la estabilidad del patrón incluso en entornos de alta frecuencia, asegurando precisión en aplicaciones críticas.



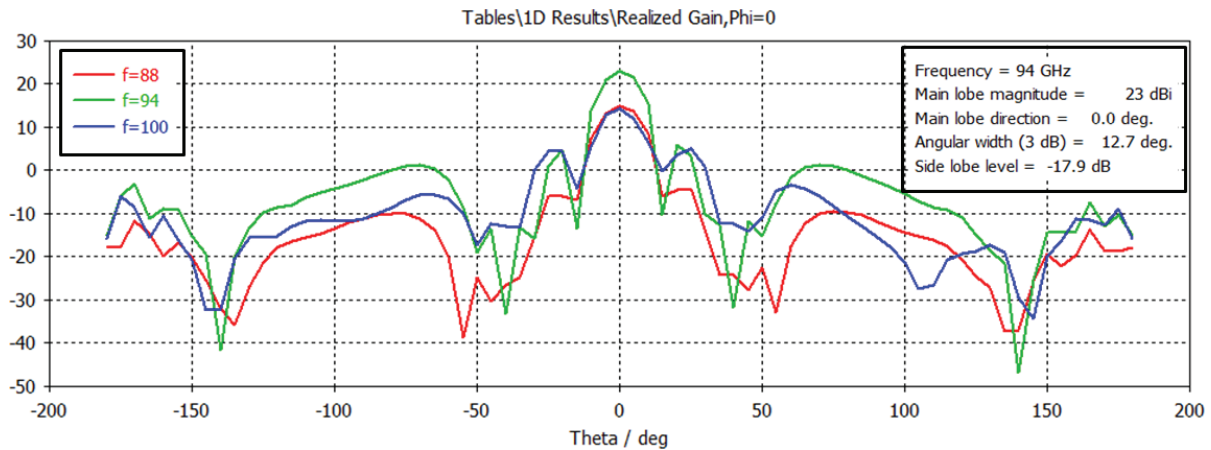
La representación polar, por su parte, permite un análisis cuantitativo de parámetros críticos, como el nivel de lóbulos laterales (SLL) y la estabilidad del haz en toda la banda operativa. Los resultados evidencian un óptimo equilibrio entre complejidad de diseño y rendimiento radiométrico, clave para sistemas comerciales que requieren fiabilidad en entornos de interferencia multicelda.



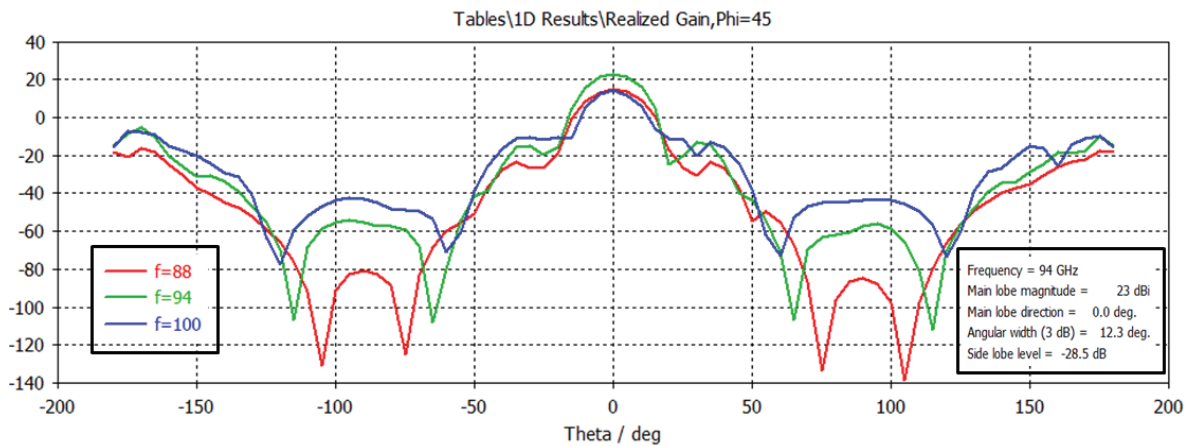
**Figura 7.** Patrón de radiación del arreglo de antenas entre los planos  $\phi=0^\circ$ ,  $\phi=45^\circ$  y  $\phi=90^\circ$ .

Las (Figuras 8 a,b,c) respectivamente, representan un análisis detallado de los parámetros clave del arreglo, destacando una ganancia máxima de 23 dBi en ambos planos ( $\phi = 0^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$ ). Este resultado confirma su alta direccionalidad y eficiencia energética, esencial para aplicaciones en bandas milimétricas donde la concentración de potencia es crítica. El ancho de haz a -3 dB registra 11.8° en el plano  $\phi = 0^\circ$  y 12.7° en  $\phi = 90^\circ$ , revelando una simetría angular destacable con una variación mínima de 0.9° entre planos ortogonales. Esta reducida discrepancia, inferior a 1°, evidencia un control preciso de la direccionalidad del haz, incluso en geometrías críticas donde la falta de alineamientos estructurales suelen amplificar asimetrías. Tal coherencia angular no solo valida la estabilidad del diseño ante perturbaciones, sino que garantiza un rendimiento uniforme en aplicaciones que demandan patrones de radiación predecibles.

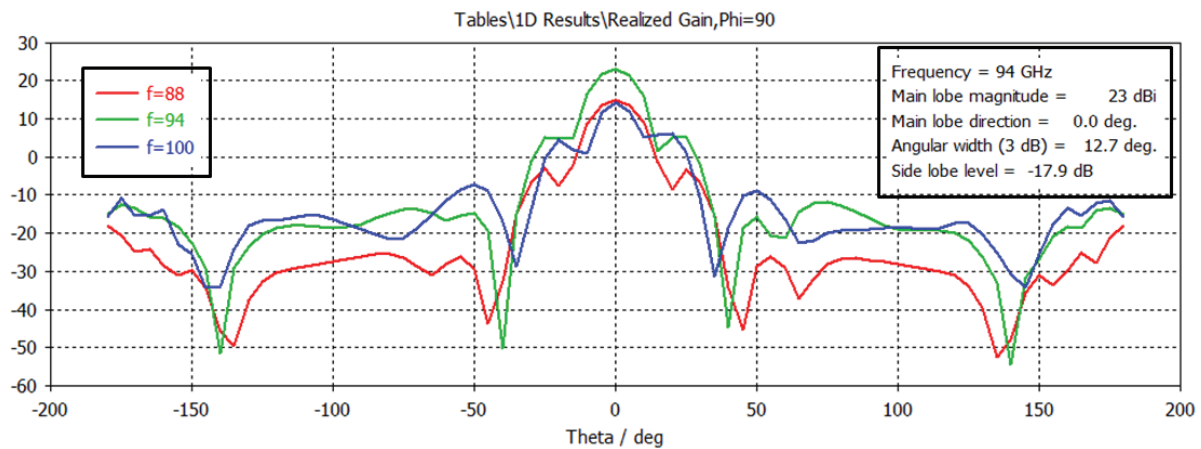
La simetría angular entre los planos  $\phi=0^\circ$ ,  $\phi=45^\circ$  y  $\phi=90^\circ$  evidencia una variación de ganancia entre lóbulos laterales inferior a 0.5 dB en  $\phi=0^\circ$  y  $\phi=90^\circ$ , con niveles de lóbulos laterales (SLL) de -17.9dB. En contraste, el plano  $\phi=45^\circ$  presenta una supresión óptima de -28.5 dB, destacando una asimetría controlada que prioriza la direccionalidad en el eje central. Este comportamiento refuerza la coherencia espacial del patrón de radiación, un resultado crítico en tecnologías milimétricas donde la precisión electromagnética es vulnerable a imperfecciones de fabricación. Este equilibrio entre direccionalidad, simetría y supresión de lóbulos laterales lo posiciona como una solución ideal para sistemas 6G.



**Figura 8a.** Diagramas de radiación del arreglo en el plano Phi=0.



**Figura 8b.** Diagramas de radiación del arreglo en el plano Phi=45.



**Figura 8c.** Diagramas de radiación del arreglo en el plano Phi=90.

La (Figura 9) revela una eficiencia total del 94% a 94 GHz, un valor excepcional que refleja la sinergia entre el diseño optimizado del arreglo y la tecnología GW. Este resultado está respaldado por un coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ) inferior a -15 dB en toda la banda operativa, lo

que limita las pérdidas por reflexión a menos del 3% ( $|S_{11}|^2 < 0.03$ ) y maximiza la transferencia de potencia al medio radiante. Comparado con soluciones basadas en sustratos convencionales como FR-4 o Rogers RO4003, que suelen alcanzar eficiencias del 70–85% [15], [16] este diseño demuestra una mejora del 10–20% en eficiencia energética, un avance crítico para aplicaciones en bandas milimétricas donde las pérdidas óhmicas y dieléctricas son dominantes.

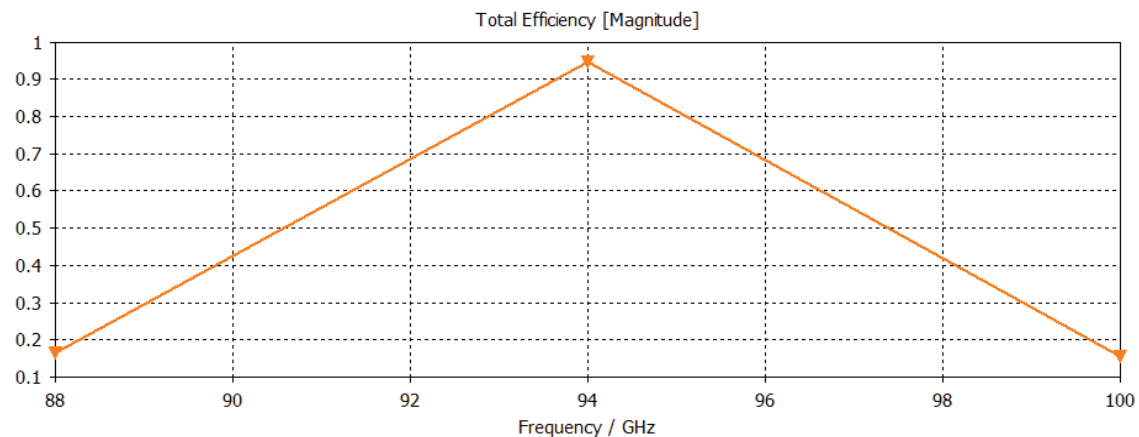


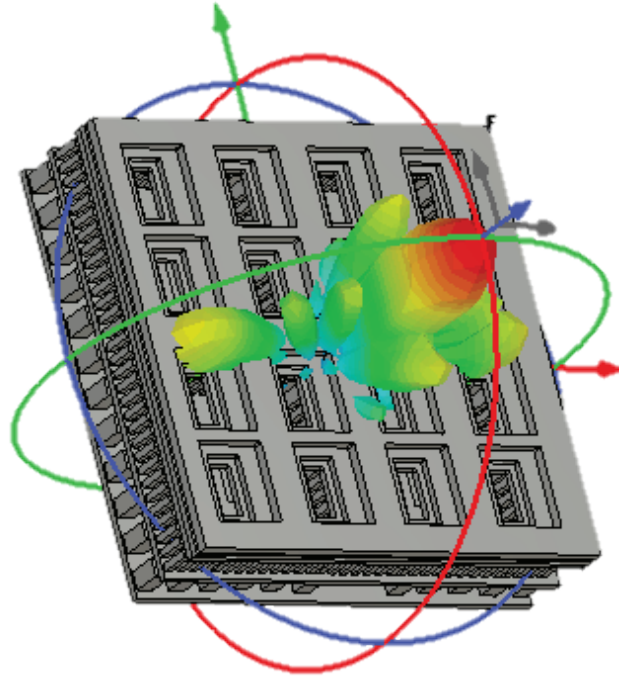
Figura 9. Eficiencia total del arreglo final.

La (cuadro 2) presenta un análisis comparativo fundamental que contextualiza las contribuciones de este trabajo frente a diseños previos reportados en la literatura, específicamente en antenas tipo ranura basadas en tecnología GGW operando en la banda de 94 GHz. En ella se contrasta el arreglo de 4x4 ranuras dobles y 3 capas propuesto, que alcanza una ganancia de 23 dBi, con configuraciones anteriores de 2x2 y una sola capa, cuyas ganancias se sitúan en 12 dBi. Esta comparación no solo cuantifica la mejora en el rendimiento radiante, sino que evidencia la escalabilidad de la tecnología GGW y la eficacia de la estrategia de diseño multicapa adoptada. La inclusión de esta tabla es esencial para validar la relevancia del presente estudio, destacando cómo la evolución en la arquitectura del arreglo en términos de elementos, capas y configuración de alimentación se traduce directamente en un incremento significativo de la ganancia, reforzando así la viabilidad de esta solución para aplicaciones 6G y satelitales que exigen alta directividad.

Cuadro 2. Comparación entre la antena y diferentes antenas tipo ranura.

| Referencia   | Tipo de antena            | Tecnología, N° de Capas | f(GHz) | Ganancia(dBi) |
|--------------|---------------------------|-------------------------|--------|---------------|
| [17]         | Arreglo de ranuras        | GGW, 1 Capas            | 94     | 12            |
| [18]         | Arreglo de ranuras        | GGW, 1 Capas            | 94     | 12            |
| Este trabajo | Arreglo de ranuras dobles | GGW, 3 Capas            | 94     | 23            |

La (Figura 10) exhibe el patrón de radiación resultante de la configuración propuesta, donde se observa un lóbulo principal estrecho y bien definido, acompañado de un nivel de lóbulos laterales suprimido. Esta característica direccional lo hace idóneo para aplicaciones que exigen alta concentración de potencia en el eje de radiación principal, como enlaces punto a punto en la banda W y sistemas de radar milimétrico. La estructura GGW demuestra su viabilidad para superar las limitaciones de fabricación en mmWave mediante una topología compacta con redes de distribución robusta, diseñada para mantener el rendimiento electromagnético ante imperfecciones constructivas propias de las tolerancias submilimétricas en estas frecuencias.



**Figura 10.** Patrón de radiación.

## Conclusiones

Este estudio establece un referente en el diseño de antenas GGW de alta ganancia para la banda W, demostrando que la optimización multicapa y la distribución eficiente de alimentación son determinantes para superar las limitaciones de diseños previos. Los resultados no solo validan el potencial de la tecnología GGW como pilar para sistemas 6G y de comunicación satelital, sino que también delinean un marco metodológico replicable para futuros desarrollos en bandas milimétricas. El diseño teórico de un arreglo de antena  $4 \times 4$  elementos en banda W (94 GHz), basado en tecnología GGW, demuestra en simulación un rendimiento sobresaliente: ganancia de 23 dBi, ancho de banda de 1 GHz, eficiencia del 94% y control preciso del patrón de radiación. La simetría angular entre los planos  $\phi=0^\circ$  y  $\phi=90^\circ$ , con una variación de ganancia inferior a 0.5 dB y niveles de lóbulos laterales (SLL) de -17.9 dB, junto a una supresión óptima de -28.5 dB en  $\phi=45^\circ$ , demuestra coherencia espacial y direccionalidad priorizada en el eje central, atributos clave para sistemas satelitales.

## Referencias

- [1] N. Chukhno et al., "Models, Methods, and Solutions for Multicasting in 5G/6G mmWave and Sub-THz Systems," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 1, pp. 119-159, Firstquarter 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3319354.
- [2] S. F. Ahmed et al., "Toward a Secure 5G-Enabled Internet of Things: A Survey on Requirements, Privacy, Security, Challenges, and Opportunities," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13125-13145, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352508.
- [3] B. Adhikari, M. Jaseemuddin and A. Anpalagan, "Resource Allocation for Co-Existence of eMBB and URLLC Services in 6G Wireless Networks: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 552-581, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3343250.

- [4] G. Di Gennaro, A. Buonanno, G. Romano, S. Buzzi and F. A. N. Palmieri, "Decentralized Grant-Free mMTC Traffic Multiplexing With eMBB Data Through Deep Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking*, vol. 2, pp. 1440-1455, 2024, doi: 10.1109/TMLCN.2024.3467044.
- [5] F. Tan, S. Si, H. Chen, S. Li and T. Lv, "Rate Splitting Multiple Access Assisted Cell-Free Massive MIMO for URLLC Services in 5G and Beyond Networks," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 6018-6032, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3459911.
- [6] G. K. Munasinghe and M. Murtaza, "Analyzing Vehicle-to-Everything Communication for Intelligent Transportation System: Journey from IEEE 802.11p to 5G and Finally Towards 6G," 2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA), Sydney, Australia, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371804.
- [7] I. Ishteyaq, K. Muzaffar, N. Shafi and M. A. Alathbah, "Unleashing the Power of Tomorrow: Exploration of Next Frontier With 6G Networks and Cutting Edge Technologies," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 29445-29463, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367976.
- [8] A. Kaushik et al., "Toward Integrated Sensing and Communications for 6G: Key Enabling Technologies, Standardization, and Challenges," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 52-59, June 2024, doi: 10.1109/MCOMSTD.0007.2300043.
- [9] M. A. S. Syed, S. Mohsin, J. Yu, Y. Yao, M. A. B. Abbasi and S. M. Abbas, "Comparative Analysis of Novel Gliding Walled Multilayer and Traditional Longitudinally Corrugated Waveguides for W-Band Millimeter-Wave Applications," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 138827-138834, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3437413.
- [10] A. Guidotti et al., "The path to 5G-Advanced and 6G Non-Terrestrial Network systems," 2022 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz, Austria, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914764.
- [11] A. Salh et al., "A Survey on Deep Learning for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications Challenges on 6G Wireless Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 55098-55131, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069707.
- [12] Q. Ren, A. U. Zaman and J. Yang, "Dual-Circularly Polarized Array Antenna Based on Gap Waveguide Utilizing Double-Grooved Circular Waveguide Polarizer," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 11, pp. 10436-10444, Nov. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3195458.
- [13] M. Rabbanifard, D. Zarifi, A. Farahbakhsh and M. Mrozowski, "Design of Compact and Wideband Groove Gap Waveguide-Based Directional Couplers," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86346-86354, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416290.
- [14] I. Zhou, L. Jofre and J. Romeu, "Technology Assessment of Aperture Coupled Slot Antenna Array in Groove Gapwaveguide for 5G Millimeter Wave Applications," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 139556-139564, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119748.
- [15] M. Abdullah et al., "An Eight Element Wideband DGS MIMO Antenna System for 5G Handheld Devices," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 141476-141488, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3467060.
- [16] Y. -F. Tsao, A. Desai and H. -T. Hsu, "Dual-Band and Dual-Polarization CPW Fed MIMO Antenna for Fifth-Generation Mobile Communications Technology at 28 and 38 GHz," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 46853-46863, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3171248.
- [17] J. L. Blanco Orta, M. del C. Guerra Martínez, M. E. Borrego Corona, K. Marichal Leyva, "Diseño de un arreglo de antena con tecnología Groove Gap Waveguide para operar en la banda W," in *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 45, no. 3, pp. 1-13, 2024.
- [18] J. L. Blanco-Orta, M. del C. Guerra-Martínez, K. Marichal-Leyva, A. Calzadilla-Ayuso, A. Sánchez-Pompa, "Antenas de ranura con tecnología GGW para aplicaciones 6G en 94GH," in *Revista Tecnología En Marcha*, vol. 38, no. 3, pp. 151-161, 2025, <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7563>.

## Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.