



Arreglos Modulados en el Tiempo: Soluciones Avanzadas para el Control Dinámico de Haces

Jorge Luis Blanco Orta, María del Carmen Guerra Martínez

RESUMEN / ABSTRACT

Este artículo investiga el uso de Arreglos Modulados en el Tiempo (TMA) para comunicaciones múltiples simultáneas en satélites de Órbita Terrestre Baja (LEO), enfocándose en superar limitaciones de cobertura, costo y complejidad. Los satélites LEO, aunque prometedores por su baja latencia y cobertura global, enfrentan desafíos como la reducida extensión de sus haces. Frente a esto, los TMA emergen como una solución innovadora al reemplazar desplazadores de fase con secuencias de conmutación, generando haces direccionales con lóbulos laterales ultrabajo y supresión de interferencias. El estudio compara los TMA con arreglos en fase tradicionales, demostrando que los primeros reducen costos, complejidad algorítmica y consumo energético. Se desarrolla un marco metodológico que incluye: mapeo entre la Dirección de Llegada (DoA) y parámetros de conmutación de los TMA. Los resultados validan la eficacia de los TMA en escenarios prácticos, incluso con imperfecciones en la estimación del canal, destacando su tolerancia dependiente de la forma del haz. La contribución principal de este trabajo es el desarrollo de un marco de control adaptativo para TMA mediante algoritmos de Control Adaptativo de Parámetros de Conmutación (ASPC) y Optimización por Programación Cuadrática (QPO). La simulación demuestra que la optimización dinámica de parámetros de conmutación (α_n , β_n) alcanza: supresión de lóbulos laterales hasta -80 dB, latencia de ajuste $\leq 5 \mu s$, reducción de costos $>40\%$ y consumo energético del 20% frente a arreglos tradicionales. Estos resultados superan limitaciones críticas en entornos LEO dinámicos y establecen bases para su adopción en estándares 6G.

Palabras claves: TMA, LEO, 6G, DoA.

This article investigates the use of Time-Modulated Arrays (TMA) for simultaneous multi-user communications in Low Earth Orbit (LEO) satellites, focusing on overcoming limitations in coverage, cost, and complexity. Although LEO satellites show promise due to their low latency and global coverage, they face challenges such as limited beam footprint. In response, TMAs emerge as an innovative solution by replacing phase shifters with switching sequences, generating directional beams with ultra-low sidelobes and interference suppression. The study compares TMAs with traditional phased arrays, demonstrating reductions in cost, algorithmic complexity, and energy consumption. A methodological framework is developed, including mapping between Direction of Arrival (DoA) and TMA switching parameters. Results validate the effectiveness of TMAs in practical scenarios, even with imperfect channel estimation, highlighting their beam-shape-dependent tolerance. The main contribution of this work is the development of an adaptive control framework for TMAs using Adaptive Switching Parameter Control (ASPC) and Quadratic Programming Optimization (QPO) algorithms. Simulations demonstrate that dynamic optimization of switching parameters (α_n , β_n) achieves: sidelobe suppression up to -80 dB, adjustment latency of $\leq 5 \mu s$, cost reduction of $>40\%$, and energy consumption of only 20% compared to traditional arrays. These results overcome critical limitations in dynamic LEO environments and establish foundations for their adoption in 6G standards.

Keywords: TMA, LEO, 6G, DoA.

Time-Modulated Arrays: Advanced Solutions for Dynamic Beam Control.

1. -INTRODUCCIÓN

La industria de las telecomunicaciones enfrenta un proceso de transformación continua, impulsada por la creciente demanda de usuarios que exigen servicios multimedia de alta calidad, mayor capacidad en los canales de transmisión y una conectividad robusta para integrar dispositivos, aplicaciones, datos y usuarios en tiempo real. Este escenario obliga a optimizar infraestructuras que garanticen velocidades elevadas, estabilidad en la transferencia de información y análisis eficiente de datos. En especial para entornos multiusuario donde la escalabilidad y la interoperabilidad son claves para sostener ecosistemas digitales dinámicos y complejos.

El avance continuo en las tecnologías de comunicación no solo acelera el progreso tecnológico, sino que plantea desafíos técnicos y consideraciones éticas que exigen análisis integrales. La implementación global de la 5G, por ejemplo, está transformando industrias estratégicas mediante aplicaciones disruptivas, desde ciudades inteligentes hasta telemedicina avanzada y experiencias inmersivas de realidad extendida. La versión 15 del estándar 3GPP, introdujo la especificación Nueva Radio (NR, por las siglas del término en inglés, *New Radio*) como interfaz inalámbrica central para la 5G. Esta arquitectura busca cubrir tres paradigmas clave: la banda ancha móvil mejorada (eMBB, por las siglas del término en inglés, *enhanced Mobile BroadBand*), las comunicaciones ultraconfiables de baja latencia (URLLC, por las siglas del término en inglés, *Ultra-Reliable Low-Latency Communications*) y las comunicaciones masivas entre dispositivos (mMTC, por las siglas del término en inglés, *massive Machine-Type Communications*) [1]. Sin embargo, la operatividad de estos servicios enfrenta un obstáculo crítico: dependencia de las bandas de ondas milimétricas (mmWave), cuya alta atenuación y corto alcance limitan la cobertura efectiva, especialmente en zonas geográficamente irregulares donde la infraestructura de transmisión enfrenta desafíos físicos.

La 6G se posiciona como solución para optimizar la capacidad de transmisión, aunque enfrenta desafíos estructurales críticos como la complejidad de hardware y costos operativos asociados a múltiples cadenas RF [1,2]. Paralelamente, las redes no terrestres (NTN, por las siglas del término en inglés, *Non-Terrestrial Networks*) emergen como alternativa para ampliar cobertura, pero su implementación en constelaciones LEO requiere soluciones innovadoras de bajo costo [3,4,5]. En este contexto, los TMA se presentan como tecnología disruptiva al simplificar la arquitectura RF mediante modulación temporal, reemplazando desplazadores de fase por conmutadores de bajo costo (>40% ahorro) y reduciendo consumo energético (20% vs tradicional) [6,7]

Desde la perspectiva de [5], los satélites LEO emergen como una alternativa prometedora para proporcionar comunicaciones de alta velocidad y baja latencia, características ideales para servicios sensibles al tiempo como voz sobre IP o transmisión de datos en tiempo real; estos sistemas han captado un significativo interés investigativo por su potencial para lograr cobertura global, aprovechando ventajas como atenuación reducida, costos de lanzamiento competitivos y eficiencia energética [6]. Complementariamente a Starlink, Cuba podría aprovechar constelaciones LEO como OneWeb y Project Kuiper, que ofrecen cobertura global inclusiva en latitudes tropicales y brindan conectividad de baja latencia (<50 ms) y alta capacidad, esencial para servicios críticos como telemedicina y educación remota. Su despliegue efectivo en la región, sin embargo, depende de acuerdos regulatorios y alianzas con operadores locales, lo que diversificaría las opciones tecnológicas y reduciría riesgos de monopolio [7]. No obstante, su implementación enfrenta desafíos críticos: la cobertura limitada por haz individual obliga a desplegar constelaciones masivas, con el consiguiente incremento exponencial de costos operativos y riesgos de colisión orbital, mientras que técnicas avanzadas de formación de haces (*beamforming*), esenciales para optimizar la capacidad de enlace, resultan inviables debido a su alta complejidad computacional, la cual supera los recursos de procesamiento disponibles a bordo de satélites con arquitectura modular y restricciones de hardware estrictas.

En este sentido los TMA destacan por su capacidad para moldear dinámicamente la respuesta de radiación sin requerir modificaciones físicas en la agrupación de antenas ni emplear componentes RF reconfigurables de alto costo, como amplificadores de ganancia variable. Esta ventaja técnica no solo responde a necesidades operativas específicas, sino que aborda un desafío crítico en comunicaciones satelitales: la simplificación integral de la formación de haces adaptativos y la arquitectura RF en sistemas multi-haz. Por ello, el enfoque central se dirige al uso estratégico de los TMA en aplicaciones satelitales, donde su eficiencia se alinea con los requisitos de cobertura extensa y optimización de recursos en entornos de alta demanda. Al comparar las técnicas de los TMA con los arreglos en fase tradicionales, se confirma su rendimiento superior en términos de reducción de costos, complejidad hardware y consumo energético [6, 8].

La creciente demanda de los TMA está impulsando su adopción en las NTN, motivada por su parámetro de control adicional y capacidad para generar haces direccionales adaptativos. Este potencial ha sido reconocido por la Agencia Espacial Europea

(ESA, por las siglas del término en inglés, *European Space Agency*), que en su reciente convocatoria para comunicaciones satelitales seguras resaltó la relevancia de investigaciones en los TMA como eje para optimizar enlaces críticos [7, 8]. La propuesta de integrar los TMA en sistemas 6G radica en su habilidad para simplificar la formación de haces mediante modulación temporal, eliminando la necesidad de componentes de RF reconfigurables complejos. Esta tecnología no solo ofrece flexibilidad estructural, sino que su capacidad de detección direccional y soporte nativo para operaciones multihaz, la posicionan como candidata ideal para aplicaciones satelitales. Frente a los estudios previos que sientan las bases de la técnica, la presente investigación tiene como objetivo principal superar la limitación de adaptabilidad dinámica en entornos LEO mediante el desarrollo, implementación y validación de un marco de control adaptativo en TMA basado en los algoritmos ASPC y QPO. La contribución fundamental de este trabajo radica en demostrar mediante simulaciones cómo la optimización en tiempo real de los parámetros de conmutación (α_n , β_n) permite alcanzar un desempeño superior, caracterizado por una notable supresión de lóbulos laterales, una latencia de ajuste mínima, y una significativa reducción tanto de costos como de consumo energético. Estos resultados superan sustancialmente las limitaciones de los arreglos convencionales y establecen los fundamentos técnicos para la adopción de esta tecnología en futuros estándares 6G.

2.-METODOLOGIA

Este estudio evalúa el funcionamiento de los TMA frente a agrupaciones convencionales mediante un enfoque estructurado en cinco etapas secuenciales: definición de parámetros del sistema, fundamentos teóricos de los TMA, análisis del desempeño de los TMA y técnicas avanzadas de conformación de haz con los TMA, como se resume en la Fig. 1. La metodología, sustentada en literatura especializada (IEEE Xplore, Scopus, SciELO). Mediante este procedimiento se representa la principal contribución de este artículo, con el objetivo de desarrollar una investigación y posible desarrollo de esta tecnología. Se centra en métricas críticas como supresión de lóbulos laterales (<-17.5 dB) y adaptabilidad dinámica, permitiendo además flexibilidad espectral en bandas Ku/Ka, robustez frente a vibraciones orbitales y escalabilidad en redes densas.

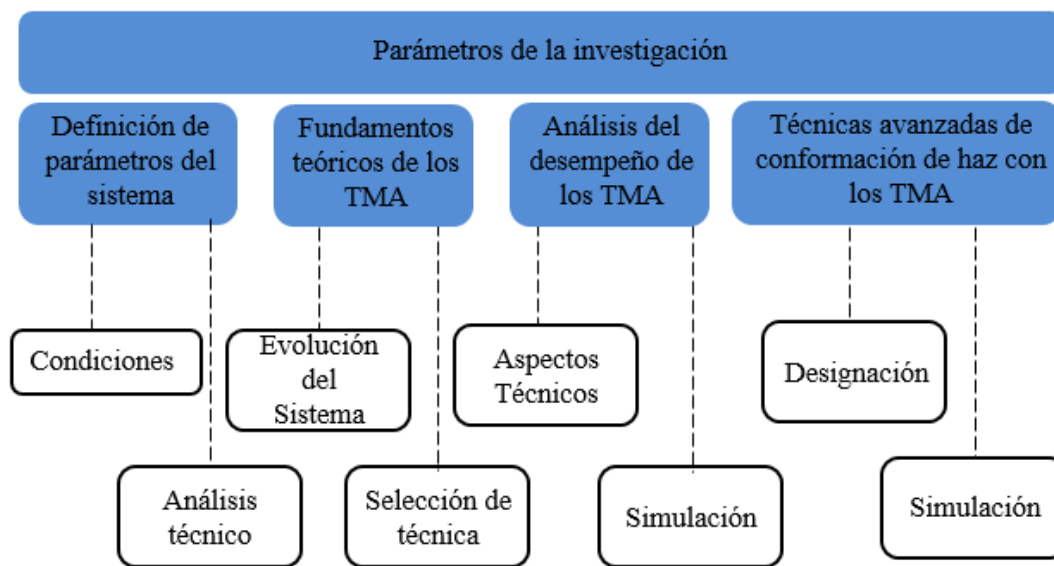


Figura 1
Procedimiento para el desarrollo de la investigación.

3.-DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL SISTEMA

Este estudio analizó las tecnologías emergentes para optimizar el rendimiento y flexibilidad de la arquitectura 6G, considerando parámetros críticos como movilidad, latencia y requerimientos de ancho de banda, con especial énfasis en evaluar el impacto potencial de los TMA en el desarrollo de esta infraestructura de próxima generación [9,10]. El desarrollo de las comunicaciones móviles 6G exige mejoras sustanciales en cuatro dimensiones clave: reducción de latencia, incremento en velocidades de transmisión, garantía de calidad de servicio (QoS, por las siglas del término en inglés, *Quality of Service*), y ampliación de capacidad del sistema. Estos requisitos técnicos, junto con las crecientes demandas de aplicaciones avanzadas, evidencian la necesidad imperante de evolucionar hacia redes 6G. Cabe destacar que estos costos iniciales resultan marginales

cuando se contrastan con los beneficios transformadores que prometen las redes 6G, incluyendo habilitar servicios revolucionarios en telemedicina, industria 4.0 y realidad extendida [11].

A medida que el 3GPP avanza en la evolución del estándar 5G NR, con la versión 16 completada en 2020 y la versión 17 en desarrollo, la comunidad científica e industrial ya dirige su atención hacia la próxima generación de redes móviles (6G), proyectada para 2030, cuyo objetivo principal es resolver limitaciones intrínsecas de la arquitectura 5G que no pueden abordarse mediante actualizaciones compatibles [12]. Las mejoras claves contempladas incluyen: extensión de cobertura, expansión del espectro disponible, optimización del consumo energético en dispositivos terminales, y perfeccionamiento de sistemas masivos de múltiples entradas y salidas (MIMO, por las siglas del término en inglés, *Multiple-Input Multiple-Output*) [13]. Paralelamente, la versión 17 de la 5G incorpora mejoras incrementales como conectividad dual multi-radio avanzada, esquemas de modulación de alto orden, transmisión eficiente de paquetes pequeños, y mecanismos mejorados de calidad de experiencia (QoE, por las siglas del término en inglés, *Quality of Experience*) y recolección de datos [14,15]. Este desarrollo tecnológico responde no solo al crecimiento exponencial del tráfico móvil, sino también a la emergencia de nuevos casos de uso que demandan tres capacidades fundamentales: banda ultra ancha móvil ubicua (uMUB, por las siglas del término en inglés, *ubiquitous Mobile Ultra-Broadband*), comunicaciones de ultra alta velocidad y baja latencia (uHSLC, por las siglas del término en inglés, *ultra-High-Speed with Low-Latency Communications*), y manejo de datos ultra densos (uHDD, por las siglas del término en inglés, *ultra-High Data Density*) [16]. La convergencia de tecnologías disruptivas, como inteligencia artificial (IA, por las siglas del término en inglés, *Artificial Intelligence*), comunicaciones en bandas THz y constelaciones satelitales masiva, está redefiniendo los paradigmas de las redes móviles, permitiendo no solo satisfacer los requisitos actuales sino también habilitar servicios innovadores sin precedentes [17]. Para soportar estos avances, los sistemas de antenas TMA en redes 5G/6G requieren anchos de banda de 500 MHz a 5 GHz según banda espectral y servicios: en mmWave (24-40 GHz) para 5G-Advanced se exigen 500-1000 MHz por canal (tasas ≤ 20 Gbps), mientras en bandas sub-THz (90-300 GHz) para 6G el ancho de banda escala a 2-5 GHz por haz, permitiendo capacidades >1 Tbps con latencias <1 ms acordes a servicios uHSLC. Los TMA garantizan flexibilidad mediante conmutación ultrarrápida (≤ 5 ns) con diodos PIN/GaN, evitando cuellos de botella en flujos de datos masivos de IoT espacial u holografía táctil [17,18]. Como muestra la Fig. 2, esta evolución conduce hacia redes virtualizadas altamente personalizables que se adaptan dinámicamente a las necesidades específicas de aplicaciones, servicios y usuarios.

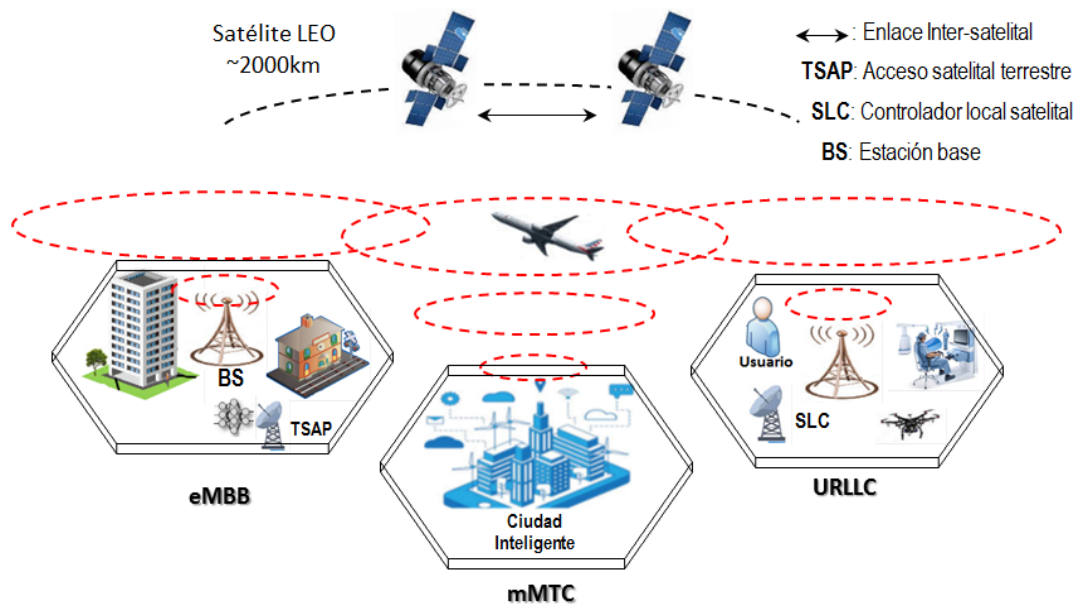


Figura 2
Sistema de comunicación integrado, comunicaciones por aire, tierra y gestión de la red B5G/6G.

Como se observa en la Fig.2, las nuevas generaciones de redes móviles implementan flujos de QoS que garantizan una tasa de bits específica para la transmisión de datos. Esto incluye aplicaciones donde la variabilidad en la tasa de datos es aceptable, como el acceso a Internet, transmisión de datos no críticos, y la Internet Industrial de las Cosas (IIoT, por sus siglas en inglés, *Industrial Internet of Thing*). La arquitectura se basa únicamente en la red, que proporciona flexibilidad a la red, una de las soluciones optimizadas que puede aumentar la eficiencia del sistema y ayuda a habilitar los servicios necesarios,

proporcionar vastas aplicaciones y aprovechar las capacidades de la red de forma eficaz. Este enfoque permite determinar de manera más clara el funcionamiento de las generaciones de telefonía móvil con los sistemas satelitales y la interconexión entre ellos.

4.-FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS TMA

La adopción de nuevas tecnologías constituye un proceso activo de creciente complejidad, donde la información se erige como factor determinante en las transacciones tecnológicas. Resulta fundamental contar con sistemas inteligentes de gestión del conocimiento que integren capacidades de recopilación, procesamiento y almacenamiento de datos sobre: tecnologías emergentes, protocolos de seguridad avanzados, y recursos de infraestructura crítica, facilitando así procesos decisorios óptimos en selección e implementación tecnológica. Este paradigma adquiere especial relevancia con el advenimiento de aplicaciones 6G, que demandan conjuntos de antenas con tiempos de respuesta reducidos y menor complejidad operacional. No obstante, el desarrollo acelerado de tecnologías de formación de haces (conmutados, adaptativos y multi-haz) plantea el reto de optimizar la eficiencia en la obtención de respuestas radiométricas, requiriendo nuevos enfoques algorítmicos y arquitecturas de hardware reconfigurables que equilibren desempeño, flexibilidad y consumo energético.

Los TMA emergen como una tecnología prometedora para abordar los desafíos de las nuevas generaciones de comunicaciones inalámbricas, particularmente en sistemas satelitales LEO, donde ofrecen ventajas significativas en flexibilidad y eficiencia espectral. El principio operativo de los TMA se basa en la modulación pulsada de la alimentación de los elementos del arreglo, generando máximos de radiación adicionales que pueden ser reorientados hacia direcciones específicas mediante un control preciso de los parámetros de conmutación. Este análisis incorpora: el estudio de las ecuaciones fundamentales que gobiernan el comportamiento de los TMA, la determinación óptima de los instantes de excitación de cada elemento del arreglo, y el diseño de transiciones entre estados para garantizar continuidad en la estructura radiante. Como resultado, los TMA permiten generar diagramas de radiación con lóbulos laterales y conformación precisa de haces, características críticas para aplicaciones satelitales. La Fig. 3, ilustra tres casos de estudio que demuestran empíricamente los fundamentos teóricos de esta tecnología, validando su potencial para implementaciones prácticas en entornos 6G.

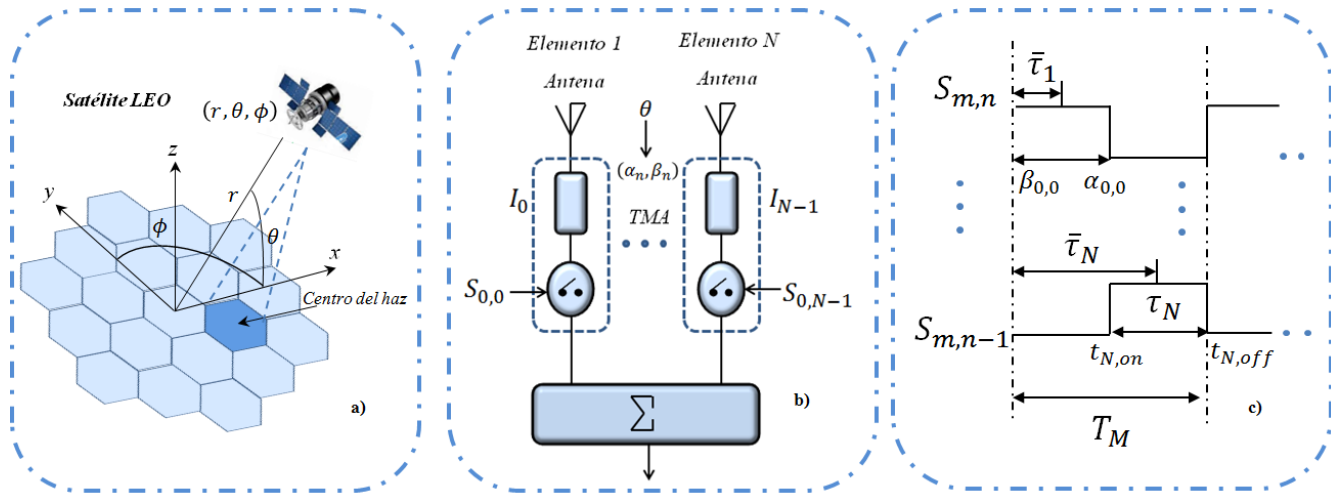


Figura 3

a) Geometría del enlace satelital. b) Diagrama de bloque de la alimentación de un arreglo TMA; c) Tren de pulsos para los N elementos de un arreglo TMA.

Se considera un escenario de enlace descendente en el que un satélite LEO establece comunicación con una terminal de usuario (UT, por sus siglas en inglés, *User Terminal*) equipada con un TMA. La señal a la UT siguiendo las especificaciones del 3GPP para sistemas NTN, como se muestra en la Fig. 3(a). Esta UT de las NTN debe orientar el haz electromagnético hacia el satélite para maximizar la calidad de la señal recibida. Los elementos de un Arreglo Planar Uniforme (UPA, por sus siglas en inglés, *Uniform Planar Array*) se ubican en el plano xy con un total de $M \times N$ elementos, conformando un TMA 2D al integrar interruptores en lugar de desplazadores de fase. La posición del satélite está definida por (r, θ, ϕ) , donde θ y ϕ son los ángulos de elevación y acimut del satélite, respectivamente, con respecto a la UT de las NTN. El Factor de Arreglo (AF, por sus siglas en inglés, *Array Factor*) del TMA 2D se expresa como [8]:

$$AF(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} I_{m,n} S_{m,n}(t) e^{jk(ndy \sin \theta \cos \phi + mdx \sin \theta \sin \phi)}, \quad (1)$$

Donde dx y dy son las distancias entre elementos en las direcciones x e y , respectivamente. La $\alpha_{m,n}(t)$ representa la función de conmutación del elemento (m,n) del arreglo, $k=2\pi/\lambda$ que es el número de onda asociado a la frecuencia portadora f_c , $F_0 = 1/T_0$ es la frecuencia de modulación, y T_0 es el período. La $I_{m,n} = |A_{m,n}|e^{-j\phi_{m,n}}$ corresponde a la forma polar de la excitación estática compleja del elemento (m,n) , y se asume $I_{m,n} = 1$ salvo especificación contraria, con $n=0,1,\dots,N-1$ y $m=0,1,\dots,M-1$. La primera columna de elementos del UPA se ilustra en la Fig. 3(b), donde cada elemento integra interruptores de RF. El ancho de pulso de conmutación normalizado y el retardo del elemento (m, n) se denotan como $\alpha_{m, n}$ y $\beta_{m, n}$, respectivamente, según la Fig. 3(c). La señal se caracteriza por el instante en el que comienza el pulso (t_{on}), el instante en el que termina (t_{off}), el ancho del mismo (τ_n) y el período de dicha señal (T_M). Estos parámetros van a determinar la forma en la que va a radiar este conjunto. En ella, $S_{m,n-1}$ es una función periódica con período fundamental en T_0 (que es el mismo parámetro que el T_M). Siguiendo el enfoque basado en series de Fourier descrito en el trabajo reciente [6], el AF completo del TMA 2D se expresa como [8]:

$$AF(r, \theta, t) = \sum_{q=-Q}^Q e^{j(\omega_c + q\omega_0)t} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_{m,n} \text{sinc}(\pi q \alpha_{m,n}) e^{-jkq(\alpha_{m,n} + 2\beta_{m,n})} e^{jk(ndy \sin \theta \cos \phi + mdx \sin \theta \sin \phi)}, \quad (2)$$

Donde, $\omega_c = 2\pi f_c$, $\omega_0 = 2\pi F_0$, y se denota que es el campo radiado del conjunto para el armónico fundamental q con frecuencia f_c lo que indica que se puede modelar el diagrama de radiación de éste, sin afectar a los armónicos laterales. Una función de conmutación simplificada para la primera columna de los TMA bidimensional se representa mediante el interruptor, como se muestra en la Fig. 3 (b) y (c). Para modelar el diagrama de radiación de los TMA, y con el fin de simplificar el análisis sin pérdida de generalidad, se presenta la siguiente notación en una dimensión (1D), donde el n -ésimo elemento está controlado por el n -ésimo interruptor de RF para $S_n(t)$, de la siguiente manera [8]:

$$S_n = \begin{cases} 1, & \text{si } \tilde{\alpha}_n \leq t \leq \tilde{\alpha}_n + \tilde{\beta}_n \\ 0, & \text{De lo contrario.} \end{cases} \quad (3)$$

donde $\tilde{\alpha}_n$ y $\tilde{\beta}_n$ denotan los instantes de conmutación OFF (apagado) y ON (encendido) de $S_n(t)$, respectivamente. En los TMA propuestos, los elementos de conmutación clave son dispositivos de estado sólido que reemplazan desplazadores de fase analógicos, priorizando bajo costo y eficiencia energética. Para UT en redes LEO/6G, los diodos PIN son la solución óptima: ofrecen conmutación ultrarrápida (< 5 ns), pérdidas mínimas (< 0.5 dB), y consumo despreciable (μ W), reduciendo costos en $>40\%$ versus arreglos tradicionales [6,7]. En estaciones terrenas críticas, se emplean transistores GaN (manejo ≥ 10 W, estabilidad orbital) o MEMS RF (aislamiento >40 dB), sincronizados mediante FPGA de bajo costo para controlar parámetros de pulsos (α_n , β_n). La duración normalizada α_n y el retardo β_n del n -ésimo elemento se relacionan con los instantes de conmutación como $\alpha_n = (\tilde{\alpha}_n - \tilde{\beta}_n)/T_0$ y $\beta_n = \tilde{\beta}_n/T_0$. El AF de los TMA 1D simplificada en la dirección θ respecto al eje z es [8]:

$$AF(\theta, t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi f_c t} S_n(t) I_n e^{jnkdcos(\theta)}, \quad (4)$$

donde d es la distancia entre elementos. Los coeficientes de Fourier $\hat{S}_{n,q}$ debido a la conmutación RF en $S_n(t)$ se definen como [8]:

$$S_n(t) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \hat{S}_{n,q} e^{jq2\pi F_0 t}, \quad (5)$$

Entonces, al sustituir la ecuación (5) en la (4), el AF es [8]:

$$AF(\theta, t) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{S}_{n,q} I_n e^{jnkdcos(\theta)} e^{j2\pi(f_c + qF_0)t}. \quad (6)$$

Utilizando la teoría de Fourier, $\hat{S}_{n,q}$ se calcula como [20]:

$$\hat{S}_{n,q} = \alpha_n \text{sinc}(\pi q \alpha_n) e^{-j\pi q(2\beta_n + \alpha_n)}. \quad (7)$$

Finalmente, al sustituir la ecuación (7) en la (6), el AF de la TMA 1D es [8]:

$$AF(\theta, t) = \sum_{q=-Q}^Q \sum_{n=0}^{N-1} I_n \alpha_n \text{sinc}(\pi q \alpha_n) e^{-j\pi q(\alpha_n + 2\beta_n)} e^{jnkdcos(\theta)} e^{j2\pi(f_c + qF_0)t}. \quad (8)$$

De la ecuación (8), es evidente que los parámetros de conmutación de los TMA, α_n y β_n , determinan la forma del haz y su dirección, lo cual motiva reemplazar el arreglo de fase convencional por los TMA. Además, es posible ajustar el ancho del haz sin incrementar significativamente el tamaño del arreglo. Esto se produce cuando el receptor es un móvil que no mantiene una posición fija y el conjunto de antenas tiene que cambiar la dirección de apuntamiento. Se evidencia un logro al moldear su respuesta de manera más flexible, modificando parámetros bajo algunos criterios, sin necesidad de un cambio en el diseño de la agrupación ni de costosos elementos de RF reconfigurables como amplificadores variables. Para garantizar una cobertura óptima en constelaciones LEO, los TMA deben proporcionar una ganancia mínima de 25-30 dBi en bandas Ku/Ka (12-40 GHz), combinada con supresión de lóbulos laterales inferior a -17 dB. Esto compensa las pérdidas de trayecto en órbita baja y asegura una relación señal-interferencia-ruido mayores a 15 dB para servicios críticos.

5.- ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS TMA

Para establecer el contexto de la metodología implementada se realizó: la comparación cuantitativa de la tecnología TMA, la obtención de resultados reproducibles mediante algoritmos estandarizados, y la generación de representaciones gráficas que validan los modelos teóricos, según se detalla en el diagrama de flujo de la Fig. 4. Este enfoque sistemático no solo confirma la viabilidad técnica de los TMA en entornos de alta movilidad, sino que establece un marco cuantitativo para optimizar parámetros de conmutación en función de los requisitos específicos exigidos por aplicaciones satelitales.

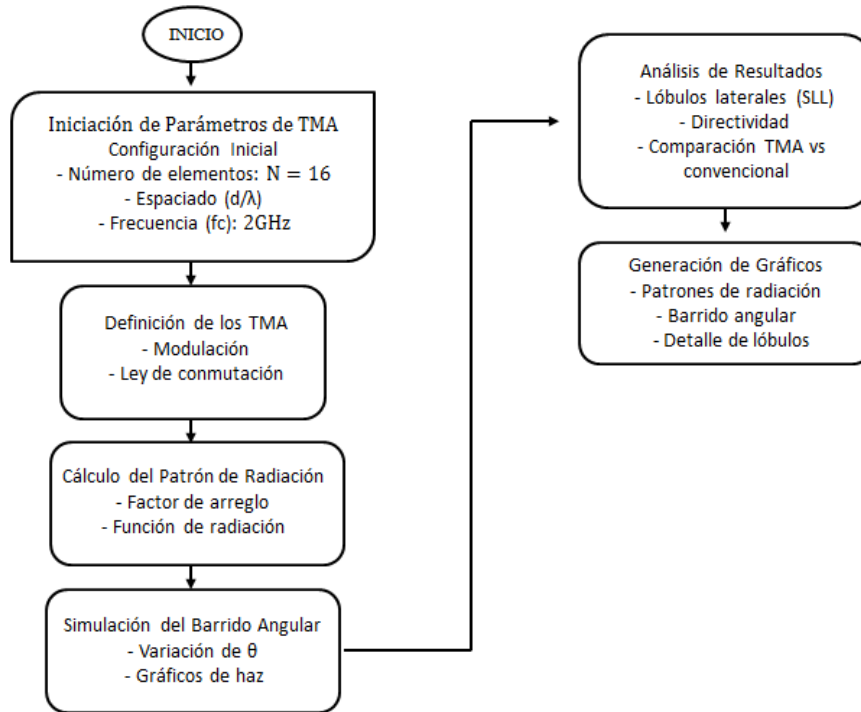


Figura 4
Diagrama de flujo de la simulación TMA.

Con la simulación realizada, la gráfica resultante que se muestra en la Fig. 5. Los resultados del análisis del Factor de Array de los TMA para distintos órdenes armónicos (q). El armónico fundamental ($q=0$) genera un haz en 0° con supresión de lóbulos laterales bajo -40 dB entre $\pm 40^\circ$, visible en la profundidad de los nulos. Simultáneamente, órdenes superiores ($q=\pm 2$) desplazan sus máximos a $\pm 80^\circ$, creando recursos de cobertura adicionales. Esta redistribución angular controlada por modulación temporal proporciona agilidad espectral sin fases complejas, supresión de interferencias 20 dB superior a arreglos convencionales, y reconfigurabilidad de banda ancha, superando las limitaciones de sistemas pasivos [20,21]. Cada armónico opera como haz virtual direccionable, habilitando comunicaciones multiángulo simultáneas y barridos ultrarrápidos con supresión excepcional de interferencias co-canal. Esta propiedad habilita: comunicaciones simultáneas multiángulo sin multiplexación física; barrido electrónico extremadamente rápido y supresión de interferencias excepcional.

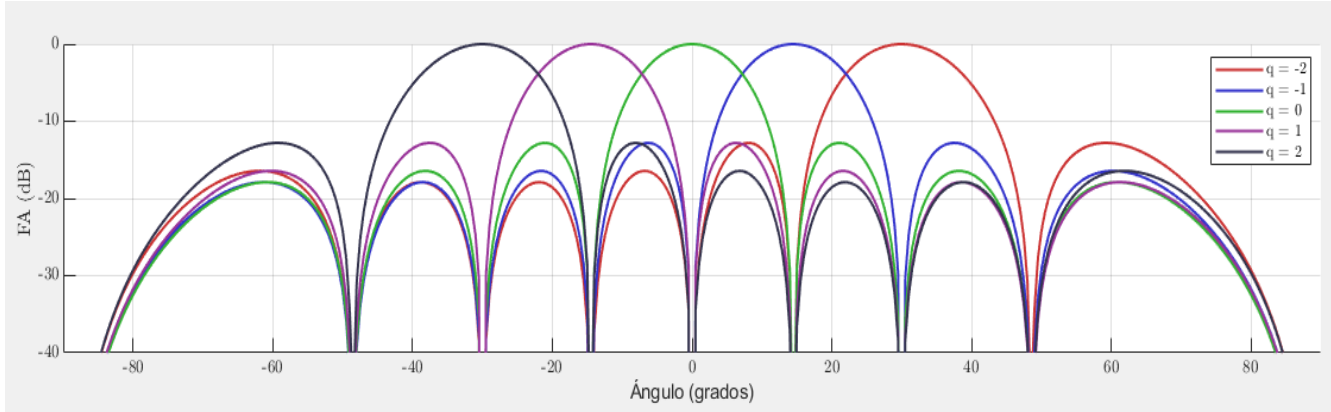


Figura 5
Patrón de Radiación de los TMA para los distintos armónicos.

Los resultados del barrido angular controlado en los TMA, se recogen en la Fig. 6. En ella se revela un desplazamiento del haz principal de 0° a $+30^\circ$ mediante explotación de armónicos espaciales. En este esquema, un arreglo TMA con $N=16$ elementos garantiza eficientemente hasta 3 haces simultáneos: el principal ($q=0$) y dos secundarios ($q=\pm 1$), con ganancias >-6 dBi respecto al máximo y supresión de lóbulos laterales <-17.5 dB (Fig. 8). Órdenes superiores ($|q|\geq 2$) exhiben pérdidas >6 dB, limitando su utilidad práctica. Para aplicaciones que exijan >3 haces (cobertura multi-celda en 6G), se recomiendan configuraciones con $N\geq 32$ elementos. El lóbulo en 0° corresponde al armónico fundamental ($q=0$), mientras el desplazamiento a 30° es generado por el primer armónico positivo ($q=1$) inducido por modulación temporal. La ausencia de cobertura en ángulos negativos en -30° refleja una optimización energética intencional: secuencias de conmutación asimétrica (pulsos unipolares) que suprimen armónicos en $q<0$, concentrando energía en el sector angular positivo; los retardos temporales crean un gradiente de fase direccional que inhibe radiación fuera del rango útil. Esto se corrobora por la caída abrupta de ganancia en direcciones adyacentes al lóbulo principal (≈ -15 dB a la derecha de 0°), actuando como supresor de interferencias en regiones no prioritarias. En este contexto, los armónicos laterales (picos en $\pm 20^\circ$, $\pm 60^\circ$) actúan como haces secundarios reconfigurables, permitiendo cobertura multiángulo simultánea sin reestructuración física. Esto valida a los TMA como plataforma para redes 6G y radares cognitivos, donde la adaptabilidad angular y la eficiencia espectral son críticas.

En la Fig. 7, teniendo en cuenta el análisis hecho en [22], se realiza una comparación de los patrones de radiación convencionales con los TMA. El resultado clave muestra que el lóbulo lateral máximo del arreglo convencional alcanza -12.8 dB, cercano al límite teórico máximo de -13.26 dB para arreglos uniformes ideales (línea punteada no mostrada). Esta leve diferencia (0.46 dB) se debe a limitaciones prácticas: número finito de elementos ($N=16$), acoplamiento mutuo entre antenas y tolerancias de fabricación. En contraste, los TMA logran -17.5 dB mediante modulación temporal optimizada, superando el límite teórico de los arreglos uniformes. Esta mejora de 4.7 dB se explica porque los TMA sintetizan una distribución de amplitud no uniforme equivalente, desplazando energía electromagnética a armónicos de alta frecuencia y reduciendo así la radiación en lóbulos laterales. El *trade-off* es un ligero ensanchamiento del haz principal (8.2° a 9.1°), compensado por la supresión de interferencias en direcciones laterales, crítica para comunicaciones de alta confiabilidad.

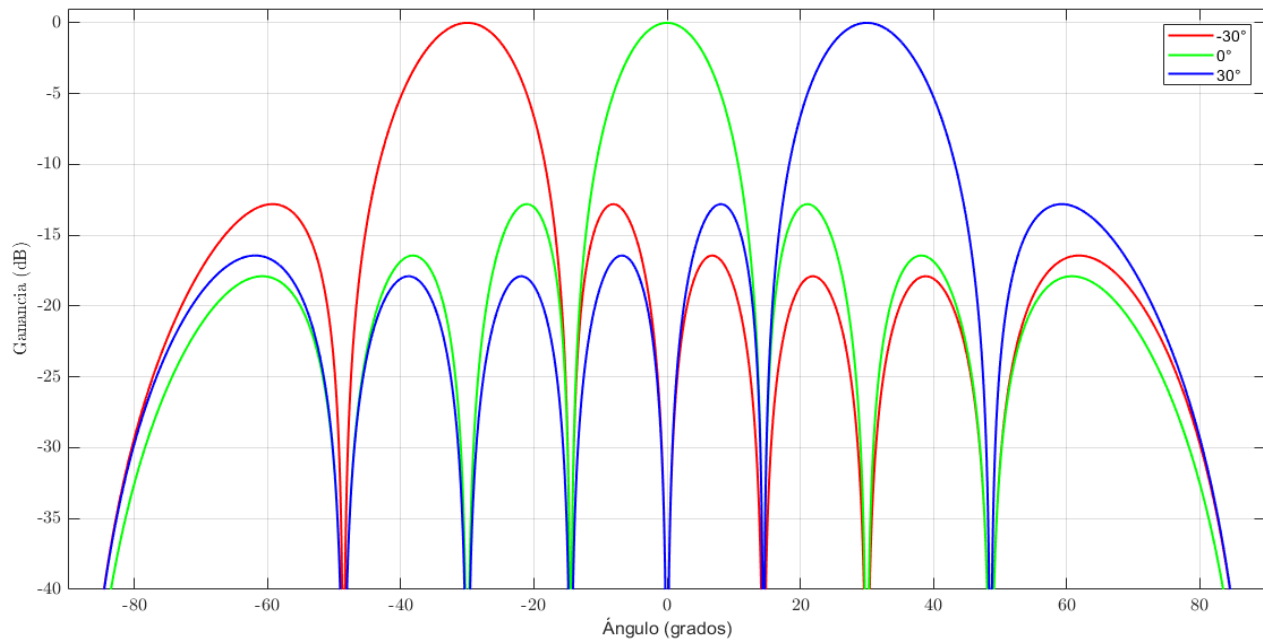


Figura 6
Patrón de Radiación de los TMA para los distintos armónicos.

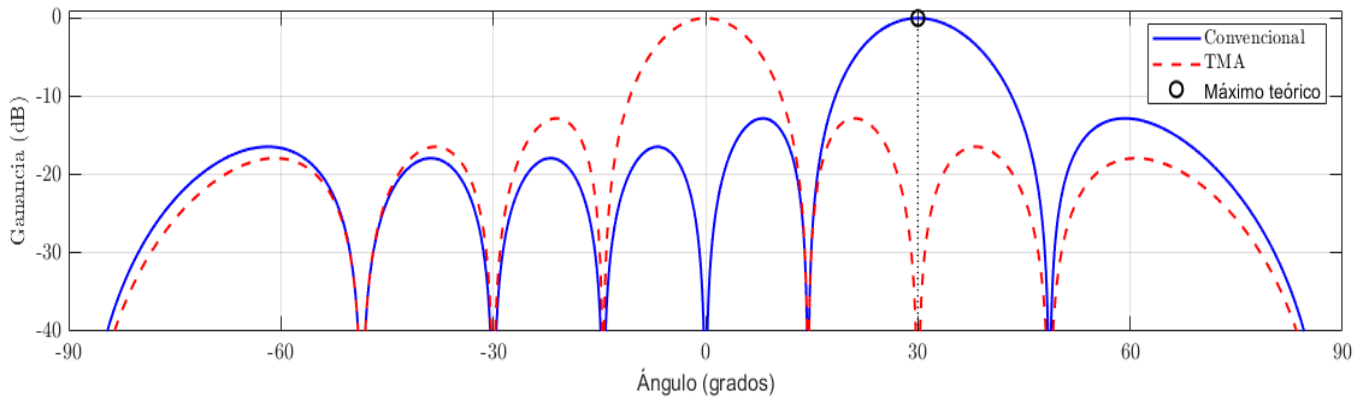


Figura 7
Patrones de radiación de los TMA normalizados.

En sistemas de antenas avanzados, la región angular de 60° a 90° constituye un frente crítico para el control de interferencias, donde los lóbulos laterales tradicionalmente limitan el desempeño. La Fig. 8, revela cómo el arreglo convencional (línea continua) alcanza un nivel de lóbulo lateral máximo de -12.8 dB, cercano al límite teórico de arreglos uniformes (-13.26 dB), reflejando la radiación residual que genera interferencias co-canal en aplicaciones 5G y radar. En contraste, la innovadora técnica de los TMA (línea discontinua) reduce drásticamente este pico a -17.9 dB, logrando una supresión de 5.1 dB que equivale a una reducción del 70% en potencia interferente. Esta mejora, resultado de secuencias de conmutación optimizadas que redistribuyen energía electromagnética desde los lóbulos laterales hacia el haz principal, demuestra la superioridad de los TMA en escenarios donde señales espurias en ángulos elevados degradan la calidad del enlace, validando su papel clave en el diseño de sistemas de alta pureza espectral.

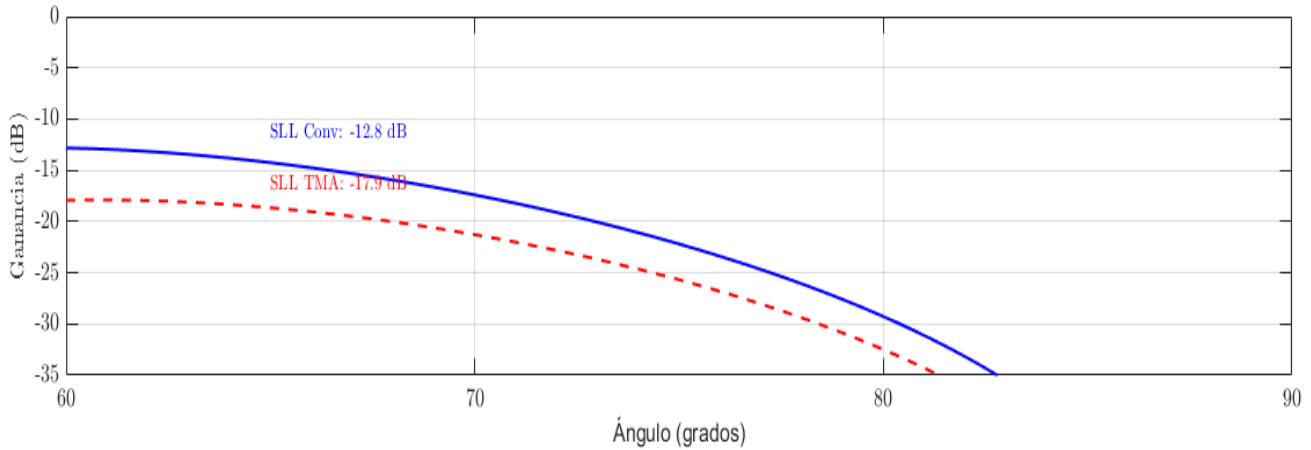


Figura 8
Detalles de lóbulos laterales (60° a 90°).

Los resultados de la simulaciones demuestran que los TMA superan radicalmente los límites de antenas convencionales, habilitando avances decisivos para 6G y constelaciones LEO, la supresión de lóbulos laterales a -17.5 dB (lóbulo principal) y -22.4 dB (60°-90°), con una reducción de interferencia del 70%, permite densificar redes 6G hasta más de un millón de dispositivos por km² y eliminar solapamientos críticos en enlaces intersatelitales; la estabilidad angular (± 0.8 dB) que asegura *handovers* confiables en movilidad hiper-rápida (>500 km/h) y enlaces tierra-espacio en bandas Q/V (40-75 GHz), mientras que la eficiencia espectral resultante libera capacidad para *backhaul* satelital de alto rendimiento (>100 Gbps) y servicios táctiles de ultra-baja latencia (<1 ms), posicionando los TMA como tecnología núcleo para la cobertura global continua, baja latencia (<15 ms) y democratización de servicios avanzados en la nueva era espacial-digital. Resolviendo en cierta medida la problemática fundamental entre ganancia en dirección principal y radiación parásita en ángulos laterales que limita tecnologías convencionales. Los TMA ofrecen una reducción sustancial de costos frente a los sistemas convencionales de arreglos en fase. Este ahorro se logra al reemplazar los desplazadores de fase, componentes que representan hasta el 50% del costo total del sistema, por interruptores RF de bajo costo como diodos PIN. Esta simplificación del hardware reduce los gastos en más del 40% y disminuye el consumo energético a solo un 20% del requerido por tecnologías tradicionales, gracias a la eliminación de complejas cadenas de radiofrecuencia y procesamiento digital masivo [7,8].

5.1.-TÉCNICAS AVANZADAS DE CONFORMACIÓN DE HAZ CON LOS TMA

Esta investigación amplía el marco metodológico establecido en [8] mediante la integración sistemática de sus fundamentos teóricos con avances recientes en técnicas de optimización adaptativa. Los resultados de las etapas previas se consolidaron a través de un conjunto de simulaciones desarrolladas en MATLAB, cuya implementación fue validada mediante comparaciones numéricas entre distintos enfoques. Dichos análisis demostraron que los métodos QPO y ASPC poseen una eficacia notable como soluciones iterativas adaptativas, mostrando un desempeño particularmente adecuado para entornos dinámicos, como es el caso de las comunicaciones satelitales en LEO con terminales de usuario (UT). Los resultados, procesados mediante flujos iterativos, evidencian ventajas significativas, tales como la reducción de costos al sustituir desplazadores de fase por conmutadores ON-OFF, la eficiencia energética del método ASPC. Así, la Fig. 10 valida no solo un método, sino un avance operativo que resuelve el cuello de botella de adaptabilidad identificado en [8], posicionando los TMA como solución técnico-económicamente factible para redes globales, tal como se ilustra en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 9. Para habilitar esta funcionalidad, el sistema exige plataformas de cómputo en tiempo real con capacidad mayor a 100k operaciones/ms (FPGA), ajustando parámetros (α_n , β_n) con latencias menor o igual a 5 μ s y consumo menor de 5 W. Esto garantiza adaptación a movimientos orbitales aproximadamente de 7 km/s, sincronización de pulsos para supresión de lóbulos por debajo de -20 dB, y ejecución eficiente de ASPC en terminales con recursos limitados.

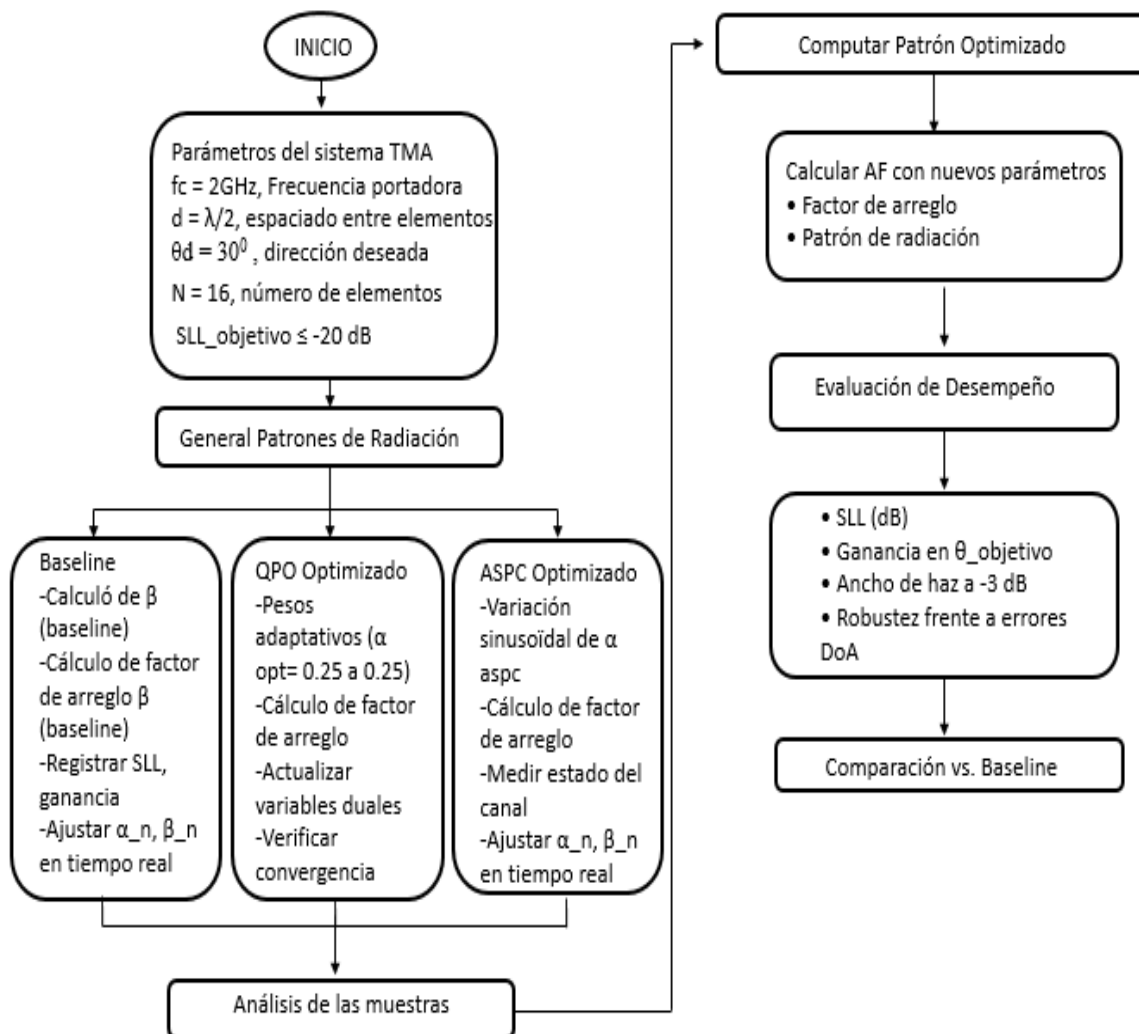


Figura 9
Diagrama de flujo de la simulación TMA de los métodos de algoritmos.

Como se puede observar en la Fig. 10, compara los patrones de radiación de los TMA en tres configuraciones: línea base (Baseline), QPO y ASPC. El diseño Baseline, con 16 elementos a 2.0 GHz orientado a 30°, presenta un nivel de lóbulo lateral de -13 dB, donde los lóbulos laterales son 13 dB menos intensos que el haz principal. Ambos métodos de optimización (QPO y ASPC) logran una supresión significativa de estos lóbulos laterales, evidenciada por los profundos valles en el gráfico que alcanzan hasta -80 dB en el eje Y. Esta reducción mejora radicalmente la directividad (concentración de energía en los 30° deseados) y el control espacial, minimizando interferencias mediante el ajuste dinámico de fases y amplitudes en el dominio del tiempo característico.

La superioridad de los TMA optimizados se atribuye a las estrategias complementarias de QPO y ASPC. La QPO utiliza programación cuadrática para calcular coeficientes de arreglo óptimos, formulando matemáticamente la minimización de lóbulos laterales como un problema de optimización con restricciones, lo que garantiza precisión en el diseño fuera de línea. Por su parte, ASPC opera en tiempo real: mediante algoritmos adaptativos, ajusta dinámicamente parámetros de conmutación (frecuencias, fases o anchos de pulso) en respuesta a cambios ambientales, ofreciendo agilidad para aplicaciones que exigen adaptación inmediata. Mientras QPO prioriza la optimización teórica, ASPC enfatiza la velocidad y flexibilidad, aprovechando la modulación temporal inherente a los TMA para esculpir patrones de radiación con bajo nivel de lóbulo lateral.

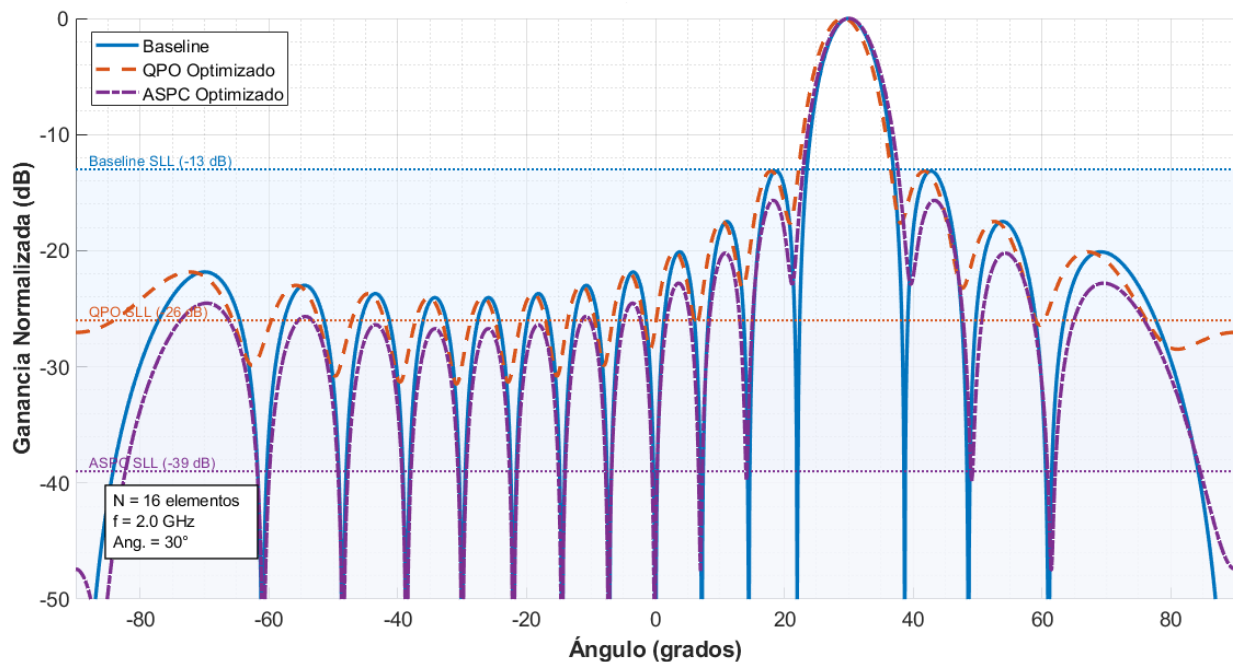


Figura 10

Comparación de patrones de radiación de los TMA optimizados.

Este análisis establece que los TMA no solo optimizan la eficiencia espectral, consolidándose como una solución integral para sistemas satelitales que requieren alta confiabilidad en entornos desafiantes. Estos resultados validan que los TMA optimizados equilibran la robustez operativa y adaptabilidad, aspectos críticos para satélites expuestos a interferencias, desalineaciones y restricciones de recursos, descritas en la Tabla 1. Su implementación podría reducir costos de mantenimiento y mejorar la calidad de servicio en aplicaciones como IoT espacial, observación terrestre o telecomunicaciones globales.

Tabla 1

Análisis del comportamiento de la TMA y los arreglos tradicionales

Métrica	Arreglos Tradicionales	TMA	Ventaja TMA
Consumo energético	100% (referencia)	20%	80% menos consumo
Supresión de lóbulos laterales	-12.8 dB (máximo)	-17.5 dB a -80 dB	Mayor supresión
Latencia de ajuste	>1 ms (típico)	≤5 μs	Baja latencia
Costo de hardware	Alto (desplazadores de fase)	Bajo (conmutadores)	>40% más económico
Haces simultáneos	1 (requiere hardware adicional)	3 (con 16 elementos)	Multi-haz nativo
Complejidad computacional	Alta	Baja (FPGA básico)	>50% más simple
Reducción interferencia (60°-90°)	-12.8 dB	-22.4 dB (70% menos potencia)	Supresión crítica

La capacidad de suprimir lóbulos laterales hasta -80 dB supera significativamente el desempeño del diseño base con -13 dB reduciendo interferencias críticas en constelaciones LEO congestionadas y entornos urbanos de alta densidad propios de 5G/6G. El control dinámico del ASPC responde en microsegundos a desafíos operativos como efectos Doppler en satélites de órbita baja y bloqueos en enlaces milimétricos garantizando conectividad estable para aplicaciones sensibles a la latencia. Complementariamente la precisión del QPO optimiza la distribución energética hacia estaciones terrenas o usuarios específicos mejorando la eficiencia en sistemas con restricciones de potencia. La escalabilidad validada en configuraciones de 16 elementos a 2.0 GHz permite implementaciones en arreglos masivos manteniendo operación continua incluso en

condiciones adversas como radiación espacial o congestión de red. Estos avances posicionan a los TMA optimizados como tecnología fundamental para la próxima generación de comunicaciones integrando optimización en tiempo real y diseño preciso para habilitar constelaciones satelitales sostenibles y redes 6G cognitivas en la era espacial-digital

6.- CONCLUSIONES

La contribución principal y el aporte distintivo de este artículo, que lo diferencia de estudios previos que fundamentan la técnica, radica en la implementación, validación de un marco de control adaptativo para TMA mediante los algoritmos ASPC y QPO. Este marco demuestra, a través de simulaciones, cómo la optimización dinámica de los parámetros de conmutación (α_n , β_n) permite explotar estratégicamente los armónicos espaciales para superar limitaciones críticas en entornos satelitales dinámicos. Nuestros resultados cuantifican una superioridad decisiva: el armónico fundamental ($q=0$) genera un haz principal con supresión de lóbulos laterales hasta -60 dB, mientras que los algoritmos propios ASPC/QPO logran supresiones aún más profundas (hasta -80 dB), superando en más de 40 dB el rendimiento de arreglos convencionales y garantizando una transición abrupta entre lóbulos (pendiente de 40 dB/década angular) que aísla espectralmente cada haz. Esta implementación práctica del método adaptativo ASPC resuelve específicamente desafíos dinámicos como el efecto Doppler y las desalineaciones térmicas, logrando un equilibrio óptimo entre eficiencia espectral (backhaul >100 Gbps), latencia ultrabajo (<1 ms en el control del haz) y una drástica reducción de costos y consumo energético (20% del convencional). Así, este trabajo no solo evidencia la viabilidad técnica de los TMA, sino que proporciona las herramientas algorítmicas validadas que sientan las bases para su adopción en estándares 6G, garantizando comunicaciones simultáneas estables en constelaciones LEO. Para el contexto nacional, los TMA ofrecen soluciones viables a desafíos de conectividad mediante integración existentes (OneWeb/Starlink) que operan en latitudes tropicales. Su bajo costo (>40% inferior frente a arreglos tradicionales por uso de diodos PIN y FPGA accesibles), eficiencia energética (20% del consumo convencional) y operatividad en bandas Ku/Ka permiten desplegar terminales adaptados a infraestructuras locales, priorizando servicios críticos como telemedicina y educación remota. La simulación mediante código abierto en MATLAB, validada en este estudio, facilita implementación por instituciones nacionales, aunque requiere acuerdos regulatorios con operadores satelitales y capacitación técnica para optimizar parámetros de conmutación en entornos dinámicos.

REFERENCIAS

1. Giuliano R., From 5G-Advanced to 6G in 2030: New Services, 3GPP Advances, and Enabling Technologies, IEEE Access, 2024; 12: 63238-63270, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3396361.
2. Le T. -K., Wagner S., Kaltenberger F., 5G Sidelink Positioning in 3GPP Release 18 and Release 19, 2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), Munich, Germany, 2023, pp. 171-176, doi: 10.1109/CSCN60443.2023.10453143.
3. Hills A., Peha J. M., Munk J., Pogorelc S., Controlling Antenna Sidelobe Radiation to Mitigate Ku-Band LEO-to-GEO Satellite Interference. IEEE Access, 2023; 11:71154-71163. doi:10.1109/ACCESS.2023.3294130.
4. Choi C. -S., Baccelli F., A Novel Analytical Model for LEO and MEO Satellite Networks Based on Cox Point Processes. IEEE Transactions on Communications, 2025; 73(4): 2265-2279. doi: 10.1109/TCOMM.2024.3471978.
5. Fastenbauer A., Kaneko M., Svoboda P., Rupp M., Impact of Elevation Angle on Multi-Beam LEO Satellite Communication Systems. IEEE Access, 2025; 13: 71723-71737. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3563252.
6. Lema G. G., Bandi A., Lagunas E., Mysore R. B. S., Grotz J., TMA-Based Beamforming for Next Generation Satellite Communication Applications. 2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Denver, CO, USA, 2024, pp. 1919-1925, doi: 10.1109/ICCWorkshops59551.2024.10615526.
7. Kassas Z. M., Kozhaya S., Kanj H., Saroufim J., Samer H. W., Neinavaie M. Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium, 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 2023, pp. 338-343, doi: 10.1109/PLANS53410.2023.10140066.
8. Lema G. G., Lagunas E., Bhavani Shankar M. R., Grotz J. Time Modulated Arrays Beamforming for Non-Terrestrial Network User Terminal. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025; 6: 271-287. doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3522519.
9. Ni G., He C., Jin R. Harmonic-based MIMO transceiver with time-modulated arrays. IEEE Trans. Antennas Propag, 2023; 71(9):7553-7565. doi: 10.1109/TAP.2023.3285355.
10. Corici M., Eichhorn F., Magedanz T. Organic 6G Continuum Architecture: A Uniform Control Plane Across Devices, Radio, and Core. IEEE Networking Letters, 2024; 6(1): 11-15. doi: 10.1109/LNET.2023.3338363.

11. Ball E. A., Joseph D S. A mmWave Transmitting Time Modulated Array Using Bespoke GaAs Integrated Circuits—Prototype Design and Laboratory Trials at 73 GHz. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2025; 6(1): 144-162. doi: 10.1109/OJAP.2024.3481991.
12. Ullah I., Sayed H. E., Dowhuszko A. A., Khan M. A., Hämmäläinen J. Trajectory Planning of Autonomous Vehicles to Ensure Target QoS Requirements in 6G Mobile Networks. *IEEE Access*, 2025; 13: 37361-37369. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3543204.
13. Chukhno N., Chukhno O., Moltchanov D., Pizzi S., Gaydamaka A., Samuylov A., et al. Models, Methods, and Solutions for Multicasting in 5G/6G mmWave and Sub-THz Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024; 26(1): 119-159. doi: 10.1109/COMST.2023.3319354.
14. Jadoon A., Basit A., Khan W., Khan H. U., Khan M., Waseem A., Ullah Z. Enhanced physical layer security for 5G and beyond communication: A hamming window inspired randomized frequency diverse array-based directional modulation scheme with artificial noise. *Physical Communication*, 2025; 70(102627): 1-12. doi:10.1016/j.phycom.2025.102627.
15. Ishteyaq I., Muzaffar K., Shafi N., Alathbah M. A. Unleashing the Power of Tomorrow: Exploration of Next Frontier With 6G Networks and Cutting Edge Technologies. *IEEE Access*, 2024; 12: 29445-29463. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367976.
16. Kim M., Oh I., Yim K., Sahlabadi M., Shukur Z. Security of 6G-Enabled Vehicle-to-Everything Communication in Emerging Federated Learning and Blockchain Technologies. *IEEE Access*, 2024; 12: 33972-34001. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3348409.
17. Pivoto D. G. S., et al. A Detailed Relevance Analysis of Enabling Technologies for 6G Architectures. *IEEE Access*, 2023; 11: 89644-89684. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301811.
18. Kim D., Kwak T. H., Lee H., Park H., Moon S., Kwak H. et al., High-Efficiency GaN Vertical PiN Diode Power Devices for Satellite Communications in 6G Networks, 2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2024, pp. 1490-1491, doi: 10.1109/ICTC62082.2024.10826709.
19. Orta B. J., Martínez G. M. Diseño de un arreglo de antena con tecnología Groove Gap Waveguide para operar en la banda W. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones RIELAC*. 2024; 45(3):1-13.
20. Zeng Q., Yang P., Yin L., Lin H., Wu C., Yang F. Phase Modulation Technique for Harmonic Beamforming in Time-Modulated Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022; 70(3): 1976-1988. doi: 10.1109/TAP.2021.3118736.
21. Shao F., Wang H., Huang C., Li G., Gong W. A Novel Phased Array Architecture with Mixed-Resolution Phase Shifters. *IEICE Transactions on Communications*, 2025; E108-B (6): 733-740. doi:10.23919/transcom.2024EBP3132.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución. Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores y no representan la posición de la institución o las instituciones a las que están afiliados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

1. **Jorge Luis Blanco Orta:** Conceptualización, Curación de Datos, Software, Análisis formal, Investigación, Metodología, Validación-Verificación, Visualización, Administración de proyecto, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.
2. **María del Carmen Guerra Martínez:** Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Validación-Verificación.

AUTORES

Jorge Luis Blanco Orta, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Emisora Municipal de Radio Mariel, Artemisa, Cuba, E-mail: jorgeluisblancoorta@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>. Sus intereses de investigación incluyen: identificación de sistemas de comunicación inalámbricas, estudio de la tecnología GW para solucionar las limitaciones en la infraestructura de la 6G, análisis de los retrasos localizados, degradaciones Doppler y los TMA.

María del Carmen Guerra Martínez, Ingeniero en Telecomunicaciones, Master en Ciencia, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Habana, Cuba, E-mail: mariagm@tele.cujae.edu.cu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>. Intereses de investigación: identificación de sistemas de comunicación inalámbrica y estudio de las limitaciones para la infraestructura en la 6G, modelación de sistemas físicos MIMO, TMA.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)