

# Implementación de un sistema de antenas inteligentes con haz conmutado

## Implementation of a switched beam antenna system

Ing. Alexander Rogelio Ramírez Zaldívar<sup>1\*</sup>, Ing. Yunior Ibarra Guerra<sup>2</sup>, Dr.C.T. Noslen Rojas Ramírez<sup>3</sup>

---

Recibido:03/2025 Aceptado: 06/2025 Publicado: 08/2025

### Resumen

Las últimas décadas han sido marcadas por un incremento en el número de usuarios que emplean los diferentes servicios de comunicaciones desarrollados. Esto ha hecho necesario evolucionar las tecnologías utilizadas para asegurar una mejor satisfacción de las demandas actuales. El presente trabajo muestra la propuesta para el desarrollo de un arreglo de antenas inteligentes con conmutación del haz para su empleo en un sistema de comunicaciones. Utiliza como plataforma de implementación tarjetas de radiofrecuencia HSMC ARRadio acopladas a la placa de desarrollo TR4. El diseño propuesto permite el control dinámico de la dirección principal de siete patrones de radiación sintetizados digitalmente, garantizando la cobertura espacial de un sector angular de  $100^\circ$ . Con la realización del proyecto se abre una línea de trabajo aplicable en diferentes sistemas, capaz de

<sup>1\*</sup> Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica "CID MECATRONICS", Cuba, cid3@reduim.cu

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica "CID MECATRONICS", Cuba, cid3@reduim.cu

<sup>3</sup> Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica "CID MECATRONICS", Cuba, cid3@reduim.cu

adaptarse con facilidad a geometrías de antenas complejas y con la posibilidad de incorporar algoritmos adaptivos para incrementar el rendimiento del formador digital de cada haz.

**Palabras clave:** Formador digital del haz, antenas inteligentes, haz conmutado

## Abstract

*The last few decades have witnessed a significant increase in users applying the diverse communication services. This necessitates evolving existing technologies to better meet current demands. This work proposes the development of an intelligent switched-beam antenna array to be used in a communication system. The HSMC ARRadio RF cards coupled to the TR4 development board are used as an implementation platform. The proposed design enables dynamic control of the main direction for seven digitally synthesized radiation patterns, ensuring spatial coverage across a  $100^\circ$  angular sector. Completing this project establishes a versatile framework applicable to diverse systems, adaptable easily to complex antenna geometries, and capable of incorporating adaptive algorithms to enhance digital beamformer performance for each beam.*

**Keywords:** Digital beamforming, smart antenna, switched beam

## Introducción

La posibilidad de controlar el patrón de radiación de una antena permite elevar el rendimiento de sistemas de radiocomunicaciones en los cuales la ubicación de los usuarios o las condiciones espectrales de trabajo varían con el tiempo. Las antenas inteligentes constituyen el elemento clave para dar solución a la problemática anterior. En estas, la combinación de un arreglo de unidades de radiación con bloques de procesamiento digital de señales, garantiza la formación dinámica del haz en función de las necesidades de trabajo reales (Ong, 2015).

En sus inicios, la utilización de antenas inteligentes se limitaba a aplicaciones de radar, sonar y comunicaciones militares. Sin embargo, el desarrollo alcanzado por los dispositivos de procesamiento

digital de señales ha posibilitado su incorporación en el mundo de las telecomunicaciones modernas (Zhai, 2017). Son la base de los enlaces satelitales con técnicas de acceso múltiple por división de espacio (SDMA, del inglés *Space Division Multiple Access*) e incorporadas en los estándares de telecomunicaciones IEEE802.11ac y LTE (del inglés *Long Term Evolution*) (Chen&Haas, 2015).

Los sistemas con haz conmutado constituyen una variante de implementación de antenas inteligentes. En estos son formados múltiples haces directivos fijos. En cada dirección se activa el sistema de recepción para identificar la presencia de señales. Al detectar una fuente de información útil es almacenada la identificación y ubicación del usuario para establecer la comunicación a través del diagrama de radiación predefinido que apunte en su dirección. Cuando la fuente se traslada se realiza la conmutación de los diagramas para mantener el enlace con la máxima ganancia de antenas posible (Sharma, Sarkar, Maity, & Bhattacharya, 2014).

Varios autores han tratado el desarrollo y empleo de esta tecnología. Rosa expone la implementación de una Red de Área Local con conmutación electrónica de ocho antenas dispuestas en una geometría cilíndrica (Rosa, Supriyanto, Rahman, Rahim, & Moradikordalivand, 2014). Almorabeti propone un diseño basado en la matriz de Butler para formar cuatro diagramas ortogonales, realiza su implementación sobre microcinta e incorpora un conmutador con diodos PIN (Almorabeti, Rifi, Terchoune, & Tizyi, 2018). Ahmed y Tiang analizan la utilización de conmutación de haces en sistemas de comunicaciones V2V (del inglés *Vehicle-to-Vehicle*) (Ahmed, Tiang, Mahmud, Gwo-Chin, & Do, 2023; Settawit Poochaya, 2016).

El presente trabajo muestra la implementación de un arreglo de antenas con formación digital de múltiples diagramas de radiación para un sistema con haz conmutado. Se basa en el empleo de tarjetas transceptoras HSMC ARRadio acopladas a la placa de desarrollo TR4. El objetivo principal es exponer una arquitectura de diseño aplicable a esta variante de sistema inteligente, capaz de adaptarse a geometrías de antenas complejas e incorporar algoritmos adaptativos para incrementar



el rendimiento del formador digital de cada haz. El desarrollo no incluye el algoritmo de búsqueda e identificación de señales, pero brinda la plataforma que garantiza la formación y conmutación de múltiples haces durante la recepción. El principal aporte del trabajo es la exposición de una variante de diseño para el desarrollo de antenas inteligentes en sistemas de telecomunicaciones.

## **Materiales y métodos**

Para la implementación del sistema de antena inteligente con conmutación de haz se empleó una arquitectura hardware compuesta por una placa de desarrollo TR4 con FPGA Stratix IV EP4SGX230C2 como núcleo de procesamiento principal y cuatro tarjetas hijas HSMC ARRadio equipadas con transceptores AD9361 de Analog Devices, proporcionando un total de ocho canales de recepción independientes. El arreglo de antenas consistió en ocho dipolos de media onda dispuestos en configuración lineal uniforme con una separación entre elementos de  $0.6\lambda$  a la frecuencia de operación de 2.412 GHz. La metodología experimental se estructuró en tres fases secuenciales: configuración hardware, programación del procesamiento de señales y validación metrológica. Inicialmente se configuraron los parámetros operativos de los RFICs AD9361 mediante un softcore NIOS II embebido en el FPGA, gestionando mediante interfaz SPI la frecuencia central, ancho de banda, ganancia y tasa de muestreo. El procesamiento digital de señales implementado en el FPGA incluyó la adquisición y demultiplexación de datos I/Q, seguido de un algoritmo de calibración en dominio de frecuencia basado en Transformada de Fourier Discreta para compensar desviaciones de amplitud y fase, y la síntesis de siete haces direccionales mediante la aplicación de pesos complejos precalculados. La validación experimental se realizó en cámara anecoica, utilizando una señal sinusoidal de referencia a 2.4121 GHz para caracterizar el rendimiento del sistema. Los patrones de radiación se midieron mediante barrido angular con posicionador rotatorio y los datos obtenidos se exportaron a MATLAB para análisis comparativo con las simulaciones teóricas, evaluando específicamente el nivel de lóbulos laterales y la precisión en el ángulo de radiación.

## Formación digital del haz

En una antena convencional la contribución del campo electromagnético para diferentes direcciones en la zona lejana se encuentra determinada por la ley de distribución de corriente en su superficie del radiador. Por tanto, su característica direccional es condicionada por la geometría de la antena y el punto de alimentación (Stincer, 2001).

Un arreglo de antenas incluye unidades de radiación alimentadas de forma independiente. Al modificar la amplitud y fase de las señales en su entrada se establece una distribución de corriente equivalente por lo que se puede obtener la característica direccional deseada. Dicho proceso es conocido como formación del diagrama de radiación (Rodríguez, García, & Miller, 2017).

Un salto crucial para el desarrollo de los sistemas inteligentes es el empleo de formadores digitales del haz. En estos las señales adquiridas por los elementos son digitalizadas y enviadas a un procesador de señales. En su interior, se aplica a cada canal un factor de peso complejo para garantizar la síntesis del diagrama. Trabajar en el dominio digital brinda la posibilidad de conformar múltiples haces con características diferentes y dinámicas sin necesidad de modificar la estructura física del arreglo de antenas; cuestión aprovechada por los sistemas con haz conmutado (Bailleul, 2016).

## Plataforma de recepción y procesamiento

El elemento inicial para la formación digital del haz es la adquisición y digitalización de las señales a la entrada de cada elemento. Para ello, Peter Delos propone el empleo de un Circuito Integrado de Radiofrecuencia (RFIC, por sus siglas en inglés) (Delos, 2017). En el trabajo (Delos, Frick, & Jones, 2020), se muestra un prototipo desarrollado sobre la base del transceptor de cuatro canales AD9061. Operar directamente con los RFIC disponibles requiere de una tecnología de montaje avanzada capaz de soportar diseños complejos. El integrado AD9361, por ejemplo, necesita la conexión de 144 pines en un área de 102 mm<sup>2</sup> (HSMC ARRADIO Daughter Car).

Una respuesta es el empleo de placas de evaluación que incluyen RFIC y los elementos de hardware necesarios para su funcionamiento.

En el presente trabajo se utiliza la tarjeta HSMC ARRadio. Esta puede ser acoplada a un dispositivo de manejo externo a través de la interfaz de alta velocidad HSMC (del inglés *High Speed Mezzanine Card*) y contiene como elemento base al RFIC de dos canales transceptores AD9361.

Las etapas de procesamiento en los formadores digitales se caracterizan por presentar una arquitectura híbrida (Yu, 2017). Predominan los DSP y FPGA (del inglés *Digital Signal Processor* y *Field Programmable Gate Array* respectivamente) para la realización de la formación digital del haz. La selección de uno u otro se encuentra condicionada por la aplicación específica a desarrollar, aunque la mayor parte de las bibliografías sobre el tema coinciden en el empleo de FPGA (Dikmese, Kucuk, Sahin, & Tangel, 2010).

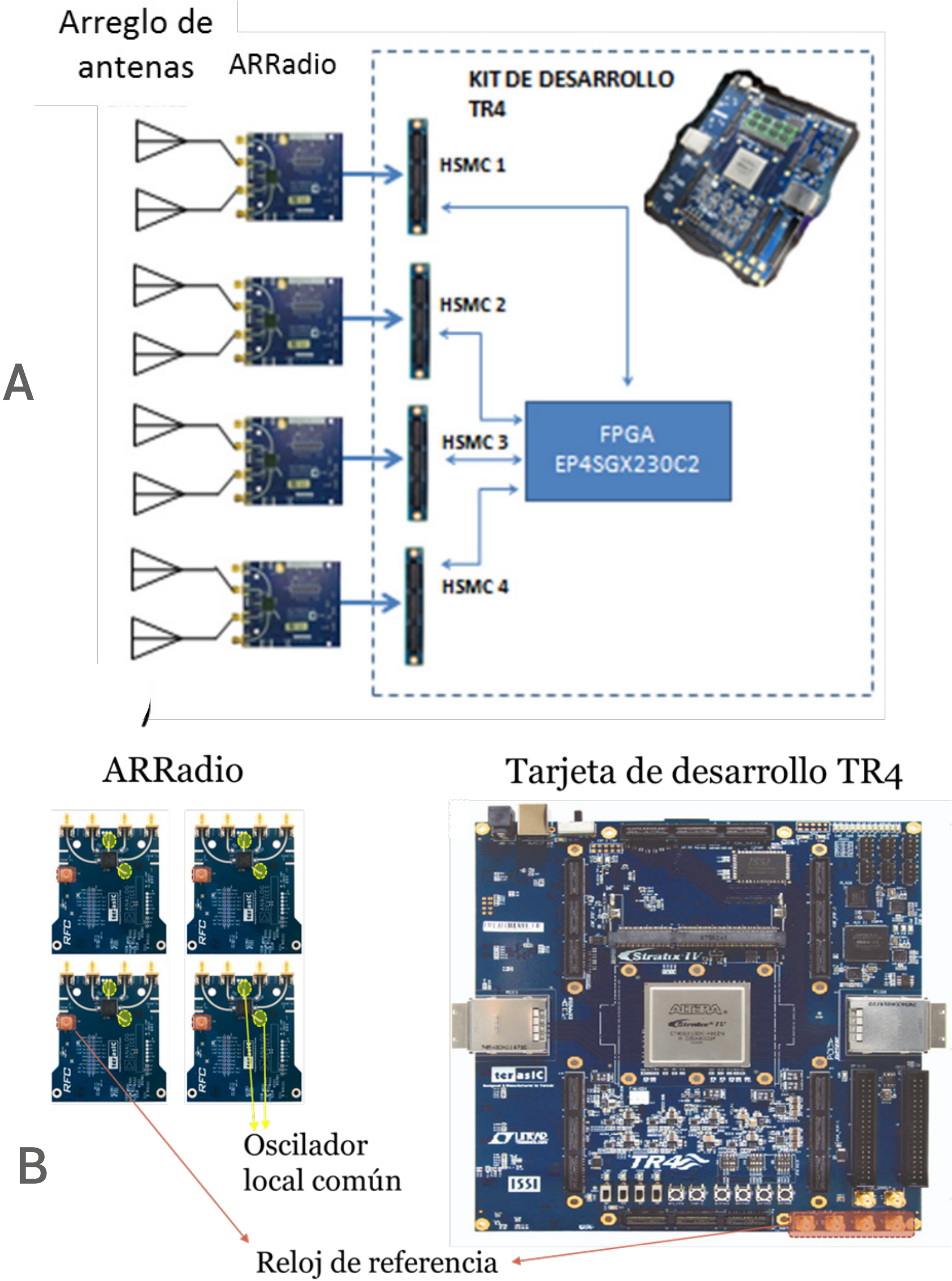
El RFIC AD9361 presenta dos buses de datos de 12 bits, a través de los cuales circulan entrelazadas las señales de transmisión y recepción (en banda base) de dos transceptores; un bus de control, para el manejo de la comunicación y una interfaz SPI (del inglés *Serial Peripheral Interface*) para la configuración de los parámetros de operación del sistema (Frecuencia, ancho de banda, tasa de muestreo, etc.). El ARRadio garantiza el acceso a todas las señales mencionadas a través del conector HSMC. El dispositivo empleado para el procesamiento digital de los datos debe garantizar la conexión con dicha interfaz.

La necesidad del empleo de múltiples tarjetas de adquisición, así como las cuestiones asociadas al control de estas conducen a la selección de la Placa de Desarrollo TR4. Esta presenta un total de 6 conectores HSMC para la conexión de tarjetas transceptoras y su núcleo de procesamiento es el FPGA EP4SGX230C2 de la familia Stratix IV.

## Arquitectura del sistema

A partir de la plataforma de recepción y procesamiento seleccionada, se propone el esquema de conexión de la figura 1 para el sistema de antenas con haz conmutado. Incluye cuatro tarjetas HSMC ARRadio conectadas a la placa de desarrollo TR4. Con estas, es posible procesar las señales de ocho antenas para la formación digital de los múltiples diagramas de radiación.





**Figura 1.** Esquema del arreglo de antenas inteligente. a) Conexión entre los transceptores y el sistema de procesamiento. b) Conexión de las señales para la coherencia multicanal

La imagen de la izquierda muestra la vía de comunicación entre los transceptores integrados y la tarjeta de desarrollo TR4. A través de las líneas de alta velocidad HSMC se enlazan los AD9361 con el FPGA donde tiene lugar el grueso del procesamiento. En la derecha se incluyen los puntos para conexión de un oscilador local para garantizar la coherencia en radiofrecuencia de las señales de cada canal y el modo de distribución del reloj para asegurar el sincronismo en banda base.

El FPGA cumple con tres funciones esenciales para el sistema: efectúa la configuración de las tarjetas transceptoras, garantiza la correcta recepción y calibración de las señales procedentes de los AD9361 y realiza la síntesis digital de los siete patrones de radiación formados digitalmente. El esquema funcional que muestra sus elementos fundamentales se representa en la figura 2.

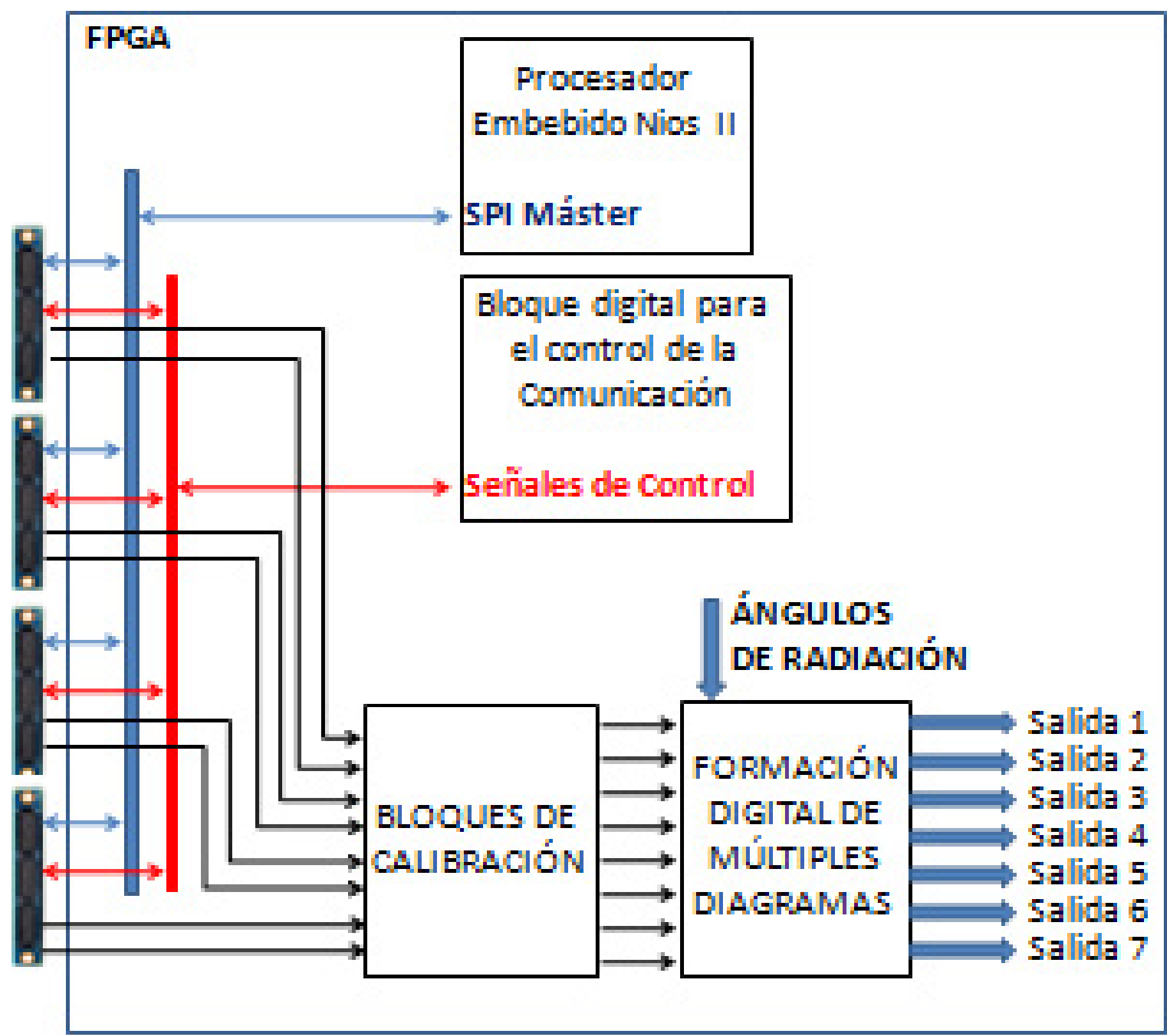


Figura 2. Esquema funcional del diseño en FPGA

Para la inicialización de los parámetros de funcionamiento de los AD9361, se emplea el Softcore desarrollado por la empresa Altera NIOS II, embebido en el FPGA. A través de la interfaz de comunicación SPI envía la secuencia de configuración que incluye:

- Habilitación de los dos canales receptores.
- Configuración del ancho de banda del receptor en radiofrecuencia.
- Configuración de la frecuencia central de trabajo.
- Configuración de las tasas de muestreo de las señales.
- Programación del filtro digital interno.



- Configuración de la ganancia manual.
- Calibración interna del *offset* de recepción y el balance de los canales en fase y cuadratura.

La lógica para el control de la comunicación se elabora a partir del protocolo de comunicación establecido por el fabricante del AD9361. Tomando como base el reloj de muestreo de los datos definidos durante la inicialización efectúa la recuperación de los datos de cada canal los cuales se encuentran entrelazados con la secuencia I1, Q1, I2, Q2, donde I y Q representan las componentes en fase y cuadratura de las señales, y la numeración indica el canal transceptor.

El primer bloque de procesamiento por el que circulan las señales adquiridas es el de calibración. Este comienza su funcionamiento durante la inicialización del sistema, donde emplea una señal de referencia generada por uno de los transmisores, y distribuida a todos los canales de recepción, para obtener las diferencias de amplitud y fase entre canales. Para ello emplea un algoritmo basado en la transformada de Fourier. Una vez determinadas las diferencias se elaboran los coeficientes de corrección, que son aplicados continuamente durante el funcionamiento del sistema.

Las señales calibradas son enviadas al bloque para la formación digital de los diagramas direccionales. Se encuentra formado por un total de siete subsistemas similares encargados de la síntesis de cada haz. Las direcciones de radiación deseadas son aplicadas a cada subsistema según corresponda. El cálculo de los pesos para la formación de cada haz, se realiza mediante un algoritmo convencional basado únicamente en la dirección de radiación introducida (S. Venkata Rama Rao, 2019).

Como circuito de conmutación se propone el esquema simple mostrado en la figura 3. En este, se configura un diagrama direccional fijo en los canales sintetizados con el fin de efectuar la lectura secuencial de las salidas de cada uno. Esta configuración es útil cuando las unidades de procesamiento de datos que siguen al arreglo de antenas no son capaces de manejar un número elevado de información. La plataforma desarrollada, permite implementar arquitecturas de

procesamiento complejas como son los sistemas adaptativos u otras donde cada haz opere de forma aislada conmutando secuencialmente.

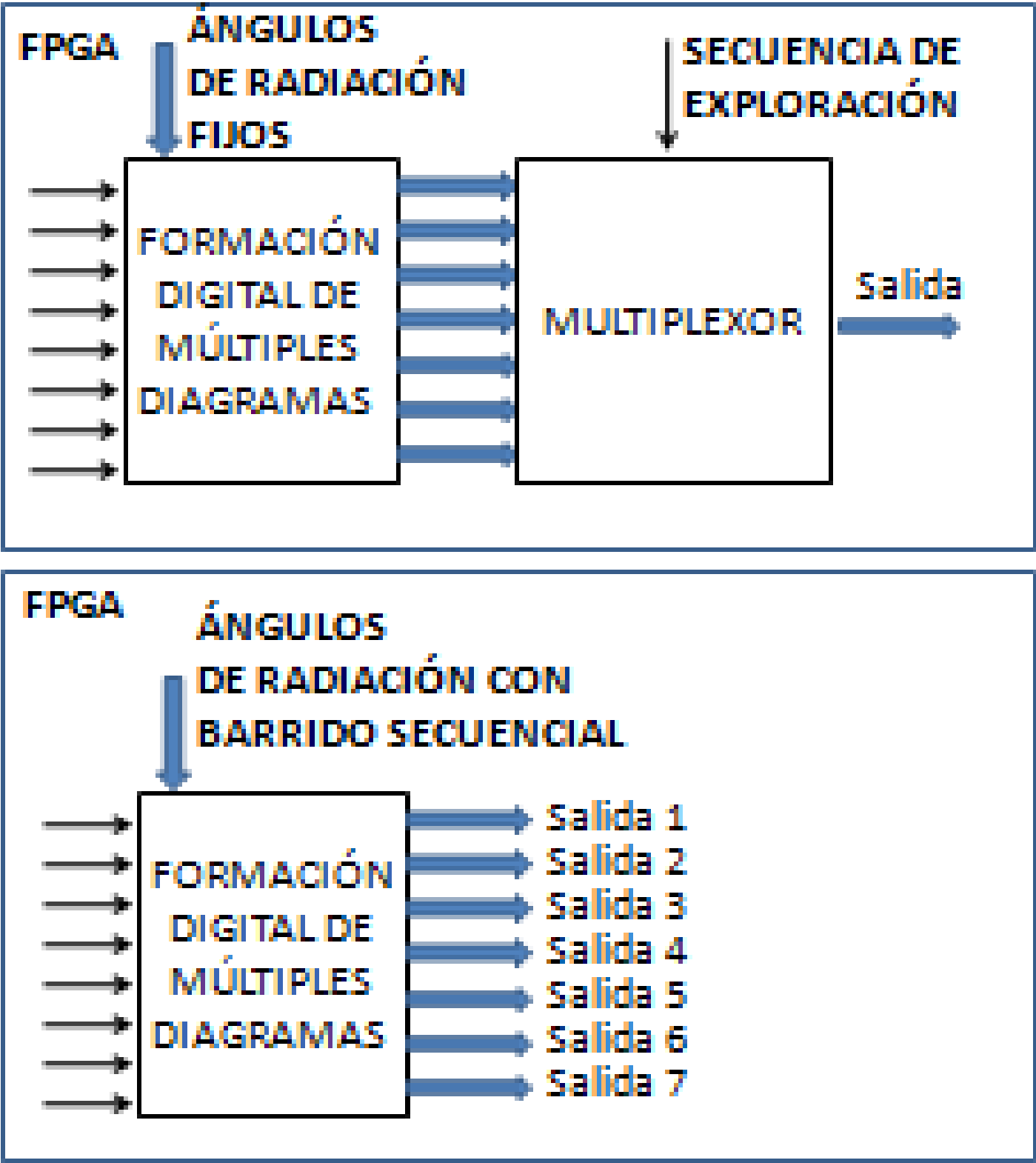
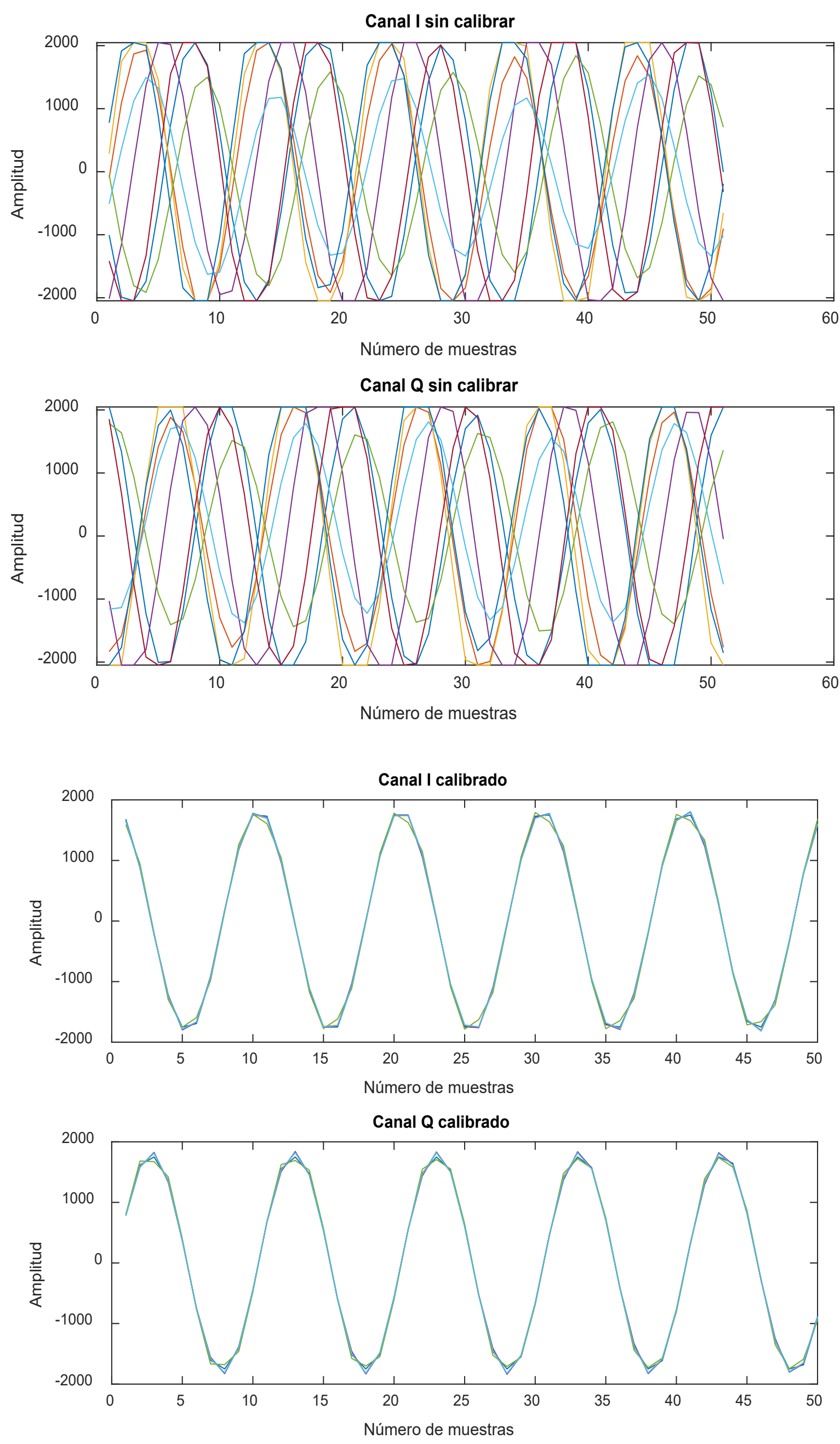


Figura 3. Sistema de conmutación del haz

### Resultados y discusión

La tecnología propuesta en el presente trabajo para el desarrollo de antenas inteligentes con conmutación del haz fue validada con el objetivo de verificar las posibilidades reales de empleo. Para ello fue empleado un sistema de verificación compuesto por ocho líneas de recepción con antenas separadas a 0.6 veces la longitud de onda de trabajo. Las pruebas fueron realizadas en la frecuencia de 2.412 GHz correspondiente al primer canal de acceso wifi.

La calibración constituye un elemento clave para la correcta formación del diagrama direccional, por lo que fue el primer elemento comprobado. La figura 4 muestra los componentes en fase y cuadratura de las señales recibidas por los receptores antes y después de realizar este proceso.



**Figura 4.** Señales recibidas antes y después de la calibración

Se aprecia la alineación de la fase de las señales y la compensación de la diferencia de amplitud entre los canales. Como referencia se utilizó una señal sinusoidal desplazada 0.1 MHz con respecto al centro de la frecuencia de trabajo.



Para valorar el comportamiento de la calibración entre canales con el tiempo se efectuaron 40 capturas de las señales de salida, distribuidas en grupos de 10 realizaciones, separados entre sí por una hora. De esta forma, se obtuvo información durante las tres primeras horas de trabajo del sistema tras la calibración (el primer grupo de datos pertenece al momento en que se realizó la aplicación de los pesos). Estos datos fueron procesados en la herramienta computacional Matlab y se presentan en a tabla 1 los resultados obtenidos.

Tiempo (minutos)	Desviación estándar del error absoluto de fase (°)	Desviación estándar del error de amplitud relativo (%)
0	0.0351	0.0621
60	0.1473	0.2828
120	0.6828	0.3594
180	0.7538	0.3971

**Tabla 1.** Comportamiento de los errores de amplitud y fase entre los canales tras la calibración

Los valores mostrados en la tabla indican la tendencia a incrementar las desviaciones tras la calibración. Esto es resultado de las variaciones con la temperatura de los elementos del sistema transceptor. A pesar de ello, tanto los errores de amplitud como los de fase toman valores pequeños, incluso en el peor de los casos. Por tanto, es posible garantizar la formación del diagrama de radiación sin introducir errores significativos en los patrones sintetizados (Mailloux, 2018).

Seguidamente, se verificó la formación de la característica direccional para lo cual se empleó el esquema de medición mostrado en la figura 5. La comprobación fue realizada en una cámara anecoica donde se emularon las condiciones de espacio libre. Las señales resultantes de cada haz fueron enviadas a través de una interfaz de comunicación serie hacia una PC donde un programa desarrollado para la verificación del sistema se encarga de graficar la forma del diagrama direccional sintetizado digitalmente.

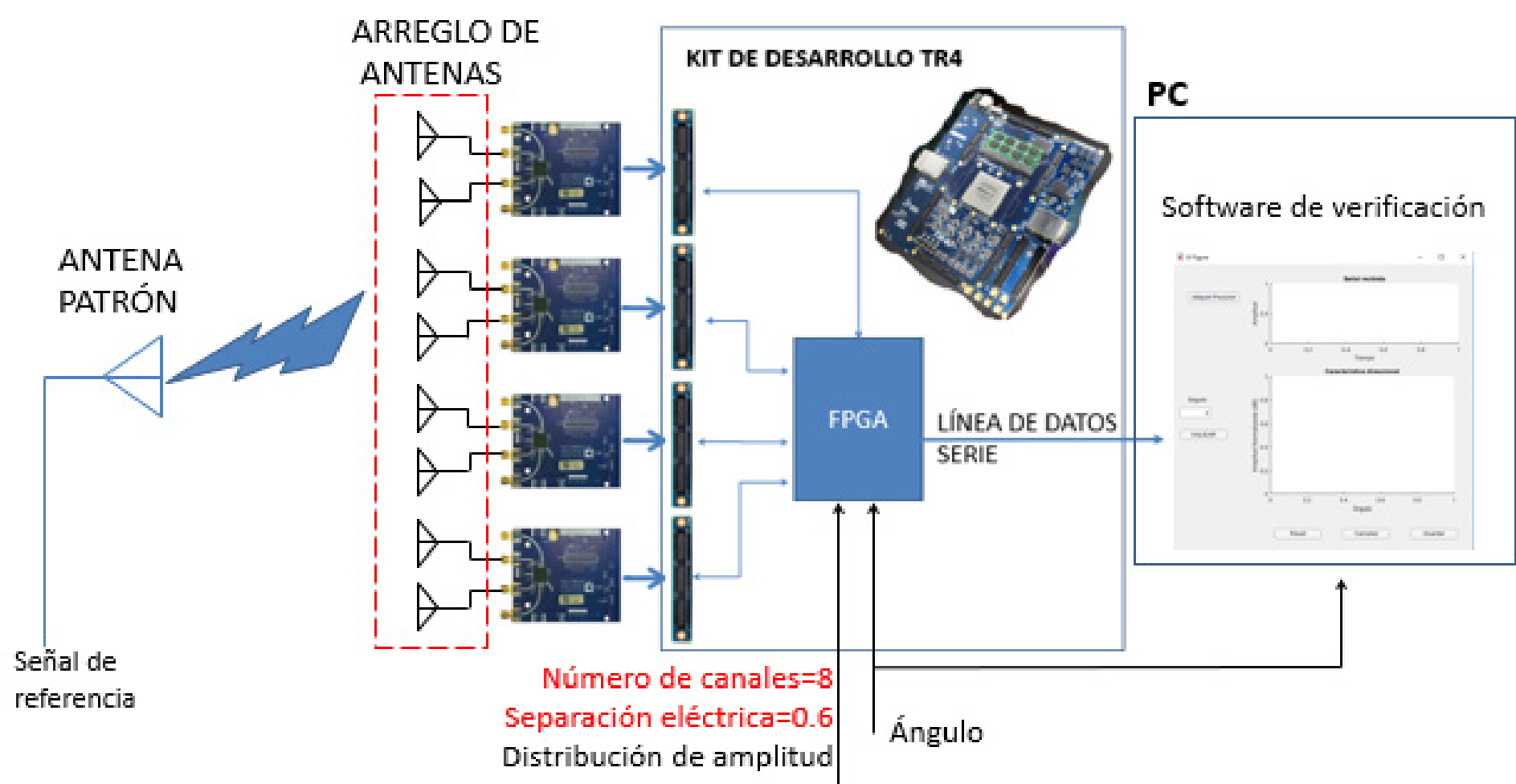


Figura 5. Esquema para la medición de la característica direccional

Como resultado se obtuvieron los patrones de radiación mostrados en la figura 6.

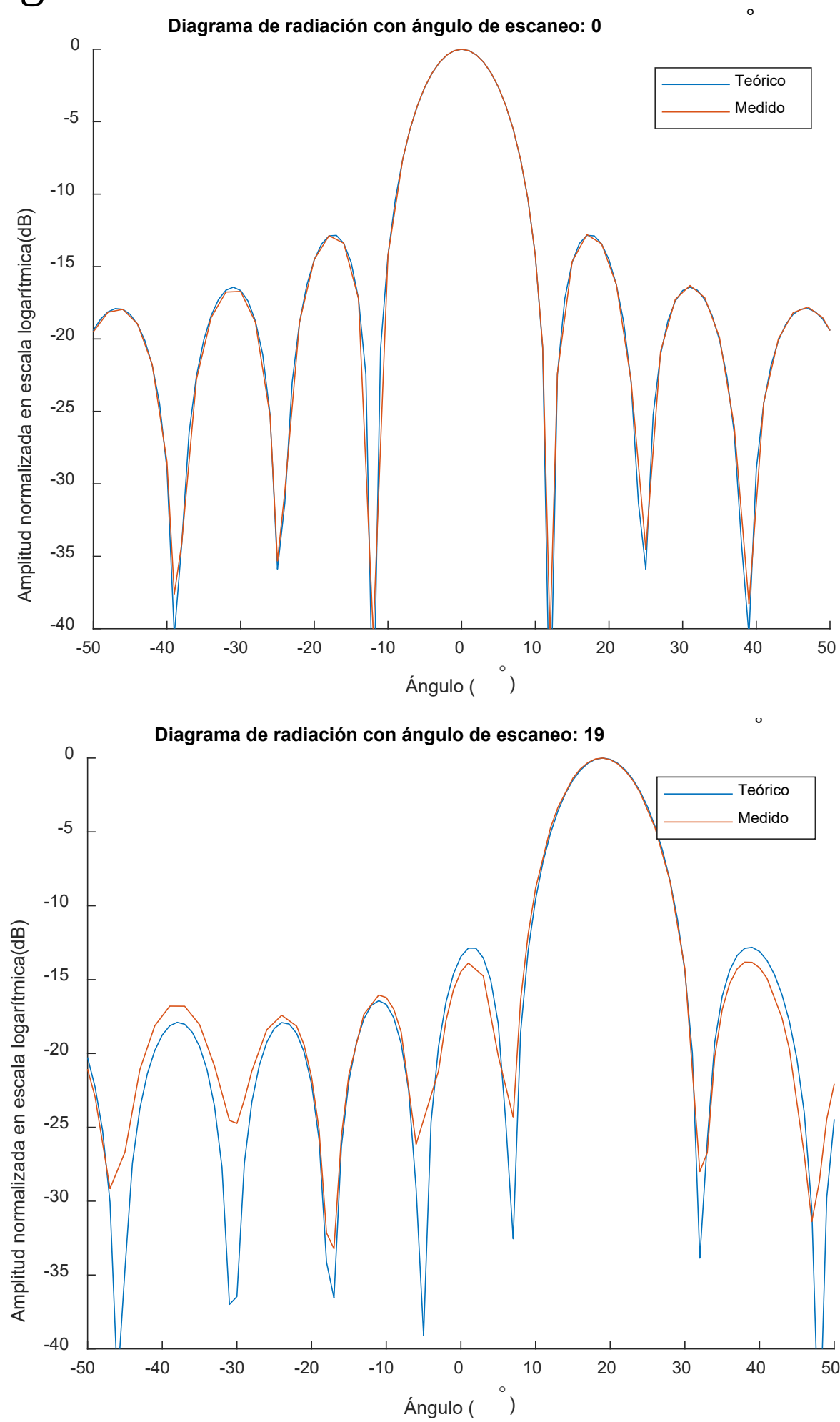
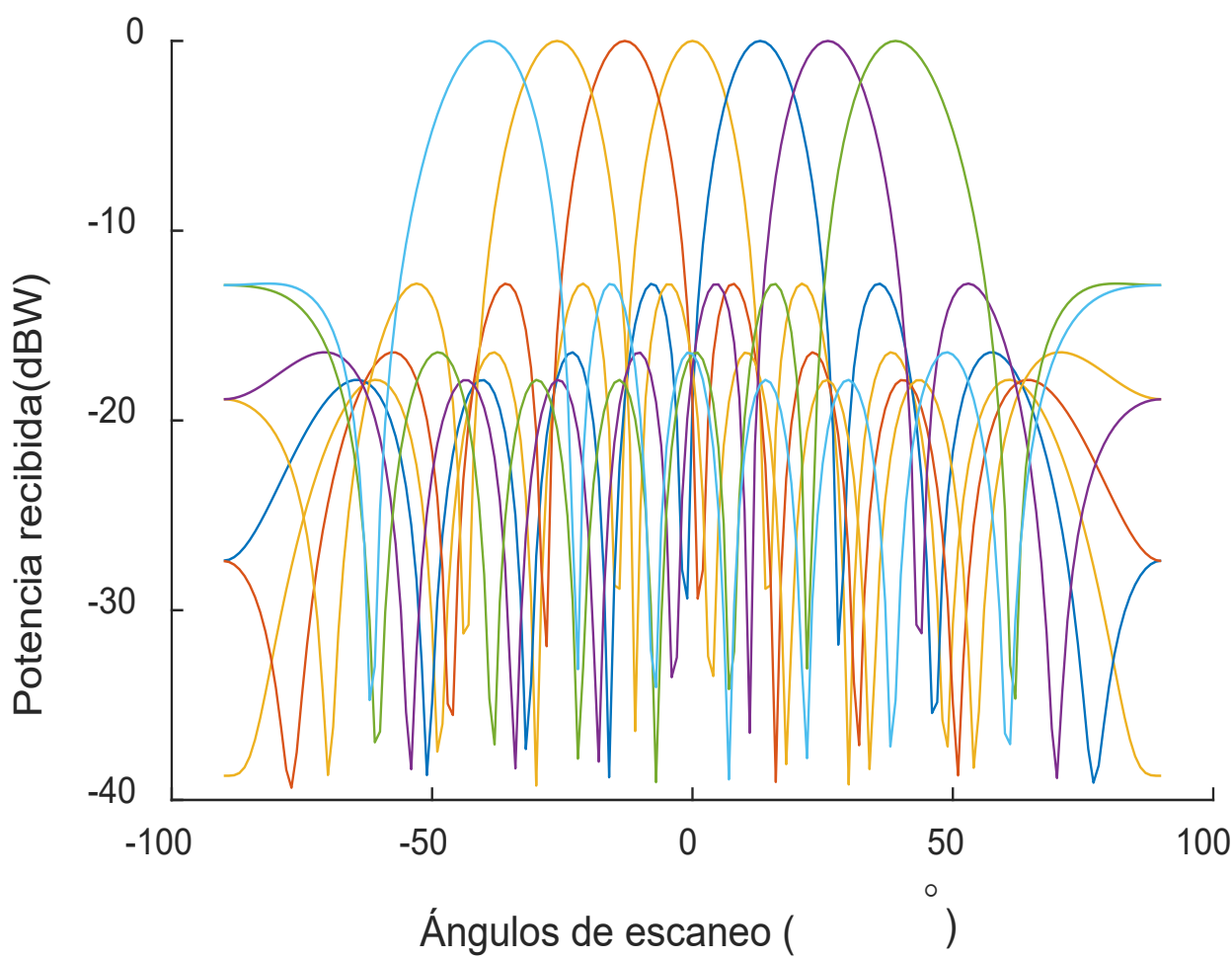


Figura 6. Diagramas de radiación formados digitalmente arriba 0 grados, abajo 19 grados

La figura 6 representa los diagramas medidos y simulados para dos de los canales del sistema de antenas con haz conmutado. Existe una correspondencia entre ambos con un error absoluto en el nivel de los lóbulos laterales inferior a 1.5 dB y en el ángulo de radiación de 0.39°. Las diferencias fundamentales entre ambos se manifiestan en la profundidad de los nulos de radiación y son una consecuencia directa de los errores de amplitud y fase presentes en el sistema. Con la geometría empleada utilizando siete diagramas direccionales es posible cubrir un sistema de exploración de 100° para el sistema de antenas con haz conmutado, como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Característica direccional del sistema con múltiples haces

### Conclusiones

El sistema implementado garantiza la formación de múltiples haces direccionales simultáneos de recepción por lo que puede ser empleado en un sistema con haz conmutado. En el trabajo se exponen los principales elementos tecnológicos que posibilitaron su desarrollo. La arquitectura de diseño propuesta además de ser aplicable a antenas inteligentes con conmutación del haz, es capaz de adaptarse a geometrías de antenas complejas pues, al formar el diagrama con técnicas digitales, solo necesita modificar la ecuación para la determinación de los pesos en el bloque de formación del haz. Esa misma razón hace que también sea posible el desarrollo de algoritmos adaptativos. Lo



anterior ratifica el cumplimiento del objetivo propuesto para la realización del trabajo.

En las mediciones realizadas se comprobó la correcta formación del diagrama de radiación. Los errores de amplitud y fase medidos en cada canal de recepción fueron inferiores a 0.3971% y 0.7538° respectivamente. Como consecuencia, las diferencias entre los haces medidos en la cámara anecoica y los simulados no superaron 1.5 dB para el nivel de los lóbulos laterales inferior y 0.39° en el ángulo de radiación.

## Referencias bibliográficas

- Ahmed, T. H., Tiang, J. J., Mahmud, A., Gwo-Chin, C., & Do, D.-T. (2023). Evaluating the Performance of Proposed Switched Beam Antenna Systems in Dynamic V2V Communication Networks. *SENSORS*, 23(15), 1-20. doi:10.3390/s23156782
- Almorabeti, S., Rifi, M., Terchoune, H., & Tizyi, H. (2018). Design and Implementation of a Switched Beam Smart Antenna For Wireless Power Transfer System at 5.8 GHz. *Paper presented at the 2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE)*, Casablanca, Morocco.
- Bailleul, P. K. (2016). *A New Era in Elemental Digital Beamforming for Spaceborne Communications Phased Arrays*. 104, 623-632. doi:10.1109/JPROC.2015.2511661
- Chen, Z., & Haas, H. (2015). Space division multiple access in visible light communications. *Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK.
- Delos, P. (2017). *Digital beamforming techniques for phased array system* [Webcast]. Retrieved from <https://www.analog.com/en/education/education-library/webcasts/digital-beamforming-techniques-for-phased-array-system.html>
- Delos, P., Frick, C., & Jones, M. (2020). *Multichannel RF-to-Bits development Platform Enables Rapid Prototyping for Phased Arrays*. Retrieved from <https://analog.com/en/design-notes/multichannel-to-bits-development-platform.html>.
- Dikmese, S., Kucuk, K., Sahin, S., & Tangel, A. (2010). Digital signal processor against field programmable gate array implementations of space-code correlator beamformer for smart antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 4(5), 593-599.
- HSMC ARRadio Daughter Car. Retrieved from <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=65&No=946&PartNo=1>

- Mailloux, R. J. (2018). *Phased Array Antenna Handbook* (3rd ed.): Artech House.
- Ong, L. T. (2015). Adaptive Beamforming Algorithms for Cancellation of Multiple Interference Signals. *Progress In Electromagnetics Research*, 43(M), 109-118. doi:10.2528/PIERM15061202
- Rodríguez, D. C., García, E., & Miller, R. B. (2017). Diseño e Implementación de un Beamformer Transmisor en una FPGA. 6. Retrieved from <https://silo.tips/download/una-antena-tipica>
- Rosa, S. L., Supriyanto, E., Rahman, T. A., Rahim, S. K. A., & Moradikordalivand, A. (2014). Switched Beam Smart Antenna for Wireless Local Area Network. *Paper presented at the International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI 2014)*, Yogyakarta, Indonesia.
- S. Venkata Rama Rao, A. M. P., Ch. Santhi Rami. (2019). Antenna Array Weight Synthesis for Low Side Lobe Levels using Window Functions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 8. doi:10.35940/ijeat.A1664.109119
- Settawit Poochaya, P. U. (2016). Beam Tracking in Switched-Beam Antenna System for V2V Communication. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016(Special), 1-13. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2016/4169619>
- Sharma, B., Sarkar, I., Maity, T., & Bhattacharya, P. P. (2014). An introduction to smart antenna system. *International Journal of Business and Engineering Research*, 8(11).
- Stincer, E. P. (2001). *Antenas. Teoría general*. La Habana: ITM.
- Yu, X. (2017). *Digital signal processor based real-time phased array radar backend system and optimization algorithms*. (Doctor of Philosophy). University of Oklahoma, Norman, Oklahoma. Retrieved from <https://shareok.org/handle/11244/52417>
- Zhai, M. (2017). Smart Antenna Technology in Mobile Communication and Its Research Progress. *Paper presented at the International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*, Sanya, China.

