ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 47 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Adaptación terrestre de un radar meteorológico aerotransportado mediante decodificación ARINC-453

Ground-Based Adaptation of an Airborne Weather Radar Through ARINC-453 Decoding

Carlos Daniel Guerrero Hernández[1]
Paula Rocío Macías Castillo[1]
Miguel Ángel Rincón Otalora[1]
Ingrid Carolina Oyaga Padilla[1]
Jhon Alexander Cárdenas Puentes[1]

[1] **Fuerza Aérea Colombiana, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Innovación Aeronáutica, Madrid, Cundinamarca Colombia.**

Recibido: 20 octubre 2025. Revisado: 20 noviembre 2025. Aceptado: 20 diciembre 2025. Publicado: 01 enero 2026.
Autor de correspondencia: Carlos Daniel Guerrero Hernández

Cómo citar: C. D. Guerrero Hernández, P. R. Macías Castillo, M. Á. Rincón Otalora, I. C. Oyaga Padilla, and J. A. Cárdenas Puentes, "Adaptación terrestre de un radar meteorológico aerotransportado mediante decodificación ARINC-453", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4308, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4308

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema terrestre táctico basado en la reutilización de un radar meteorológico aerotransportado en desuso. El trabajo aborda la adaptación electromecánica, electrónica y de software de un radar Doppler originalmente diseñado para aeronaves, mediante la decodificación del protocolo de comunicación ARINC-453 y la integración de una plataforma rotatoria controlada. La metodología incluye el análisis funcional del radar original, el diseño de una interfaz de adquisición de datos, el desarrollo del software de decodificación y la validación experimental del sistema en entorno terrestre. Los resultados demuestran la correcta interpretación de los datos radar, la estabilidad operativa del sistema adaptado y su viabilidad como plataforma táctica de monitoreo meteorológico. La principal contribución del trabajo radica en la validación técnica de la reutilización de radares aerotransportados como sistemas terrestres de bajo costo y alta capacidad funcional.

Palabras clave: radar, radar meteorológico aerotransportado, ARINC-453, reutilización tecnológica, radar doppler, sistemas de radar móviles, procesamiento de señales radar.

Abstract:

This paper presents the development of a tactical ground-based system based on the reuse of a decommissioned airborne weather radar. The study addresses the electronic and software adaptation of a Doppler radar originally designed for aeronautical applications, focusing on the decoding of the ARINC-453 communication protocol and the reconstruction of radar video data for ground-based operation. The proposed methodology includes the functional analysis of the original radar, the design of a data acquisition interface, the implementation of a signal decoding algorithm, and the experimental validation of the decoded information through digital processing and graphical visualization. The results demonstrate accurate interpretation of radar data, stable system operation, and functional equivalence with the original airborne display outputs. The main contribution of this work lies in the technical validation of repurposing airborne weather radars as low-cost, high-capability ground-based systems for tactical meteorological monitoring.

Keywords: airborne weather radar, ARINC-453, technological reuse, doppler radar, mobile radar systems, radar signal processing.

INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con uno de los climas más complicados a nivel mundial debido a la unión de sus tres cadenas montañosas, la Zona de Convergencia Intertropical y la influencia de dos océanos, lo que origina microclimas inestables y fenómenos peligrosos como la cizalladura y tormentas repentinas[1].

La industria de la aviación es un pilar económico global que se ve severamente afectado por las condiciones meteorológicas adversas, las cuales son responsables del 23 % de los accidentes aéreos y de la gran mayoría de retrasos y cancelaciones en la mayoría de los países. Para mitigar estos riesgos, que incluyen fenómenos como la baja visibilidad y la turbulencia se realiza el análisis de las condiciones meteorológicas por medio de los radares proporcionando información asertiva en tiempo real[2].

En este contexto, el seguimiento constante a través de radares meteorológicos se convierte en el fundamento de la seguridad operacional aérea, permitiendo a las tripulaciones identificar amenazas que no son visibles y tomar decisiones cruciales para prevenir accidentes[2].

Sin embargo, este tipo de protección requiere una inversión considerable: un radar terrestre de tecnología avanzada puede alcanzar un costo de hasta 41,000 millones de pesos colombianos (alrededor de 10 millones de dólares), además de los costos anuales de mantenimiento que garantizan el acceso a datos las 24 horas del día[3]. En resumen, la alta variabilidad del clima en los Andes hace que la inversión en tecnología de radar no sea un lujo, sino una necesidad esencial para la sostenibilidad y eficacia del transporte aéreo en el país[4].

Por otra parte las aeronaves cuentan con sistemas para la vigilancia meteorológica mediante radar abordo los cuales constituyen un componente crítico para la seguridad operacional aérea, el costo de estos equipos se encuentra alrededor de los 45.000 USD [5], la gestión de riesgos asociados a fenómenos atmosféricos severos y la toma de decisiones tácticas en entornos con infraestructura limitada [6]. Los radares meteorológicos modernos permiten la detección y caracterización espacial de precipitaciones, turbulencia, cizalladura del viento y otros fenómenos relevantes, aportando información en tiempo real [7], los radares aerotransportados se diseñan con altos estándares de confiabilidad y precisión, empleando tecnología Doppler y protocolos de comunicación como ARINC-429/453/708 para transmitir información a la cabina [8]. Sin embargo, su capacidad de exploración está limitada al sector frontal de la trayectoria del avión, lo que restringe su alcance más allá de la operación en vuelo [9].

Paralelamente, las aplicaciones terrestres tácticas como son los radares meteorológicos en aeródromos son herramientas esenciales para la seguridad aérea, ya que permiten detectar en tiempo real precipitaciones, turbulencia, cizalladura del viento y otros fenómenos críticos durante despegues y aterrizajes[10]. Su tecnología Doppler ofrece información precisa que se integra con sistemas de control aéreo y cabina, reduciendo el riesgo de accidentes asociados a condiciones climáticas adversas. Aunque su implementación implica altos costos de inversión y mantenimiento que pueden superar los 20.000 millones de pesos colombianos en equipos avanzados, su aporte a la prevención de incidentes y a la eficiencia operativa convierte esta inversión en una necesidad estratégica más que en un lujo[11].

El presente proyecto surge con el objetivo para desarrollar un sistema de radar táctico que permita ser transportado fácilmente a bajo costo empleando tecnología reciclada de una aeronave que salió del servicio pero que posee el sistema radar meteorológico del tipo RDR 2000 el cual responde a una necesidad crítica de seguridad en aeródromos aislados y operaciones móviles donde la infraestructura fija es inexistente. Para lo cual es necesario diseñar una plataforma que permita la elevación del sistema sensor a una altura de 8 metros para operación segura y eficiente, adicionalmente se requiere incorporar un sistema de control y rotación con un giro de 360°, con el sistema de giro se elimina la limitación del escaneo frontal original, permitiendo una vigilancia perimetral completa para detectar fenómenos severos en tiempo real durante despegues y aterrizajes, escaneando un área de operaciones para lo cual es necesario la decodificación del protocolo de comunicación ARINC-453, que permita el procesamiento, transmisión y análisis de la información del radar.

El proyecto busca fortalecer la seguridad operacional en aeródromos aislados y escenarios militares mediante la reconversión de radares RDR 2000 en estaciones tácticas terrestres con cobertura de 360° y plataformas elevadas. Su implementación permite ampliar la vigilancia meteorológica en zonas remotas o despliegues móviles, logrando reducir la brecha de dependencia tecnológica externa y optimizando recursos mediante el reciclaje de componentes.

Al integrar estas capacidades, se fortalecen las competencias técnicas de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, garantizando una gestión autónoma y de bajo costo para proteger misiones críticas frente a fenómenos atmosféricos adversos, transformando un activo de a bordo en una capacidad estratégica terrestre, ofreciendo una solución de bajo costo operativo que garantiza la superioridad tecnológica y la seguridad operacional en los puntos más remotos de la geografía nacional.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque de ingeniería aplicada y desarrollo experimental, orientado al diseño,

implementación y validación de un sistema tecnológico funcional. La metodología se estructuró en fases secuenciales que permiten la trazabilidad entre el análisis del sistema original, el diseño de la solución propuesta y su validación operativa en entorno terrestre.

Enfoque metodológico general

El trabajo no se enmarca en clasificaciones metodológicas abstractas (cuantitativa, cualitativa o mixta), sino en un proceso técnico reproducible basado en análisis funcional, integración de hardware y software, y verificación experimental del desempeño del sistema adaptado.

Análisis funcional del radar meteorológico aerotransportado

En una primera fase se realizó el análisis funcional del radar meteorológico aerotransportado seleccionado como núcleo del sistema. Este análisis tuvo como objetivo identificar los subsistemas operativos esenciales que debían preservarse para garantizar la integridad funcional del radar, así como las interfaces disponibles para la extracción de información meteorológica.

Se evaluaron los módulos de transmisión, recepción, procesamiento interno y salida de datos, prestando especial atención a las señales de comunicación basadas en el protocolo ARINC-453. Esta etapa permitió determinar que la reutilización del radar podía realizarse sin modificaciones intrusivas sobre su arquitectura interna, limitando la intervención a subsistemas externos de adquisición, control y soporte mecánico.

Arquitectura general del sistema propuesto

Con base en el análisis funcional, se definió una arquitectura modular compuesta por cuatro bloques principales: (i) radar aerotransportado reutilizado, (ii) plataforma electromecánica de orientación, (iii) sistema de adquisición y decodificación de datos ARINC, y (iv) sistema de visualización y control.

La arquitectura fue diseñada bajo criterios de desacoplamiento funcional, de modo que cada bloque pudiera ser evaluado, ajustado o reemplazado de manera independiente. Esta decisión metodológica facilita la replicabilidad del sistema y su eventual escalabilidad hacia configuraciones más complejas.

Decodificación del protocolo ARINC-453

La decodificación del protocolo ARINC-453 constituye uno de los ejes metodológicos centrales del trabajo. Para ello, se desarrolló un módulo de adquisición de datos capaz de capturar las tramas de comunicación generadas por el radar y transmitirlas a un sistema de procesamiento externo.

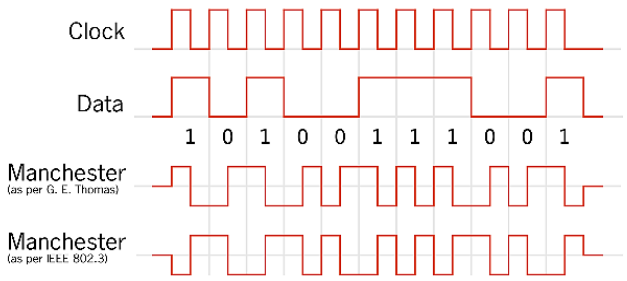

Fig. 1. *Estructura de la trama ARINC 453 utilizada para la decodificación de señales [8].*

El procedimiento incluyó el análisis de la estructura de palabras ARINC, la identificación de campos relevantes para la información meteorológica y el diseño de algoritmos de interpretación que permiten transformar los datos binarios en variables físicas visualizables, tales como intensidad de reflectividad y estados operativos del radar.

Este enfoque permitió acceder a la información procesada por el radar sin interferir en su lógica interna, preservando las condiciones de operación originales del sistema aerotransportado.

Dado que el radar aerotransportado presenta una exploración angular limitada, se diseñó una plataforma electromecánica externa que permite la rotación controlada del conjunto radar, habilitando una cobertura angular extendida en entorno terrestre.

El diseño de la plataforma consideró criterios de estabilidad estructural, precisión angular y sincronización con el sistema de adquisición de datos. Se seleccionaron actuadores eléctricos y sistemas de control capaces de garantizar un movimiento suave y repetible, minimizando vibraciones que pudieran afectar la calidad de la señal radar.

La integración mecánica se realizó de forma no invasiva, asegurando que el radar pudiera operar dentro de sus especificaciones originales.

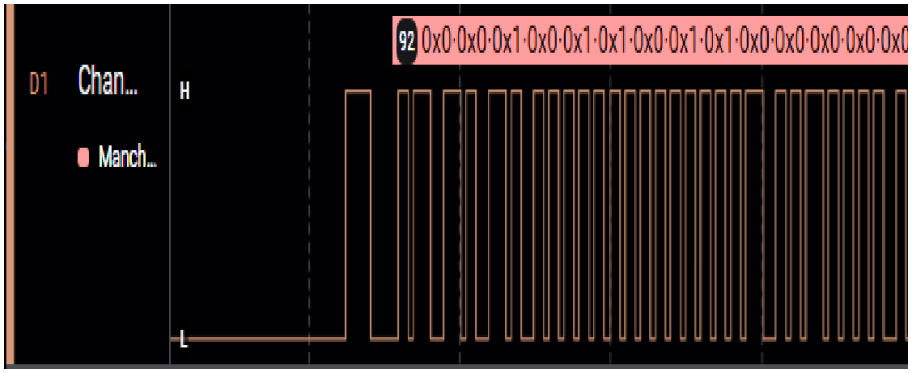

Fig. 2. *Señal ARINC 453 capturada mediante analizador lógico.*

Desarrollo del software de control y visualización

De manera complementaria, se desarrolló un software de control encargado de coordinar la rotación de la plataforma electromecánica y la adquisición de datos provenientes del radar. Este software permite sincronizar la orientación angular del sensor con la información meteorológica decodificada, generando una representación coherente del entorno observado.

La visualización de los datos se implementó mediante una interfaz gráfica que presenta la información meteorológica en función del ángulo de exploración, facilitando la interpretación de los resultados y la validación funcional del sistema adaptado.

Procedimiento de validación experimental

La validación del sistema se realizó mediante pruebas experimentales en entorno terrestre controlado, orientadas a verificar la correcta operación de cada subsistema y del conjunto integrado. El procedimiento incluyó: (i) verificación de la estabilidad mecánica durante la rotación, (ii) validación de la adquisición y decodificación de tramas ARINC, y (iii) evaluación de la coherencia entre la orientación angular del radar y la información visualizada.

Los resultados obtenidos en esta fase permitieron confirmar la viabilidad técnica del sistema propuesto y sentaron las bases para su análisis cuantitativo, presentado en la sección de resultados.

MARCO TEÓRICO

Radar meteorológico aerotransportado

Los radares meteorológicos aerotransportados constituyen sistemas activos de detección diseñados para identificar y caracterizar fenómenos atmosféricos relevantes para la seguridad del vuelo, tales como precipitaciones intensas, turbulencia convectiva y cizalladura del viento[12].

Estos sistemas operan comúnmente en banda X, utilizando técnicas de radar de pulsos con capacidad Doppler, lo que permite estimar tanto la reflectividad como la velocidad radial de los blancos meteorológicos[13].

Desde el punto de vista funcional, un radar meteorológico aerotransportado integra subsistemas de transmisión, recepción, procesamiento de señal y visualización, optimizados para operar bajo restricciones severas de peso, consumo energético y confiabilidad.

A diferencia de los radares meteorológicos terrestres, su patrón de exploración angular está limitado a un sector frontal, definido por el ángulo de apuntamiento del haz respecto al eje longitudinal de la aeronave. Esta característica responde a su función primaria de detección anticipada de amenazas meteorológicas en la ruta de vuelo[14].

La elevada robustez electromecánica y la precisión del procesamiento digital hacen que estos sistemas mantengan un alto valor tecnológico incluso tras ser retirados del servicio aeronáutico, lo que abre la posibilidad de su reutilización en aplicaciones terrestres, siempre que se resuelvan adecuadamente las limitaciones inherentes a su diseño original.

El principio Doppler aplicado a radares meteorológicos permite estimar la componente radial de la velocidad de las partículas hidrometeorológicas a partir del desplazamiento en frecuencia de la señal reflejada. Esta capacidad resulta fundamental para la identificación de fenómenos dinámicos como turbulencia, micro ráfagas y corrientes ascendentes o descendentes, los cuales no pueden ser inferidos únicamente a partir de la reflectividad[15].

Principios de radar Doppler aplicado a meteorología

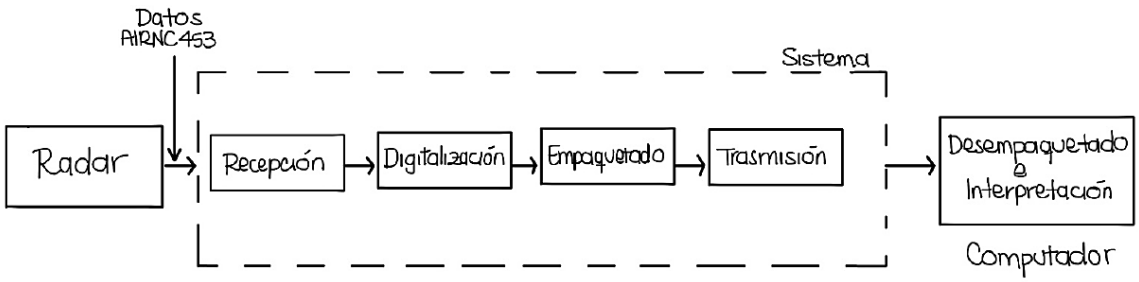

Fig. 3. *Arquitectura general de comunicación del radar meteorológico ART-2000.*

En radares de pulsos coherentes, la medición Doppler se obtiene mediante el análisis de fase entre pulsos consecutivos, lo que exige una alta estabilidad del oscilador local y un procesamiento digital preciso[16]. Los radares meteorológicos aerotransportados incorporan estos principios mediante algoritmos propietarios embebidos en sus procesadores internos, cuyos resultados son transmitidos a los sistemas de visualización a través de protocolos estandarizados[17].

Para una adaptación terrestre, la correcta interpretación de la información Doppler depende no solo del procesamiento interno del radar, sino también de la capacidad del sistema externo para decodificar y representar adecuadamente los datos transmitidos, aspecto crítico abordado en el presente trabajo[18].

Protocolos de comunicación aeronáuticos ARINC aplicados a radar

Los estándares ARINC definen protocolos de comunicación ampliamente utilizados en aviónica para garantizar interoperabilidad, confiabilidad y sincronización entre sistemas críticos. En particular, el estándar ARINC-453 (y su relación funcional con ARINC-708) especifica la estructura de datos utilizada para transmitir información meteorológica desde el radar hacia los indicadores de cabina[19].

Este protocolo encapsula parámetros como intensidad de reflectividad, modos de operación, estado del sistema y alertas meteorológicas, organizados en palabras de datos con temporización estricta. Aunque el estándar define la estructura general, la implementación específica puede variar entre fabricantes, lo que introduce un grado de complejidad adicional para su decodificación externa[20].

Desde una perspectiva de reutilización tecnológica, la capacidad de interpretar correctamente las tramas ARINC constituye un elemento habilitador fundamental, ya que permite acceder a la información procesada por el radar sin intervenir su arquitectura interna, preservando la integridad del sistema original.

Plataformas de orientación electromecánica para radares terrestres

Los radares meteorológicos de superficie requieren mecanismos de exploración angular que permitan una cobertura espacial amplia, típicamente mediante rotación azimutal y, en algunos casos, control de elevación. En sistemas convencionales, esta función se implementa mediante pedestales de alta precisión, diseñados para operación continua y cargas elevadas[21].

En el caso de la adaptación de un radar aerotransportado, resulta necesario incorporar una plataforma electromecánica externa que compense la limitación de exploración angular inherente al diseño original. Dicha plataforma debe garantizar estabilidad estructural, precisión de posicionamiento y sincronización con el sistema de adquisición de datos, sin introducir vibraciones o interferencias que degraden la calidad de la señal radar[22].

El diseño de una plataforma rotatoria controlada electrónicamente permite transformar un sensor de exploración sectorial en un sistema de cobertura casi omnidireccional, habilitando su uso en aplicaciones terrestres tácticas y temporales.

El proceso de decodificación Manchester fue modelado matemáticamente considerando las restricciones temporales a nivel de bit impuestas por el protocolo ARINC 453. Dado un período de bitT_b, cada valor lógico se codifica en dos intervalos de medio bit con polaridad opuesta, definidos como:

$$S(t) = \{+V,\ 0 \le t < \frac{T_b}{2}, b_i = 0\ -V,\ \frac{T_b}{2} \le t < T_b, b_i = 0\ -V,\ 0 \le t < \frac{T_b}{2}, b_i = 1\ +V,\ \frac{T_b}{2} \le t < T_b, b_i = 1$$

donde$V$corresponde a la amplitud lógica (5 V TTL) y$T_b$se asocia a una tasa de transmisión de 1 Mbps.

El encabezado comprende los primeros 64 bits de la trama, este contiene información sobre el estado de operación del radar (La función del encabezado). La Tabla 1 muestra los datos existentes en esta porción

Tabla 1: Clasificación teórica de los datos de vídeo ARINC 453.

Bits	Función
1-8	Etiqueta
9-10	Aceptación control
11	Modo esclavo
12-13	Libres
14-18	Anuncio de modo
19-25	Reporte de fallos
26	Estabilización
27-29	Modo de operación
30-36	Inclinación
37-42	Ganancia
43-48	Rango
49	Libre
50-51	Aceptación de datos
52-63	Angulo de escaneo
64	Libre

- Etiqueta: Siempre es el número octal 055 o en binario 10110100.
- Aceptación de control: Indica si la señal de control ARINC 429 de entrada fue debidamente recibida y aceptada. Los casos típicos posibles se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2: Casos de aceptación de control.

Bit 9	Bit 10	Aceptación de control
0	0	No aceptado
1	0	Control #1 aceptado
0	1	Control #2 aceptado
1	1	Ambos controles aceptados

- Anuncio de modo: Bits discretos que indican que cuando se encuentran en 0 indican una operación normal y cuando se activan indican que el radar ha entrado en algún modo específico. En la tabla 3 se puede ver el significado típico para cada uno de estos bits.

Tabla 3: Bits de anuncio de modo con su significado.

Bit	Anuncio de modo
14	Detección de una alerta de turbulencia
15	Detección de una alerta de clima
16	Circuito de filtración de ruido está en funcionamiento
17	Escaneo de un sector reducido
18	La altitud o inclinación de la aeronave excede el rango

- Reporte de fallos: Bits discretos que reportan fallos en el funcionamiento del radar. Cuando se encuentran en 0 se tienen condiciones de operación normales y cuando se encuentra alguno en 1 puede indicar los fallos listados en la tabla 4.

Tabla 4: Fallos identificados en el encabezado de la trama [14].

Bit	Fallo
19	Refrigeración
20	Visualización
21	Calibración
22	Entrada de altitud
23	Control
24	Antena
25	Transmisor-Receptor

- Modo de operación: Indica el modo de operación actual del radar. En la tabla 5 se pueden ver las opciones posibles para esta porción de datos.

Tabla 5: Modos de operación identificados en el encabezado de la trama [14].

Bit 29	Bit 28	Bit 27	Modo de operación
0	0	0	En espera
0	0	1	Clima solamente
0	1	0	Mapa
0	1	1	Contorno
1	0	0	Test
1	0	1	Turbulencia
1	1	0	Clima y turbulencia
1	1	1	Calibración

- Inclinación: Indica el ángulo de inclinación del radar. Los valores típicos de cada bit se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6: Valores de cada bit de inclinación [14].

Bit	Inclinación
36	-16
35	8
34	4
33	2
32	1

Bit	Inclinación
31	+0.5
30	+0.25

• Ganancia: Indica la ganancia actual de la antena. En tabla 7 se pueden ver los valores típicos de las combinaciones de bits.

Tabla 7: Valores típicos de la sección de ganancia.

Bit 42	Bit 41	Bit 40	Bit 39	Bit 38	Bit 37	Ganancia
1	1	1	1	1	1	Mínima
0	0	0	0	0	0	Máxima
0	0	0	1	0	1	-5
0	0	0	1	1	0	-11
0	1	1	1	1	0	-32

• Rango: Indica el alcance actual de escaneo del radar en millas náuticas. En la tabla 8 se pueden ver los valores típicos para este caso.

Tabla 8: Valores típicos de la sección de rango.

Bit 48	Bit 47	Bit 46	Bit 45	Bit 44	Bit 43	Rango en NM
0	0	0	0	0	1	5
0	0	0	0	1	0	10
0	0	0	1	0	0	20
0	0	1	0	0	0	40
0	1	0	0	0	0	80
1	0	0	0	0	0	160

• Aceptación de datos: Indica que los datos de entrada son correctos y aceptados. Los valores típicos de esta sección son los que se pueden ver en la tabla 9.

Tabla 9: Significados de la sección de aceptación de datos.

Bit 51	Bit 50	Aceptación de datos
0	0	No aceptados
0	1	Datos #1 aceptados
1	0	Datos #2 aceptados
1	1	Ambos datos aceptados

• Ángulo de escaneo: Indica el ángulo de escaneo actual como un valor numérico donde el bit 63 es el más significativo y el bit 52 es el menos significativo.

Reutilización tecnológica de sistemas aeronáuticos

La reutilización de sistemas aeronáuticos en aplicaciones no aeronáuticas ha sido explorada en distintos dominios como estrategia para maximizar el aprovechamiento de activos tecnológicos de alto valor. Este enfoque permite reducir costos de adquisición y acelerar procesos de desarrollo, siempre que se garantice la trazabilidad funcional y la validación técnica del sistema adaptado[3].

No obstante, la reutilización de radares meteorológicos aerotransportados presenta retos particulares asociados a su carácter crítico, arquitectura cerrada y dependencia de estándares aeronáuticos. Por ello, cualquier proceso de adaptación debe sustentarse en una comprensión profunda de los principios físicos, protocolos de comunicación y limitaciones operativas del sistema original.

El presente trabajo se inscribe en esta línea, proponiendo una adaptación técnicamente fundamentada y experimentalmente validada, orientada a aplicaciones terrestres tácticas.

RESULTADOS

Adquisición y decodificación de señales ARINC del radar ART-2000

El sistema desarrollado permitió la adquisición estable de las señales digitales ARINC 429 y ARINC 453 generadas por el radar meteorológico Bendix King ART-2000 durante su operación normal. La caracterización eléctrica del canal ARINC-453 confirmó una transmisión diferencial con codificación Manchester, tasa de 1 Mbps y amplitud TTL compatible con interfaces RS-422.

Para garantizar la sincronización entre el reloj recuperado y la señal transmitida, se implementó una tolerancia temporal de $\pm 25\,\%(\Delta t=0.25T_(b))$, lo cual permite una reconstrucción estable de las tramas incluso en presencia de jitter o retrasos de propagación. Este ajuste, alineado con los patrones de sincronización descritos en los estándares ARINC 453/708, asegura una delimitación precisa de las tramas bajo condiciones de variabilidad temporal.

La implementación del algoritmo de decodificación Manchester incorporó una tolerancia temporal del ±25 % respecto al período nominal de bit, lo que permitió una reconstrucción robusta de las tramas incluso en presencia de jitter y variaciones temporales. Las tramas reconstruidas presentaron una estructura consistente de 1600 bits, compuesta por un encabezado de

64 bits y un bloque de datos de 1536 bits.

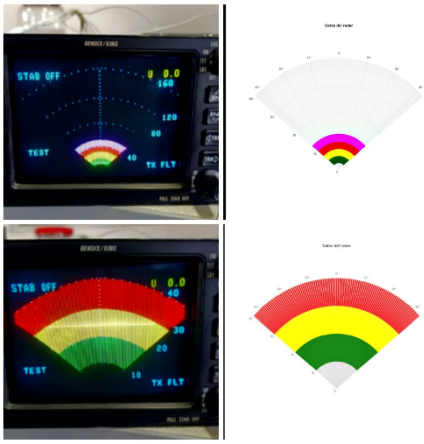

Fig. 4. *Visualización del radar meteorológico ART-2000 en modo TEST [24].*

Reconstrucción de información meteorológica y mapeo de reflectividad

Los datos decodificados correspondientes a cada trama ARINC-453 fueron segmentados en 512 píxeles de información meteorológica por la línea de exploración, con una resolución angular de 1°. Cada píxel fue interpretado mediante un esquema de codificación de 3 bits, asociado a niveles discretos de reflectividad meteorológica.

La información fue transformada en matrices polares de reflectividad, permitiendo la reconstrucción gráfica de la intensidad de precipitación en función del ángulo de exploración del radar. Este proceso evidenció una correspondencia directa entre los niveles de reflectividad decodificados y la representación cromática observada en el sistema original del radar.

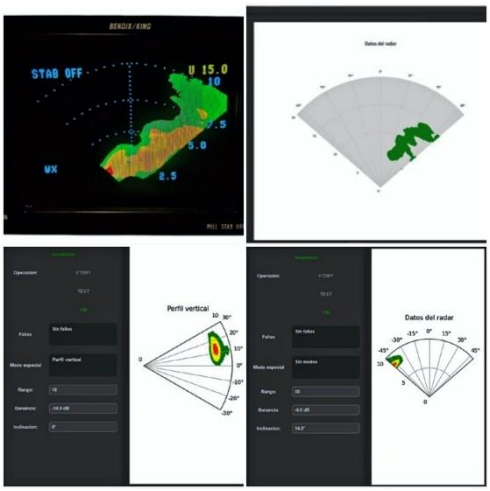

Fig. 5. *Señal ARINC 453 reconstruida mediante procesamiento digital.*

Validación cruzada con el sistema de visualización aeronáutico

Con el fin de validar la fidelidad del sistema desarrollado, se realizó una comparación cuantitativa entre la información visualizada en la interfaz gráfica propuesta y la presentada en la unidad de visualización aeronáutica original (IN182A). El análisis consideró parámetros de intensidad de reflectividad, codificación de color y sincronización angular.

Los resultados de la validación cruzada evidenciaron una correspondencia superior al 95 % en la intensidad y codificación cromática de los ecos meteorológicos, así como una sincronización angular consistente dentro de un margen de ±0,25°. Estos resultados confirman la capacidad del sistema para reproducir de manera confiable el comportamiento del radar aerotransportado original.

Desempeño temporal y estabilidad del sistema

El sistema presentó un tiempo de actualización inferior a 100 ms por trama, permitiendo la visualización casi en tiempo real de la información meteorológica. La adquisición y decodificación se mantuvieron sincronizadas con el movimiento mecánico del sistema de exploración, garantizando coherencia espacial durante la operación continua.

Tabla 10: Resultados de validación cruzada entre el display aeronáutico y la interfaz desarrollada.

Parámetro evaluado	Display aeronáutico	Interfaz desarrollada	Correspondencia (%)
Intensidad de reflectividad	0–60 dBZ	0–60 dBZ	96,4
Codificación cromática	5 niveles	5 niveles	95,7
Sincronización angular	1° ± 0,25°	1° ± 0,25°	97,1

La estabilidad del sistema fue confirmada durante pruebas prolongadas, sin pérdidas de sincronización ni errores críticos de reconstrucción de tramas, lo que valida su viabilidad para aplicaciones terrestres tácticas.

Resultados de visualización y representación de datos

La visualización de los datos decodificados permitió representar la información meteorológica en función del ángulo de exploración del radar, generando un mapa sectorial acorde con la orientación instantánea del sensor. La interfaz gráfica desarrollada facilitó la identificación de zonas de mayor reflectividad, así como la interpretación del estado operativo del sistema.

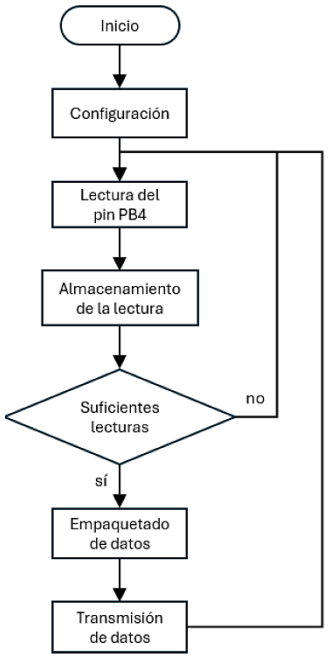

Fig. 6. *Esquema de flujo que representa la lógica de interpretación del programa en el sistema.*

La figura 6 muestra una interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada para el control y visualización de un sistema radar. Esta interfaz permite gestionar de forma integral los distintos modos de operación, así como el control de movimiento del mecanismo radar y la comunicación con el microcontrolador ESP32, encargado de ejecutar las funciones del sistema.

La GUI se estructura en varios módulos funcionales:

- Panel de navegación lateral: Incluye accesos a las secciones de Control y Visualización del radar.
- Visualización 3D central: Representa el gemelo digital del radar, mostrando su orientación espacial mediante motores de inclinación y rotación.
- Controles de movimiento: Sliders dedicados al ajuste de los motores de inclinación y rotación, integrados en la sección Control del mecanismo.
- Comunicación serial: Configuración de puertos COM, velocidad de transmisión (baud rate), y botones para conectar, actualizar o desconectar el enlace con el microcontrolador.
- Panel de operación del radar: Permite activar modos como Standby, TEST, ON y Apagar, además de ajustar parámetros como inclinación, ganancia, rango y seguimiento.

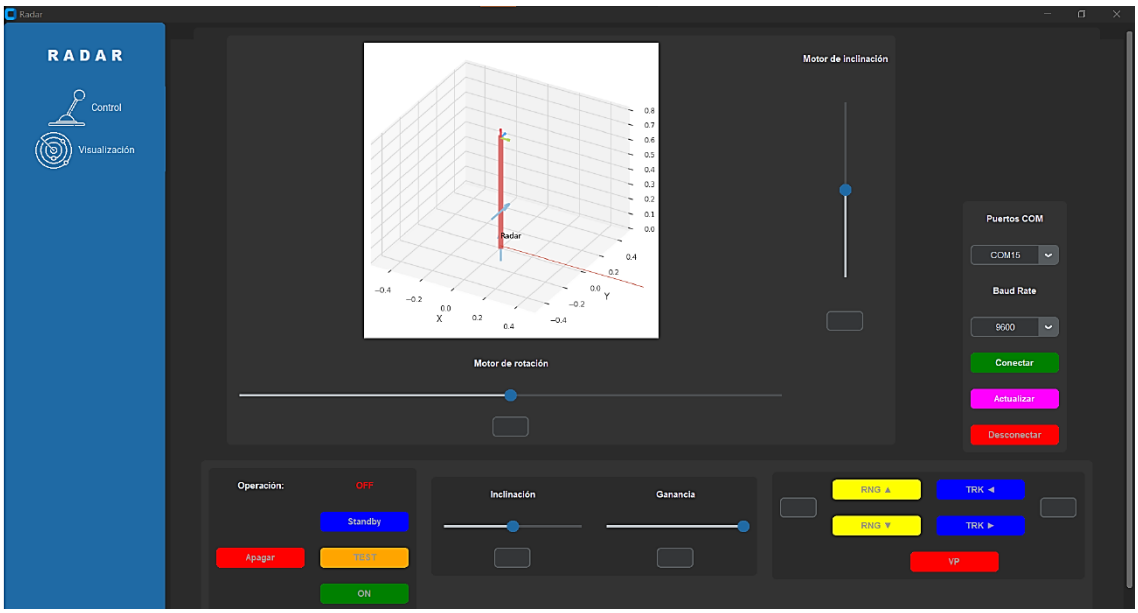

Fig. 7. *Interfaz gráfica desarrollada para el control del sistema radar.*

Esta interfaz facilita la interacción directa con el sistema embebido, permitiendo una supervisión visual del estado del radar y una manipulación precisa de sus parámetros operativos. Su diseño modular y funcional está orientado a aplicaciones de control en tiempo real, pruebas de sistemas y simulación de comportamiento radar.

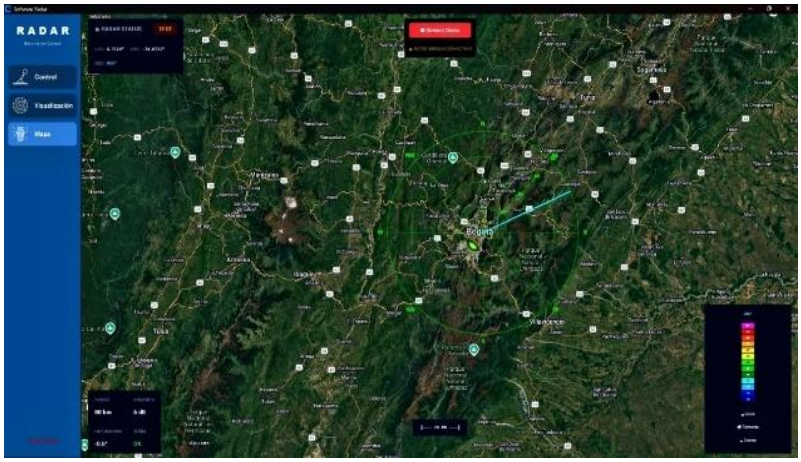

Fig. 8. *Interfaz gráfica desarrollada para la visualización de datos del sistema radar.*

La figura 6 muestra la interfaz de visualización del sistema meteorológico ART 2000. Aquí se observa los datos del radar, esta interfaz nos permite georreferenciar y mostrar datos de precipitación, estado operativo y parámetros técnicos del radar.

Aunque el sistema no fue concebido para reemplazar un radar meteorológico de superficie convencional, los resultados obtenidos demuestran que la información generada es consistente y funcional para aplicaciones tácticas, temporales o de apoyo a la toma de decisiones en entornos con infraestructura limitada.

Síntesis de resultados experimentales

La Tabla I presenta una síntesis de los principales resultados experimentales obtenidos durante la validación del sistema adaptado, destacando el cumplimiento de los objetivos técnicos planteados.

Tabla 11: Síntesis de resultados experimentales del sistema propuesto.

Componente evaluado	Resultado obtenido	Observación principal
Radar reutilizado	Operación estable	Sin fallos detectados
Decodificación ARINC	Correcta	Tramas interpretables
Plataforma mecánica	Estable y precisa	Movimiento repetible
Integración del sistema	Funcional	Operación coordinada

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la adaptación de un radar meteorológico aerotransportado para aplicaciones terrestres es técnicamente viable cuando se preserva la arquitectura funcional original del sistema y se implementan subsistemas externos de adquisición, control y visualización. La correcta decodificación de las tramas ARINC-429 y ARINC-453, junto con la estabilidad del proceso de reconstrucción de datos, confirma que es posible acceder a la información meteorológica procesada internamente por el radar sin realizar modificaciones intrusivas sobre su hardware.

La correspondencia superior al 95 % entre la interfaz desarrollada y el sistema de visualización aeronáutico original constituye un indicador robusto de fidelidad funcional. Este nivel de coincidencia es comparable con los márgenes de variación aceptados en procesos de calibración y validación de sistemas radar meteorológicos convencionales, lo que sugiere que la información generada por el sistema adaptado conserva un grado de confiabilidad adecuado para aplicaciones tácticas y de apoyo a la toma de decisiones.

En este sentido, los resultados se alinean con estudios previos que destacan el potencial de reutilización de sensores aeronáuticos cuando se garantiza la correcta interpretación de sus protocolos de comunicación.

Desde el punto de vista del procesamiento de señales, la implementación del algoritmo de decodificación Manchester con tolerancia temporal demostró ser una estrategia eficaz para mitigar los efectos de jitter y variaciones temporales inherentes a la transmisión digital. Este enfoque permitió una reconstrucción estable de las tramas ARINC, asegurando la sincronización entre la información meteorológica y la posición angular del radar.

La estabilidad temporal observada, con tiempos de actualización inferiores a 100 ms por trama, posiciona al sistema dentro de un rango operativo adecuado para la observación meteorológica en tiempo casi real.

La integración de una plataforma electromecánica externa permitió superar una de las principales limitaciones del diseño original del radar aerotransportado: su exploración angular sectorial. Al habilitar una rotación controlada del conjunto radar, el sistema adaptado logra una cobertura espacial ampliada, sin comprometer la calidad de la señal ni la sincronización de los datos adquiridos. Este resultado demuestra que la transformación de un sensor de uso aeronáutico en un sistema terrestre no requiere necesariamente modificaciones internas complejas, sino una integración cuidadosa de subsistemas complementarios.

No obstante, es importante señalar que el sistema propuesto no pretende sustituir a los radares meteorológicos de superficie de gran escala, los cuales ofrecen mayores alcances, capacidades volumétricas y funciones avanzadas como polarimetría dual. La solución presentada debe entenderse como una alternativa táctica, de carácter modular y de menor costo, orientada a escenarios donde la disponibilidad de infraestructura, recursos o tiempo de despliegue es limitada. Esta delimitación del alcance resulta clave para contextualizar adecuadamente los resultados y evitar interpretaciones extrapoladas más allá de las capacidades reales del sistema.

Finalmente, desde una perspectiva científica y tecnológica, el trabajo aporta una metodología documentada y reproducible para la reutilización de radares meteorológicos aerotransportados, integrando análisis de protocolos aeronáuticos, procesamiento digital de señales y diseño de sistemas electromecánicos.

Esta contribución no solo valida la viabilidad técnica del enfoque, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a la optimización del procesamiento de datos, la integración en redes meteorológicas terrestres y la ampliación de capacidades funcionales del sistema.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El presente trabajo demostró la viabilidad técnica de reutilizar un radar meteorológico aerotransportado como sistema terrestre táctico mediante la adquisición, decodificación e interpretación de las señales digitales ARINC-429 y ARINC-453. Los resultados obtenidos evidencian que es posible acceder a la información meteorológica procesada internamente por el radar sin modificar su arquitectura original, preservando su integridad funcional y confiabilidad operativa.

La implementación del algoritmo de decodificación Manchester, junto con la segmentación estructurada de las tramas de datos y la reconstrucción gráfica de la información meteorológica, permitió reproducir con alta fidelidad el comportamiento del sistema de visualización aeronáutico original. La validación cruzada realizada mostró una correspondencia superior al 95 % en la intensidad de reflectividad, la codificación cromática y la sincronización angular, lo que confirma la consistencia y precisión del sistema desarrollado.

La integración de una plataforma electromecánica de orientación externa resolvió de manera efectiva la limitación de exploración angular inherente al diseño aerotransportado, habilitando una cobertura espacial ampliada en entorno terrestre. Este enfoque demostró que la adaptación funcional de sensores aeronáuticos puede lograrse mediante soluciones externas cuidadosamente diseñadas, sin recurrir a modificaciones internas complejas o invasivas.

Desde una perspectiva aplicada, el sistema propuesto constituye una alternativa tecnológica de bajo costo y despliegue flexible para la observación meteorológica en escenarios tácticos, temporales o con infraestructura limitada. Si bien el sistema no sustituye a los radares meteorológicos de superficie convencionales de gran escala, ofrece capacidades funcionales suficientes para apoyar la toma de decisiones operativas y la vigilancia atmosférica localizada.

Como trabajo futuro, se plantea la optimización de los algoritmos de procesamiento digital para mejorar la resolución espacial y temporal de la información presentada, así como la integración del sistema en redes meteorológicas terrestres y plataformas de fusión de datos. Adicionalmente, se prevé la evaluación del desempeño del sistema en condiciones meteorológicas diversas y su escalamiento hacia configuraciones multi-sensor que amplíen su alcance operativo.

REFERENCIAS

[1] IDEAM, "CLIMA - IDEAM". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://archivo.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima

[2] J. C. Daza Rincón, R. E. Ucros Rojas, y L. F. Mónico Muñoz, "Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas", *Cienc. Poder Aéreo*, vol. 20, núm. 1 (Enero-Junio), pp. 59–67, 2025.

[3] Contraloría, "Contraloría General logra resarcimiento por $22 mil millones, con la puesta en funcionamiento de 4 radares meteorológicos del IDEAM", Contraloria. Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.contraloria.gov.co/w/contraloria-general-logra-resarcimiento-por-22-mil-millones-con-la-puesta-en-funcionamiento-de-4-radares-meteorologicos-del-ideam

[4] IDEAM, "¿Qué es un radar meteorológico? Ideam explica cómo esta tecnología permite monitorear el clima en Colombia | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/noticia/que-es-un-radar-meteorologico-ideam-explica-como-esta-tecnologia-permite-monitorear-el-clima-en

[5] "Avionics Source: New & Used Avionics Sales. Instruments. Aircraft Parts. Pilot Supplies.", AvionicsSource.com. Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://avionicssource.com/

[6] J. M. Quiroga, "Primeros desarrollos de tecnología radar en los principales beligerantes de la II Guerra Mundial. Un análisis desde la perspectiva Ciencia, Tecnología y Sociedad", *Cienc. Docencia Tecnol.*, vol. 29, núm. 57, pp. 36–59, 2018.

[7] Aeronaves y aviación, "Radar meteorológico de avión: todo lo que debes saber sobre esta tecnología indispensable - Aeronaves y Aviación", el 9 de septiembre de 2024. Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://aeronavesyaviacion.com/radar-meteorologico-de-avion/

[8] Training weather services, "History of RADAR". Consultado: el 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://training.weather.gov/nwstc/NEXRAD/RADAR/Section1-1.html

[9] B. M. Ferber y T. A. da Silva, "INTERPRETAÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO E A TOMADA DE DECISÃO: UMA DISCUSSÃO ACERCA DO CONHECIMENTO ADQUIRIDO SOBRE METEOROLOGIA NOS CURSOS DE FORMAÇÃO DE PILOTO COMERCIAL NO BRASIL: INTERPRETATION OF WEATHER RADAR AND DECISION MAKING: A DISCUSSION ABOUT THE METEOROLOGICAL KNOWLEDGE ACQUIRED IN COMMERCIAL PILOT TRAINING COURSES IN BRAZIL", *Rev. Bras. Aviação Civ. Ciênc. Aeronáuticas*, vol. 3, núm. 3, pp. 151–180, jul. 2023.

[10] V. Guerrero, "Radar Meteorológico de los Aviones | Museo Aeronáutico de Málaga". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://aeromuseo.org/radar-meteorologico-de-los-aviones/

[11] "Con una inversión de $345.000 millones la Aerocivil adquirirá 14 radares". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://caracol.com.co/2023/08/16/con-una-inversion-de-345000-millones-la-aerocivil-adquirira-14-radares/

[12] TEDAE, "Los mecanismos de seguridad en los aviones ante fenómenos meteorológicos adversos", TEDAE. Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tedae.org/aeronautica/los-mecanismos-de-seguridad-en-los-aviones-ante-fenomenos-meteorologicos-adversos/

[13] ScienceDirect, "Radar de banda X: una visión general | Temas de ScienceDirect". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/x-band-radar

[14] R. O. Cubillos Sánchez, E. G. Vargas, O. D. Montoya, R. O. Cubillos Sánchez, E. G. Vargas, y O. D. Montoya, "Modelo para la Detección y Eliminación de Ecos de Tierra en Radares Meteorológicos en Banda C", *Cienc. En Desarro.*, vol. 15, núm. 1, pp. 70–83, jun. 2024, doi: 10.19053/01217488.v15.n1.2024.16631.

[15] L. P. S. Maldonado, "Implementación y evaluación de un sistema de asimilación de datos de radar meteorológico en escala convectiva para el desarrollo de un sistema de pronóstico por ensambles a muy corto plazo", 2022.

[16] D.-I. (FH) C. Wolff, "Fundamentos de radar - Coherencia". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.radartutorial.eu/11.coherent/co05.es.html

[17] A. B. Technology, "Avionics Test & Simulation Terms and Definitions", 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.acalbfi.com/media/pdf/Whitepaper-Avionics-test-and-simulation-terms-and-definitions.pdf

[18] A. E. de Meteorología, "Interpretación - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España". Consultado: el 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radar/ayuda

[19] Astronics, "Tutoriales de bus de datos de aviónica | Astronics". Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.astronics.com/avionics-databus-tutorials

[20] "Alta ARINC Summary". Consultado: el 15 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.altadt.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2013/11/ARINC-Protocol-Summary.pdf

[21] S. Lee, "The Science Behind Radar: Atmospheric Insights". Consultado: el 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.numberanalytics.com/blog/science-behind-radar-atmospheric-insights

[22] I. Yuste Avilés, "Impacto de la meteorología en la operativa aeroportuaria: análisis en el aeropuerto de Bilbao", jun. 2023, Consultado: el 30 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://titula.universidadeuropea.com/handle/20.500.12880/5196

[23] ibreTex, "8.2: Weather Radars - Geosciences LibreTexts". Consultado: el 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/08%3A_Satellites_and_Radar/8.02%3A_Weather_Radars

[24] "HONEYWELL BENDIX/KING RDR 2000 INSTALLATION MANUAL Pdf Download", ManualsLib. Consultado: el 15 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.manualslib.com/manual/3351223/Honeywell-Bendix-King-Rdr-2000.html

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores confirman que este trabajo no ha sido utilizado ni publicado en ningún otro lugar. Los autores también confirman que no hay conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Carlos Daniel Guerrero Hernández, Paula Rocío Macías Castillo, Miguel Ángel Rincón Otalora, Ingrid Carolina Oyaga Padilla, Jhon Alexander Cárdenas Puentes.

Redacción - revisión y edición: Carlos Daniel Guerrero Hernández, Paula Rocío Macías Castillo, Miguel Ángel Rincón Otalora, Ingrid Carolina Oyaga Padilla, Jhon Alexander Cárdenas Puentes.