



Desarrollo de un Sistema de Monitoreo de Tráfico Aéreo que Implemente Tecnología ADS-B

Trabajo de posgrado para acceder al título de
Especialista en Gestión de la Innovación y la Vinculación Tecnológica

Estudiante:
Ing. Damián Héctor PRIMO

Director:
Mg. Ing. Manuel AMOR

Universidad Nacional de Rosario
Centro de Estudios Interdisciplinarios
Especialización en Gestión de la Innovación y la Vinculación
Tecnológica

2025

A mi compañera de vida, a mi hijo del corazón, por ser pilares fundamentales en cada paso,

A mis padres y mis hermanos.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aeronáuticas y a la Dirección General de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Argentina y a todo su personal por acompañarme en esta formación personal,

A mis amigos y compañeros de trabajo de la Universidad Nacional de Río Cuarto,

Al Centro de Estudios Interdisciplinarios de la Universidad Nacional de Rosario, y todo el grupo de docentes y no docentes que la conforman

y a mi querida Argentina, que a través de su sistema de educación pública me dio la oportunidad de llegar a donde estoy hoy...

MUCHISIMAS GRACIAS!

Abstract

This thesis presents the design, development, and experimental validation of a ground station for air traffic monitoring, implementing Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) technology and Software Defined Radio (SDR) within the framework of the V-model for critical systems engineering. The work addresses the technical, regulatory, and operational challenges of modern air traffic surveillance by integrating modular hardware, open-source software, and rigorous systems engineering practices. The solution enables real-time acquisition, decoding, and analysis of ADS-B signals, providing reliable data on aircraft position, identification, and status. The research includes a thorough review of the evolution of air traffic control systems, the fundamentals of ADS-B and GNSS integration, and the distinctive roles of ADS-B OUT and IN. Experimental results in both laboratory and real-world scenarios demonstrate the system's high sensitivity, coverage, and resilience, validating its competitiveness with commercial solutions and its adaptability for future upgrades. The discussion critically examines the system's limitations, such as data management and cybersecurity vulnerabilities, and proposes lines of improvement including the incorporation of artificial intelligence and advanced security protocols. The thesis concludes that the developed SDR-based ADS-B ground station represents a flexible, scalable, and sustainable alternative for contemporary airspace management. Its open architecture and comprehensive documentation facilitate technology transfer, professional training, and collaborative innovation, contributing to the democratization and digital transformation of aviation surveillance.

Resumen

Esta tesis de especialización presenta el diseño, desarrollo y validación experimental de una estación terrena para el monitoreo del tráfico aéreo, implementando tecnología ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) y radio definida por software (SDR) bajo el marco metodológico del modelo en V para sistemas críticos. El trabajo aborda los desafíos técnicos, regulatorios y operativos de la vigilancia aérea moderna a través de la integración de hardware modular, software de código abierto y prácticas rigurosas de ingeniería de sistemas. La solución propuesta permite la adquisición, decodificación y análisis en tiempo real de señales ADS-B, proporcionando datos fiables sobre posición, identificación y estado de aeronaves. La investigación incluye una revisión exhaustiva de la evolución de los sistemas de control del tráfico aéreo, los fundamentos del ADS-B y la integración con GNSS, así como los roles diferenciados de ADS-B OUT e IN. Los resultados experimentales, tanto en laboratorio como en entornos reales, demuestran alta sensibilidad, amplia cobertura y resiliencia operativa, validando la competitividad del sistema frente a soluciones comerciales y su adaptabilidad para futuras mejoras. La discusión crítica analiza las limitaciones del sistema, como la gestión de datos y las vulnerabilidades de ciberseguridad, proponiendo líneas de mejora que incluyen la incorporación de inteligencia artificial y protocolos de seguridad avanzados.

La tesis concluye que la estación terrena ADS-B basada en SDR desarrollada representa una alternativa flexible, escalable y sostenible para la gestión contemporánea del espacio aéreo. Su arquitectura abierta y documentación integral facilitan la transferencia tecnológica, la formación profesional y la innovación colaborativa, contribuyendo a la democratización y transformación digital de la vigilancia aeronáutica.

Índice general

Capítulo 1.	16
Introducción	16
1.1 Contexto y Motivación	16
1.2 Antecedentes de la Vigilancia Aérea	17
1.3 Objetivos de la Tesis	19
1.4 Alcance y Organización del Documento	21
Capítulo 2.	23
Estudio de los sistemas ADS-B y su principio de funcionamiento.	23
2.1 Evolución del control de tráfico aéreo	23
2.2 Definición y fundamentos de ADS-B.....	25
2.3 Diferencias entre ADS-B OUT y ADS-B IN	27
2.4 Estructura de los mensajes ADS-B (DF17).....	29
2.5 Integración del GNSS en ADS-B	32
2.6 Radio Definida por Software (SDR)	33
2.7 Arquitectura técnica de transmisión y recepción ADS-B	35
2.8 Componentes principales de la arquitectura ADS-B	35
2.9 Frecuencias y protocolos de transmisión	36
2.9.1 El ADS-B utiliza principalmente dos canales de transmisión:.....	36
2.9.2 Flujo de información y topologías de red	36
2.9.3 Aspectos técnicos avanzados.....	37
2.9.4 Seguridad y redundancia	38
2.9.5 Escalabilidad y futuro de la arquitectura ADS-B.....	38
2.10 Conclusión del capítulo.....	38
Capítulo 3.	40
Modelo en V para el desarrollo de software e integración de hardware en sistemas ADS-B40	
3.1 Introducción al modelo en V en sistemas críticos	40
3.2 Análisis de requerimientos en sistemas ADS-B basados en SDR.....	42
3.2.1 Requerimientos funcionales.....	42
3.2.2 Técnicas y herramientas para la captura y gestión de requerimientos	43
3.2.3 Gestión de requerimientos en el ciclo de vida.....	44
3.2.4 Consideraciones de ciberseguridad y sostenibilidad	44
3.3 Diseño del sistema: arquitectura de hardware y software	45

3.3.1	Principios de diseño modular y arquitectura de referencia	45
3.3.2	Diseño de hardware.....	46
3.3.3	Diseño de software	46
3.3.4	Integración hardware-software.....	47
3.3.5	Seguridad, robustez y escalabilidad.....	48
3.3.6	Ejemplos y mejores prácticas	48
3.4	Desarrollo e implementación	48
3.4.1	Desarrollo de software embebido y procesamiento de señales.....	48
3.4.2	Integración de hardware SDR y validación funcional	49
3.4.3	Prácticas de desarrollo seguro y documentación	49
3.4.4	Prototipado, pruebas y validación incremental.....	50
3.4.5	Desafíos y soluciones en la implementación.....	50
3.4.6	Aseguramiento de la calidad y mejora continua	50
3.5	Integración de hardware y software	51
3.5.1	Estrategias de integración progresiva y validación cruzada	51
3.5.2	Herramientas de simulación y pruebas en laboratorio	52
3.5.3	Sinergia entre GNU Radio, SDR y módulos embebidos.....	52
3.5.4	Factores técnicos clave: temporización, buffers y sincronización.....	53
3.5.5	Protocolos, estándares y normativas	53
3.5.6	Pruebas de integración en entornos simulados y reales	54
3.5.7	Documentación, trazabilidad y mejores prácticas	54
3.5.8	Ejemplos y tendencias en la industria	54
3.6	Verificación y validación en sistemas críticos	55
3.6.1	Modelos y niveles de pruebas.....	55
3.6.2	Certificación y normativas aplicables	56
3.6.3	Estrategias de validación en escenarios reales y simulados	56
3.6.4	Verificación cruzada hardware-software y retroalimentación.....	57
3.6.5	Documentación, trazabilidad y conformidad.....	57
3.6.6	Mejores prácticas y tendencias.....	57
3.7	Despliegue, mantenimiento y mejora continua.....	58
3.7.1	Estrategias para el despliegue seguro y eficiente	58
3.7.2	Monitorización y gestión de incidencias	59
3.7.3	Mantenimiento preventivo, correctivo y evolutivo	59
3.7.4	Gestión del ciclo de vida y mejora continua	60
3.7.5	Sostenibilidad y resiliencia tecnológica	61

3.8	Conclusión del capítulo.....	61
Capítulo 4.		63
Diseño y desarrollo de la estación terrena utilizando modelo en V.....		63
4.1	Especificación y selección de hardware.....	63
4.1.1	Criterios de selección de hardware.....	63
4.1.2	Evaluación comparativa y justificación.....	64
4.1.3	Pruebas de recepción y validación	65
4.1.4	Documentación y mantenimiento.....	65
4.1.5	Consideraciones de escalabilidad y sostenibilidad.....	65
4.2	Desarrollo e integración de software.....	66
4.2.1	Selección de herramientas y lenguajes de programación	66
4.2.2	Desarrollo modular y pruebas unitarias.....	67
4.2.3	Gestión de la comunicación y sincronización.....	68
4.2.4	Visualización y almacenamiento de datos.....	68
4.2.5	Validación y documentación	68
4.2.6	Sostenibilidad, actualización y ciberseguridad	68
4.3	Resultados y validación experimental.....	68
4.3.1	Metodología de validación	69
4.3.2	Resultados cuantitativos	69
4.3.3	Resultados cualitativos	70
4.3.4	Limitaciones y desafíos encontrados	70
4.3.5	Conclusión de la validación experimental	71
4.4	Conclusiones del capítulo.....	71
Capítulo 5.		72
Resultados y análisis		72
5.1	Discusión y análisis crítico.....	72
5.1.1	Análisis de robustez y eficiencia	72
5.1.2	Comparación con sistemas comerciales y literatura técnica	73
5.1.3	Limitaciones técnicas y operativas.....	73
5.1.4	Implicancias de seguridad y regulatorias	73
5.1.5	Propuestas de mejora y líneas de investigación futura	73
5.1.6	Valor académico y social	74
5.1.7	Conclusión del análisis	74
5.2	Presentación estadística y cualitativa de datos.....	74
5.2.1	Metodología de recolección de datos.....	75

5.2.2	Indicadores cuantitativos	77
5.2.3	Resultados cualitativos	77
5.2.4	Comparación con sistemas comerciales y académicos	78
5.2.5	Lecciones aprendidas y recomendaciones inmediatas	80
5.3	Interpretación y comparación con el estado del arte	80
5.3.1	Significado y relevancia de los hallazgos	80
5.3.2	Comparación técnica con sistemas comerciales y académicos	81
5.3.3	Análisis FODA de la solución desarrollada	81
5.3.4	Implicancias tecnológicas, regulatorias y operativas.....	81
5.3.5	Recomendaciones para la evolución futura	81
5.3.6	Análisis de resultados	81
5.4	Síntesis y recomendaciones	82
5.4.1	Aportes académicos y tecnológicos	82
5.4.2	Recomendaciones para la mejora continua	82
5.4.3	Proyección social y operativa.....	83
5.4.4	Conclusión del capítulo.....	83
Capítulo 6.	84
Conclusiones y recomendaciones.....	84
6.1	Cumplimiento de los objetivos	84
6.2	Conclusiones generales	84
6.3	Soberanía y seguridad en vigilancia aérea	84
6.4	Recomendaciones y Trabajo Futuros	87
Bibliografía.....	89

Índice de Figuras:

Figura 1: Evolución histórica del monitoreo de tráfico aéreo y tendencias de crecimiento global. Previsión de vuelos con crecimiento total entre 2019 y 2050.....	17
Figura 2: Línea de tiempo de la evolución de los sistemas de vigilancia aérea.	18
Figura 3: Comparativa entre radar primario, radar secundario y ADS-B.....	19
Figura 4: Mapa conceptual de los objetivos de la tesis.....	20
Figura 5: Línea de tiempo de la evolución del control de tráfico aéreo.	24
Figura 6: Comparativa entre vigilancia basada en radar y vigilancia cooperativa ADS-B. ..	24
Figura 7: Principio de funcionamiento del sistema ADS-B y sus componentes principales. 26	
Figura 8: Esquema funcional de ADS-B OUT y ADS-B IN en una aeronave y su interacción con estaciones terrestres.	28
Figura 9: Comparativa funcional y de aplicación entre ADS-B OUT y ADS-B IN.	29
Figura 10: Estructura binaria y campos de un mensaje DF17 ADS-B.	30
Figura 11: Ejemplo de trama DF17 y proceso de decodificación de posición y velocidad. .	31
Figura 12: Ejemplo de vulnerabilidades potenciales del enlace GNSS y estrategias de mitigación.....	33
Figura 14: Diagrama de bloques de la arquitectura técnica de ADS-B, mostrando transpondedor, antena, GNSS, estación terrena, red de datos y displays.....	37
Figura 15: Esquema de flujo de información ADS-B: desde el GNSS a la visualización en pantalla, pasando por la transmisión, recepción y procesamiento.....	38
Figura 16: Esquema del modelo en V aplicado a sistemas embebidos críticos.	41
Figura 17: Relación entre fases del modelo en V y actividades de validación/verificación en el desarrollo de estaciones ADS-B.....	42
Figura 18: Flujo de requerimientos funcionales en una estación ADS-B SDR.	43
Figura 19: Resumen gráfico de los requerimientos críticos en sistemas ADS-B basados en SDR.	45
Figura 21: Flujo de señal software: procesamiento de datos I/Q, decodificación, extracción de parámetros y visualización.	47
Figura 22: Diagrama de flujo de bloques GNU Radio para recepción y decodificación de tramas ADS-B.	49
Figura 23: Esquema de banco de pruebas y validación experimental de una estación ADS-B SDR.....	50
Figura 24: Flujo de iteraciones en el desarrollo e implementación de sistemas embebidos críticos Implementando Diseño en V.....	51
Figura 25: Flujo de integración bottom-up/top-down en sistemas embebidos críticos.	52
Figura 26: Topología de integración hardware-software en una estación ADS-B SDR.....	53
Figura 27: Esquema de pruebas de integración y validación en campo de sistemas ADS-B.	54
Figura 28: Pirámide de pruebas en el modelo en V: unitarias, integración, sistema y aceptación.	56
Figura 29: Ciclo de retroalimentación entre verificación, validación y mejora continua.....	57
Figura 32: Ciclo de vida del mantenimiento de sistemas ADS-B SDR: preventivo, correctivo y evolutivo.....	60
Figura 33: Resumen gráfico del ciclo de vida de desarrollo en V aplicado a sistemas ADS-B SDR.....	62

Figura 34: Esquema de interconexión de los bloques físicos de la estación terrena ADS-B SDR.....	64
Figura 35: Banco de pruebas para validación de hardware SDR y antenas en laboratorio y campo.....	65
Figura 36: Diagrama de bloques de software GNU RADIO (arriba) y Visualización en Sistema Comercial(abajo): flujo desde la adquisición de datos SDR hasta la visualización y almacenamiento.....	67
Figura 37: Diagrama de banco de pruebas y escenarios de validación experimental.....	69
Figura 39: Mapa de propuestas de mejora e investigación futura para estaciones SDR-ADS-B.....	74

Índice de Tablas:

Tabla 1: Ejemplo de matriz de trazabilidad de requisitos en sistemas críticos.....	44
Tabla 2: Distribución estadística de tramas capturadas, por distancia y condiciones ambientales.	76
Tabla 3: Análisis comparativo de indicadores clave entre estación SDR-ADS-B, sistemas comerciales y referencias académicas.....	79

Siglas y acrónimos:

1090ES	1090 MHz Extended Squitter (Extended Squitter en 1090 MHz)
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance — Broadcast</i> (Vigilancia Dependiente Automática — Radiodifusión)
ADS-B OUT	Modo de transmisión ADS-B desde la aeronave (envío de posición/identificación)
ADS-B IN	Modo de recepción ADS-B (recepción de información de otras aeronaves/estaciones)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
ARINC	Aeronautical Radio, Incorporated (estándares de comunicaciones aeronáuticas)
ATM	<i>Air Traffic Management</i> (Gestión del Tráfico Aéreo)
CPR	<i>Compact Position Reporting</i> (Reporte Compacto de Posición)
DF17	<i>Downlink Format 17</i> (Formato de enlace descendente 17 — trama ADS-B)
DF18	<i>Downlink Format 18</i> (Formato de enlace descendente 18)
DF19	<i>Downlink Format 19</i> (Formato de enlace descendente 19)
DO-178C	Estándar para certificación de software aeronáutico (software crítico)
DO-254	Estándar para certificación de hardware aeronáutico (hardware crítico)
DO-260	Estándar RTCA para transmisión ADS-B (específica DF17, etc.)
ED-102	EUROCAE ED-102 (documento/estándar EUROCAE relacionado con ADS-B)

EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i> (Agencia Europea para la Seguridad Aérea)
EUROCAE	European Organisation for Civil Aviation Equipment (organismo de estándares)
EUROCONTROL	Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i> (Matricial de Puertas Programable en Campo)
GANP	<i>Global Air Navigation Plan</i> (Plan Mundial de Navegación Aérea — ICAO)
GLONASS	Sistema GNSS ruso (GLObal NAVigation Satellite System – nombre usado internacionalmente)
GNU Radio	Plataforma de procesamiento de señales SDR (radio definida por software)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamiento Global — EE. UU.)
GUI	<i>Graphical User Interface</i> (Interfaz gráfica de usuario)
I/Q	<i>In-phase / Quadrature</i> (componentes en fase y en cuadratura de la señal)
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i> (Preamplificador de bajo ruido)
MDPI	<i>Multidisciplinary Digital Publishing Institute</i> (editorial, aparece en bibliografía)
MLAT	<i>Multilateration</i> (multilateración — técnica de localización)
NTP	<i>Network Time Protocol</i> (Protocolo de Tiempo de Red)
OCXO	<i>Oven Controlled Crystal Oscillator</i> (Oscilador de cristal controlado por horno)

PCIe	<i>Peripheral Component Interconnect Express</i> (bus de interconexión)
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i> (Modulación por Posición de Pulsos)
PSR	<i>Primary Surveillance Radar</i> (Radar Primario de Vigilancia)
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express (bus de alta velocidad)
PWM / PAM / PPM	(aparecen en secciones relacionadas con modulaciones — PPM ya definido arriba)
RTL-SDR	Receptor SDR basado en chipset RTL (RTL2832U-based Software Defined Radio)
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i> (organismo de estándares)
SBC	<i>Single-Board Computer</i> (computadora de placa única)
SDR	<i>Software Defined Radio</i> (Radio Definida por Software)
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i> (Investigación del Cielo Único Europeo)
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relación señal-ruido)
SSR	<i>Secondary Surveillance Radar</i> (Radar Secundario de Vigilancia / transpondedor)
TCXO	<i>Temperature Compensated Crystal Oscillator</i> (Oscilador compensado en temperatura)
TDOA	<i>Time Difference Of Arrival</i> (Diferencia de Tiempo de Llegada — técnica de localización)
TIS-B	<i>Traffic Information Service — Broadcast</i> (Servicio de Información de Tráfico – Radiodifusión)
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i> (familia de protocolos de red)

TIS-B	Traffic Information Service — Broadcast (ya listado arriba)
UAT	<i>Universal Access Transceiver</i> (Transceptor de Acceso Universal — canal 978 MHz)
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> (protocolo de datagramas, capa de transporte)
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> (plataforma SDR de Ettus / USRP)
V&V	<i>Verification & Validation</i> (Verificación y Validación)
V-model / Modelo en V	Modelo de ciclo de vida (no sigla, pero usado como término metodológico)
NextGen	Next Generation Air Transportation System (programa de modernización — FAA)

Capítulo 1.

Introducción

1.1 Contexto y Motivación

El monitoreo del tráfico aéreo constituye un desafío tecnológico y operativo central para la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la aviación moderna. El crecimiento exponencial del tráfico aéreo a nivel global (Figura 1), impulsado por la expansión del transporte comercial, el aumento de vuelos regionales y la creciente demanda de transporte de mercancías, ha puesto a prueba los sistemas de vigilancia aérea tradicionales. Según la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), se proyecta que para el año 2040 el número de pasajeros aéreos se duplicará respecto a los niveles actuales, lo que exigirá una mayor capacidad de gestión, seguridad y eficiencia en los sistemas de control del tráfico aéreo (ICAO, 2018).

Las tecnologías tradicionales de vigilancia, como el radar primario y secundario, presentan limitaciones en términos de cobertura, precisión y capacidad de integración con nuevas herramientas digitales. Estas restricciones son especialmente críticas en regiones remotas, océanos y zonas montañosas, donde la infraestructura terrestre es escasa o inexistente. Además, la digitalización y la convergencia de tecnologías de la información han abierto nuevas posibilidades para la vigilancia aérea cooperativa, permitiendo el desarrollo de sistemas más flexibles, escalables y resilientes frente a los desafíos de seguridad y ciberseguridad (Strohmeier et al., 2017).

La necesidad de modernización tecnológica en el ámbito de la vigilancia aérea se ha vuelto imperativa, en línea con iniciativas internacionales como NextGen en Estados Unidos y SESAR en Europa. Estas estrategias buscan potenciar la eficiencia operativa, la seguridad y la sostenibilidad del sector, promoviendo la adopción de tecnologías cooperativas como el ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast), que permiten una vigilancia continua, precisa y de bajo costo en comparación con los sistemas tradicionales.

Previsión de vuelos mundiales, con crecimiento total entre 2019 y 2050

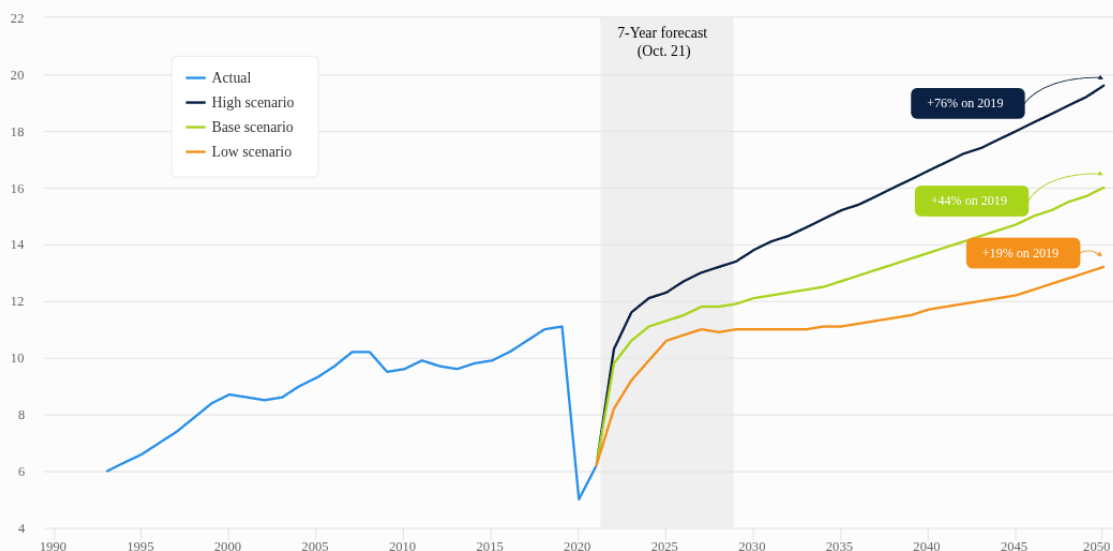


Figura 1: Evolución histórica del monitoreo de tráfico aéreo y tendencias de crecimiento global. Previsión de vuelos con crecimiento total entre 2019 y 2050.

El contexto actual exige soluciones innovadoras que garanticen la integridad, disponibilidad y confiabilidad de la información de tráfico aéreo, facilitando la toma de decisiones en tiempo real y la gestión colaborativa entre pilotos, controladores y organismos reguladores. En este escenario, el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en tecnología ADS-B representa una contribución relevante para afrontar los retos de la aviación contemporánea.

1.2 Antecedentes de la Vigilancia Aérea

La vigilancia aérea ha experimentado una notable evolución desde sus orígenes, marcada por el desarrollo de tecnologías que han permitido incrementar la seguridad, eficiencia y capacidad de gestión del tráfico aéreo. Observando la Figura 2, podemos observar que inicialmente, el control de tráfico aéreo se basaba en métodos visuales y comunicaciones por radio, lo que limitaba la cobertura y la precisión de la localización de aeronaves.

La introducción del radar primario durante la Segunda Guerra Mundial constituyó un hito fundamental, permitiendo la detección de objetos aéreos mediante el rebote de ondas electromagnéticas. Sin embargo, esta tecnología presentaba limitaciones, como la incapacidad para identificar a las aeronaves y la dependencia de condiciones atmosféricas favorables. El radar secundario de vigilancia (SSR) resolvió parcialmente estos problemas al incorporar transpondedores a bordo de las aeronaves, que respondían a las señales emitidas desde tierra con información de identificación y altitud (EUROCONTROL, 2017). Una comparativa entre ambos se puede observar en la Figura 3.

A pesar de estas mejoras, los sistemas de radar presentan restricciones en términos de cobertura —especialmente en zonas oceánicas, montañosas o de baja densidad de infraestructura— y de precisión en el seguimiento de trayectorias. Además, el incremento sostenido del tráfico aéreo ha puesto de manifiesto la necesidad de sistemas más avanzados y cooperativos, capaces de ofrecer vigilancia en tiempo real, con mayor resolución espacial y temporal (Strohmeier et al., 2017).

La aparición de tecnologías como la multilateración y, posteriormente, el ADS-B, ha permitido superar muchas de las barreras impuestas por los sistemas convencionales. El ADS-B, en particular, aprovecha la capacidad de los sistemas GNSS para determinar la posición exacta de la aeronave, transmitiéndola automáticamente a través de enlaces de radio digital. Este enfoque ha facilitado la transición hacia un modelo de vigilancia colaborativa y distribuida, donde tanto las aeronaves como las estaciones terrestres comparten información en tiempo real.

Línea de tiempo de la evolución de los sistemas de vigilancia aérea

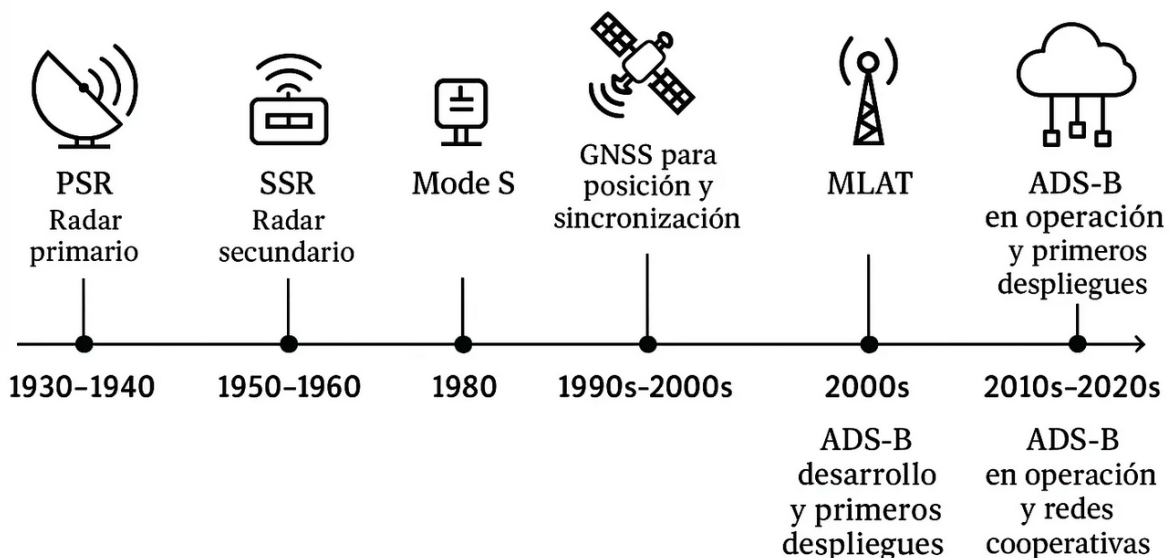


Figura 2: Línea de tiempo de la evolución de los sistemas de vigilancia aérea.

En el contexto internacional, programas como NextGen en Estados Unidos y SESAR en Europa han impulsado la adopción de sistemas cooperativos, fijando estándares de interoperabilidad y seguridad que orientan la modernización global del sector (FAA, 2020; SESAR JU, 2019). No obstante, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos relacionados con la inversión en infraestructura, la capacitación de personal y la actualización de normativas.

La literatura científica y técnica destaca la importancia de continuar investigando y desarrollando sistemas que garanticen la seguridad, la eficiencia y la resiliencia del control del tráfico aéreo, en un contexto de creciente complejidad y exigencia operativa (ICAO, 2018).

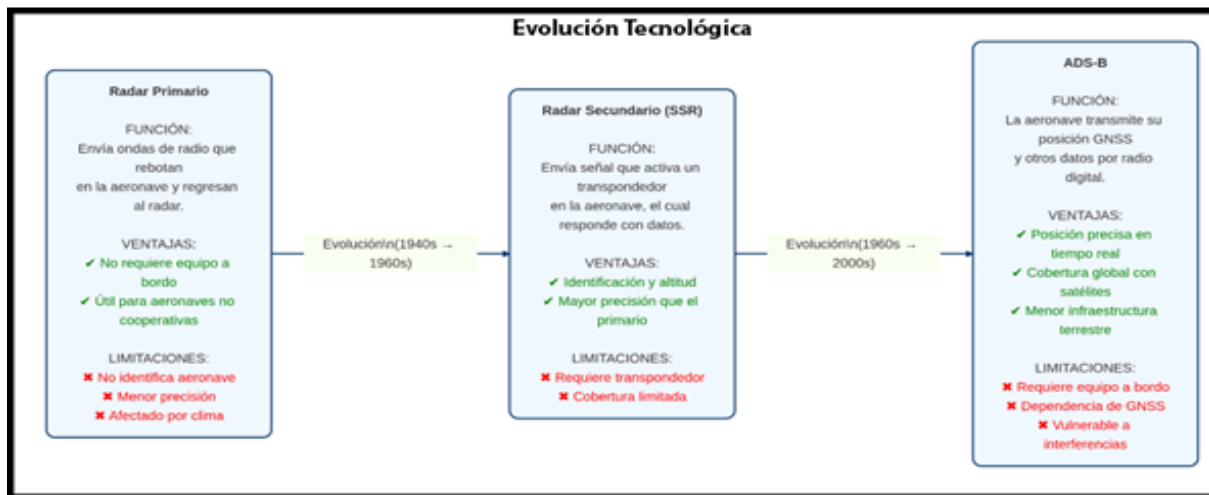


Figura 3: Comparativa entre radar primario, radar secundario y ADS-B.

1.3 Objetivos de la Tesis

El presente trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo, implementación y validación de una estación terrena para el monitoreo de tráfico aéreo utilizando tecnología ADS-B y radio definida por software (SDR), bajo un enfoque metodológico basado en el modelo en V. Este objetivo responde a la necesidad de modernizar la vigilancia aérea, mejorando la precisión, cobertura y eficiencia operativa mediante la integración de soluciones tecnológicas flexibles, escalables y alineadas con los estándares internacionales vigentes.

Objetivo General:

- Desarrollar e implementar una estación terrena para la recepción, decodificación y procesamiento de datos ADS-B, empleando tecnología SDR y siguiendo las mejores prácticas de ingeniería de sistemas críticos.

Objetivos Específicos:

1. Analizar el estado del arte de los sistemas de vigilancia aérea, con énfasis en la evolución tecnológica, los estándares internacionales y las mejores prácticas en la gestión de tráfico aéreo.
2. Definir los requerimientos funcionales y no funcionales de una estación terrena ADS-B basada en SDR, considerando aspectos de seguridad, interoperabilidad, rendimiento y cumplimiento normativo.
3. Diseñar la arquitectura de hardware y software de la estación, seleccionando componentes, herramientas y metodologías que garanticen la confiabilidad, escalabilidad y facilidad de mantenimiento del sistema.

4. Implementar los módulos de adquisición, procesamiento y visualización de datos ADS-B, integrando bloques funcionales en GNU Radio y herramientas de desarrollo de software crítico.
5. Validar experimentalmente el desempeño de la estación, comparando los resultados con sistemas comerciales y bases de datos oficiales, y evaluando la robustez, precisión y eficiencia del sistema ante distintos escenarios operativos.
6. Documentar exhaustivamente el proceso de desarrollo, pruebas y resultados, asegurando la trazabilidad, replicabilidad y transferencia tecnológica a ámbitos académicos e industriales.

La definición de estos objetivos (Figura 4) se fundamenta en la creciente complejidad del entorno aeronáutico, la necesidad de fortalecer la seguridad operacional y la demanda de soluciones tecnológicas abiertas y adaptables, capaces de responder a los desafíos regulatorios y técnicos que plantea la gestión del espacio aéreo contemporáneo (EUROCONTROL, 2025; ICAO, 2018). Asimismo, la orientación hacia la integración de hardware y software de bajo costo y alta flexibilidad, como el SDR y las plataformas GNU Radio, permite democratizar el acceso a tecnologías avanzadas, fomentar la formación de profesionales especializados y contribuir a la investigación aplicada en vigilancia aérea.



Figura 4: Mapa conceptual de los objetivos de la tesis.

1.4 Alcance y Organización del Documento

El presente trabajo de tesis aborda de manera integral el diseño, desarrollo, implementación y validación de una estación terrena para monitoreo de tráfico aéreo utilizando tecnología ADS-B y radio definida por software (SDR), fundamentando cada etapa en el modelo de desarrollo en V. El alcance del proyecto se circunscribe tanto a los aspectos tecnológicos – hardware y software– como a la metodología de ingeniería aplicada a sistemas críticos, considerando el marco regulatorio internacional y los desafíos operativos del sector aeronáutico contemporáneo.

Desde la perspectiva técnica, el estudio incluye la selección y justificación de componentes de hardware (antenas, módulos SDR, sistemas de procesamiento) y la arquitectura de software basada en GNU Radio, así como la integración de algoritmos para la decodificación de mensajes ADS-B y la visualización de información aeronáutica en tiempo real. El enfoque metodológico adoptado garantiza la trazabilidad, replicabilidad y escalabilidad de la solución, permitiendo su adaptación a diferentes contextos operativos y requerimientos regulatorios.

El alcance de la tesis se delimita en función de los retos específicos abordados, excluyendo aquellos elementos que, si bien pueden estar relacionados, no forman parte directa del objetivo principal. Por ejemplo, no se incluye el desarrollo de infraestructura aeroportuaria a gran escala, ni la integración con sistemas nacionales de gestión de tráfico aéreo, aunque sí se discuten los requerimientos de interoperabilidad y compatibilidad que permitirían una futura integración. Asimismo, se enfoca en la recepción y procesamiento de tramas ADS-B en tierra, sin abordar el desarrollo de transpondedores embarcados ni la certificación aeronáutica de equipos emisores.

El trabajo se apoya en el análisis comparativo de estándares internacionales como DO-260, EUROCAE ED-102 y las recomendaciones de OACI, asegurando el cumplimiento normativo y la vigencia de la solución propuesta. Se enfatiza la necesidad de un sistema abierto y flexible, capaz de adaptarse tanto a contextos experimentales como a entornos operativos reales, promoviendo la transferencia tecnológica y la formación de recursos humanos especializados.

En cuanto a la organización del documento, la estructura se ha diseñado para guiar al lector desde los fundamentos teóricos y antecedentes hasta la validación experimental y las conclusiones estratégicas. El Capítulo 1 introduce el contexto, la justificación y los objetivos de la tesis, proporcionando una visión general de la problemática y la motivación que subyace al proyecto. El Capítulo 2 realiza un análisis detallado de los sistemas ADS-B, describiendo su principio de funcionamiento, evolución y relevancia en la vigilancia aérea moderna. Se abordan las diferencias entre ADS-B OUT y ADS-B IN, la estructura de los mensajes DF17, el uso de GNSS y los aspectos técnicos de transmisión y recepción, proporcionando un marco conceptual robusto para el desarrollo posterior.

El Capítulo 3 expone el modelo en V aplicado al desarrollo de software e integración de hardware, justificando su elección en el contexto de sistemas embebidos críticos. Se detalla cada una de sus fases –análisis de requerimientos, diseño, desarrollo, integración, validación y mantenimiento– y se relaciona con herramientas como GNU Radio y tecnologías SDR, mostrando cómo la metodología elegida contribuye a la calidad y seguridad del sistema.

El Capítulo 4 describe el diseño y desarrollo de la estación terrena, abarcando la selección de hardware, la integración de software y la validación experimental. Se presentan tanto los criterios de selección de componentes como los métodos de integración, pruebas y análisis de resultados, enfatizando la importancia de la documentación, la trazabilidad y la replicabilidad del proceso. Además, se incluyen recomendaciones para la mejora continua y la escalabilidad del sistema, considerando posibles ampliaciones e integraciones futuras.

El Capítulo 5 presenta los resultados del sistema desarrollado, incluyendo análisis estadísticos, comparación con el estado del arte y recomendaciones para futuras mejoras. Se discuten los resultados obtenidos en diferentes escenarios de prueba, analizándose la eficiencia, precisión y robustez del sistema ante condiciones operativas reales. Asimismo, se evalúa el posicionamiento de la solución propuesta frente a sistemas comerciales y antecedentes académicos, identificando fortalezas, debilidades y oportunidades de optimización.

Finalmente, el Capítulo 6 sintetiza las conclusiones generales y formula recomendaciones estratégicas para la evolución e integración de tecnologías ADS-B en la vigilancia aérea. Se reflexiona sobre el impacto académico, tecnológico y social del trabajo realizado, identificando líneas de investigación futura y el potencial de transferencia tecnológica a ámbitos industriales y regulatorios.

Este documento también incluye un apartado de bibliografía, donde se consignan todas las fuentes consultadas a lo largo del trabajo, y anexos con material complementario, diagramas, tablas y códigos fuente relevantes.

Capítulo 2.

Estudio de los sistemas ADS-B y su principio de funcionamiento.

Resumen del capítulo

Este capítulo aborda los fundamentos teóricos, técnicos y operativos de los sistemas ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast), contextualizándolos en la evolución histórica de la vigilancia aérea y la transformación digital del sector. Se describe el principio de funcionamiento del ADS-B, sus diferencias respecto a los sistemas convencionales, y se analizan las principales normativas y estándares internacionales que rigen su despliegue. Asimismo, se examinan los aspectos técnicos de las modalidades ADS-B OUT e IN, la estructura de los mensajes (DF17), el uso de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), y la arquitectura de transmisión y recepción. El objetivo es proporcionar una base conceptual y aplicada que permita comprender la relevancia y los desafíos de los sistemas ADS-B en la gestión contemporánea del tráfico aéreo.

2.1 Evolución del control de tráfico aéreo

El control del tráfico aéreo ha transitado por una evolución tecnológica significativa desde sus orígenes, pasando de métodos visuales y comunicación por radio, a la implementación de sistemas de radar primario y secundario, hasta llegar a las soluciones cooperativas digitales como el ADS-B (Figura 5). En la etapa inicial, el control se basaba en la observación directa y reportes de posición por radio, lo cual era suficiente para una aviación de baja densidad, pero resultaba inadecuado ante el crecimiento del tráfico y la complejidad de las rutas aerocomerciales.

La introducción del radar primario (Primary Surveillance Radar, PSR) durante la Segunda Guerra Mundial permitió detectar aeronaves mediante el rebote de pulsos electromagnéticos, independientemente de que estas colaborarán activamente. Sin embargo, esta tecnología presentaba limitaciones para la identificación y el seguimiento preciso de cada aeronave. El desarrollo posterior del radar secundario (Secondary Surveillance Radar, SSR) incorporó el uso de transpondedores a bordo, permitiendo obtener información de identificación y altitud de las aeronaves, lo que representó un avance crucial en la vigilancia aérea.

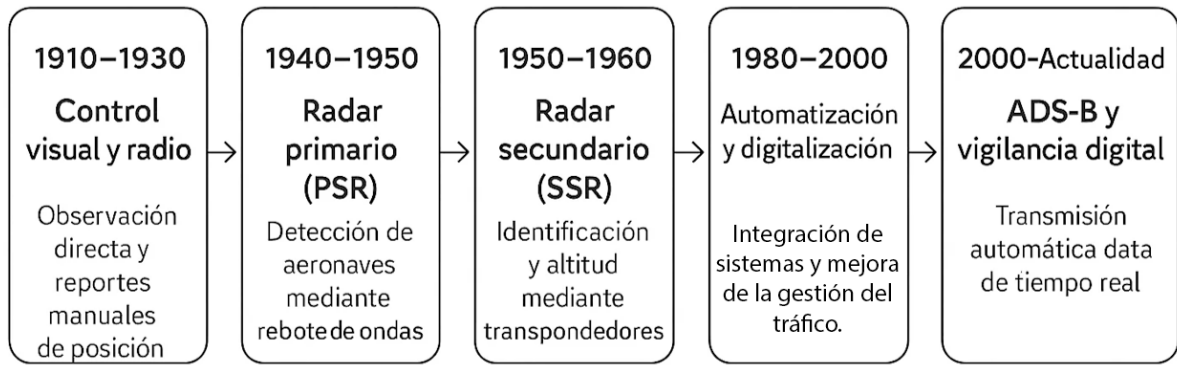


Figura 5: Línea de tiempo de la evolución del control de tráfico aéreo.

A pesar de los avances, los sistemas basados únicamente en radar presentan restricciones de cobertura, especialmente en regiones remotas, oceánicas o de difícil acceso, y requieren infraestructura costosa y mantenimiento especializado. Además, la saturación del espectro radioeléctrico y el aumento del tráfico han puesto en evidencia la necesidad de soluciones más eficientes, precisas y escalables.

La aparición del ADS-B representa una transición hacia la vigilancia aérea cooperativa, en la que las aeronaves transmiten de forma automática y periódica su posición, velocidad, identificación y otros parámetros críticos, utilizando datos obtenidos de sistemas GNSS. Este paradigma ha sido adoptado por programas internacionales como NextGen (Estados Unidos) y SESAR (Europa), orientados a modernizar el control del tráfico aéreo, reducir costos y fortalecer la seguridad operacional.

Comparativa: Vigilancia basada en radar vs Vigilancia cooperativa ADS-B

	 Vigilancia basada en radar		 Vigilancia cooperativa ADS-B
Concepto y origen	PSR Depende de infraestructura		Promitio reo dar Prontirifa Rates 108.5
Fuente de datos	Intraestructura GNSS	→	Precisión Range de tipo de radar
Datos transmitidos	Decectic un posición Baja en el aipéptico ráiodar	←	Alta precisión Maor precisión
Alcance de cobertura	Range de terren Bar sa tipo de radar	→	En tiempo rel Costós relativamente
Precisión y seguimiento	Moderada Precisión alta	←	Menos susceptible Simple a jameai costo
Latencia	Moderada Dalos en tiemporeal	→	Vulnerable a jamming Vulnerable a jamenting as
Escalabilidad y costos	Aíto costos mal Mayór conyo costo	←	Interoperabilidad y estándares Integrar.con NextGen/SESAR
			Usos y limitaciones Sin areas sin ADS-B impleme
			Limitada por GNSS improves en dancia data

PSR Primary Surveillance Radar ADS-B Automatié-clodelincaí-ancisa 1060 ES/UAT Cooperación con NextGen/Sets#Y
SSR Secondary Surveillance Radar GNSS Global Navigation Satellite System Entenda de senales 1088./YUSS

Figura 6: Comparativa entre vigilancia basada en radar y vigilancia cooperativa ADS-B.

En síntesis, la evolución del control de tráfico aéreo responde a la necesidad de superar las limitaciones tecnológicas, económicas y operativas de los sistemas convencionales, posicionando al ADS-B como la piedra angular de la gestión aeronáutica digital del siglo XXI.

2.2 Definición y fundamentos de ADS-B

El sistema ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) constituye un pilar fundamental en la modernización de la vigilancia y gestión del tráfico aéreo, representando un cambio de paradigma respecto a los sistemas tradicionales basados en radar. La esencia de ADS-B radica en su capacidad para transmitir, de manera automática y periódica, información crítica sobre la posición, velocidad, altitud, rumbo, identificación y estado de la aeronave. Estos datos son calculados por el propio avión utilizando sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System) y luego emitidos a través de enlaces de radio digitales, permitiendo que estaciones terrestres y otras aeronaves los reciban en tiempo real.

El término “Automatic Dependent Surveillance – Broadcast” sintetiza las características esenciales del sistema:

- **Automático:** La transmisión de datos se realiza sin intervención del piloto ni del controlador, garantizando la actualización continua y oportuna de la información.
- **Dependiente:** La exactitud y validez de los datos transmitidos dependen de la calidad y confiabilidad de los sensores y sistemas de navegación a bordo, particularmente del GNSS.
- **Vigilancia:** El objetivo principal es proporcionar a los controladores y operadores una imagen precisa y actualizada de la situación aérea, mejorando la conciencia situacional y la seguridad operacional.
- **Broadcast:** La información se difunde de forma abierta (no dirigida), permitiendo que cualquier receptor compatible dentro del área de cobertura pueda captarla y procesarla.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ADS-B

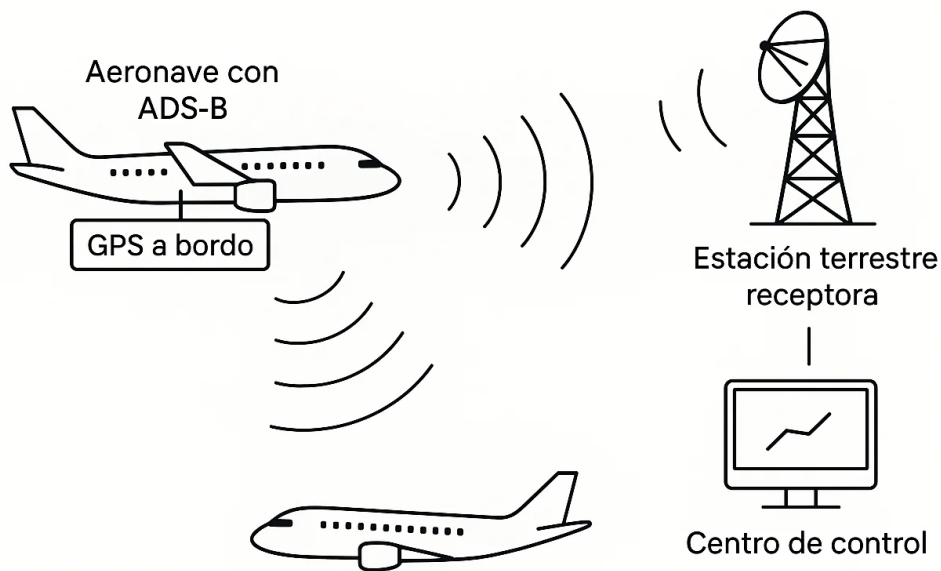


Figura 7: Principio de funcionamiento del sistema ADS-B y sus componentes principales.

A diferencia de los sistemas radar, que requieren infraestructura costosa y dependen de la reflexión de señales para determinar la posición de las aeronaves, ADS-B se basa en la cooperación activa de los aviones, que reportan su posición y otros parámetros críticos en intervalos cortos. Esto permite una vigilancia más precisa y eficiente, con una cobertura global siempre que exista visibilidad de línea recta entre emisor y receptor.

El despliegue de ADS-B está regulado por organismos internacionales como la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), la FAA (Federal Aviation Administration) y la EASA (European Union Aviation Safety Agency), quienes han establecido normativas y estándares técnicos –como el DO-260 y sus revisiones– para asegurar la interoperabilidad, seguridad y confiabilidad del sistema. Estas regulaciones especifican los requerimientos de integridad, disponibilidad, latencia, autenticación de mensajes y compatibilidad electromagnética, así como las frecuencias y protocolos de transmisión.

En la práctica, el ADS-B se integra en los programas de modernización global de la aviación, como NextGen en Estados Unidos y SESAR en Europa, donde se promueve la transición hacia una vigilancia basada en datos digitales, la gestión colaborativa del espacio aéreo y la optimización de rutas, tiempos y consumo de combustible. El sistema no solo facilita la vigilancia en regiones remotas o de difícil acceso, sino que también habilita aplicaciones avanzadas como la separación reducida entre aeronaves, la detección automática de conflictos y la integración con redes de intercambio de datos para la gestión estratégica del tráfico.

Este nuevo paradigma requiere un enfoque holístico en la ingeniería de sistemas críticos, abarcando el diseño robusto de hardware y software, la validación rigurosa y la actualización continua de los estándares tecnológicos y regulatorios. Así, el ADS-B se consolida como la columna vertebral de la vigilancia aérea del siglo XXI, potenciando la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la aviación global.

2.3 Diferencias entre ADS-B OUT y ADS-B IN

El sistema ADS-B se divide en dos modalidades operativas fundamentales: ADS-B OUT y ADS-B IN, cada una de las cuales cumple una función complementaria y estratégica en el ecosistema de vigilancia aérea cooperativa. Comprender sus diferencias y el modo en que interactúan es esencial para el diseño, implementación y operación de sistemas de control del tráfico aéreo de última generación.

ADS-B OUT se refiere a la capacidad de una aeronave de transmitir automáticamente, a intervalos regulares y sin intervención humana, información crítica sobre su posición, velocidad, identificación y otros parámetros relevantes. Este proceso de emisión es continuo y no requiere una solicitud explícita desde tierra o desde otras aeronaves. La transmisión se realiza principalmente a través de dos tecnologías: por un lado, la frecuencia de 1090 MHz Extended Squitter (1090ES), adoptada a nivel global para aviación comercial y transporte aéreo; y por otro, el Universal Access Transceiver (UAT) en 978 MHz, utilizado predominantemente en Estados Unidos para aviación general.

Es pertinente aclarar que Extended Squitter constituye una extensión del protocolo Mode S del sistema de vigilancia secundaria (SSR). A diferencia de los modos tradicionales —Mode A, que transmite únicamente un código de identificación («squawk»), y Mode C, que añade información de altitud—, el Mode S («Selective») permite la interrogación selectiva de aeronaves mediante una dirección única de 24 bits y ofrece mayor capacidad de datos. Extended Squitter potencia aún más esta capacidad al habilitar transmisiones espontáneas (sin requerir interrogación desde tierra) con mensajes de 112 bits, suficientes para incluir datos de posición GNSS, velocidad, rumbo, identificación de la aeronave y estado de emergencia. Esta característica lo convierte en el estándar de facto para ADS-B a nivel mundial.

El objetivo principal de ADS-B OUT es proporcionar a los controladores de tráfico aéreo y a las infraestructuras de vigilancia una fuente confiable y en tiempo real de datos de seguimiento de vuelos. La obligatoriedad de contar con ADS-B OUT en muchas jurisdicciones responde a la necesidad de garantizar la coherencia, integridad y actualización permanente de la información de tráfico, especialmente en espacio aéreo controlado y en zonas donde los sistemas tradicionales de radar presentan limitaciones de cobertura o resolución.

Por su parte, ADS-B IN implica la capacidad de una aeronave de recibir y procesar la información emitida por otros aviones y por las estaciones terrestres del sistema. Esta funcionalidad, aunque no es de uso obligatorio en todas las aeronaves, aporta mejoras sustanciales en la conciencia situacional de los pilotos, permitiéndoles visualizar en tiempo real el tráfico circundante, identificar posibles conflictos y tomar decisiones informadas para la gestión segura de la separación y el tránsito.

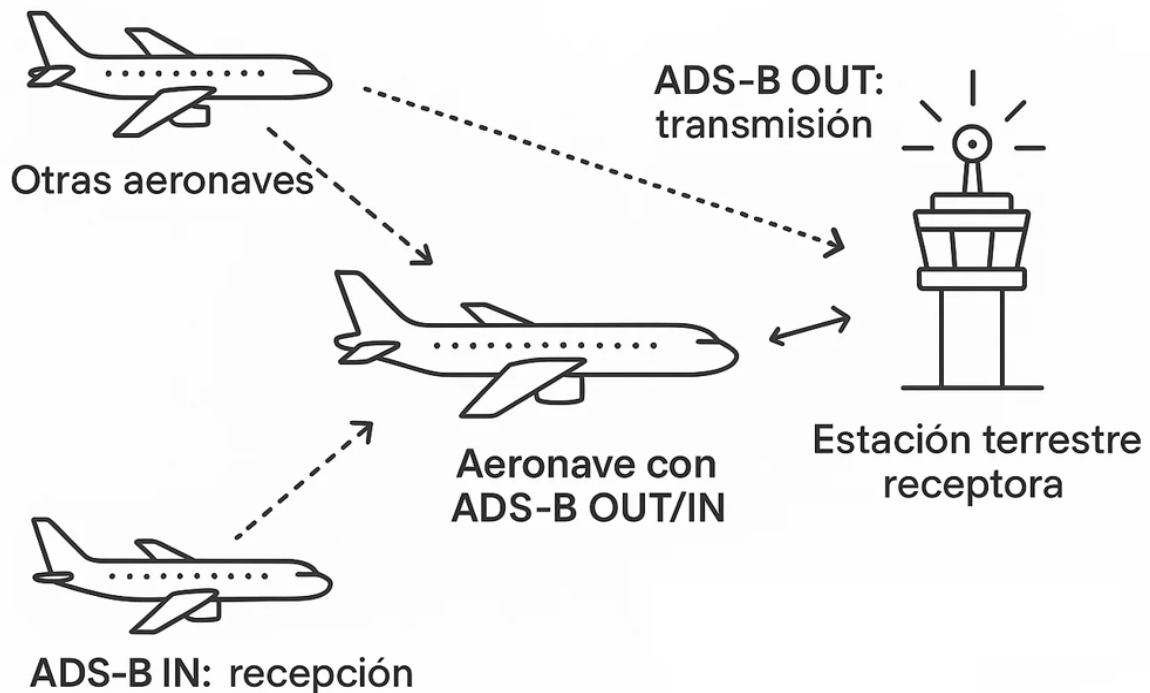


Figura 8: Esquema funcional de ADS-B OUT y ADS-B IN en una aeronave y su interacción con estaciones terrestres.

La implementación de ADS-B IN requiere la integración de displays, sistemas de procesamiento y, en muchos casos, software especializado capaz de representar gráficamente la información recibida. Esto habilita la utilización de aplicaciones avanzadas como el Traffic Information Service-Broadcast (TIS-B) y el Flight Information Service-Broadcast (FIS-B), que suministran datos complementarios como alertas meteorológicas, restricciones de espacio aéreo y otra información relevante para la navegación.

Desde una perspectiva operativa, ADS-B OUT es indispensable para alimentar la red de vigilancia colaborativa y cumplir con los requisitos y normas regulatorias de gestión de tráfico, mientras que ADS-B IN potencia la autonomía y la capacidad de anticipación de los pilotos. La combinación de ambos sistemas en una misma aeronave permite alcanzar altos niveles de seguridad, eficiencia y flexibilidad en la gestión táctica y estratégica del espacio aéreo.

En términos de limitaciones, ADS-B OUT depende de la calidad y fiabilidad de los sistemas de navegación y transmisión a bordo, mientras que ADS-B IN se ve condicionado por la capacidad de procesamiento, la interfaz hombre-máquina y la integración con otros sistemas de la aeronave. Otro aspecto relevante es la seguridad de las comunicaciones, ya que las transmisiones ADS-B, al no estar encriptadas ni autenticadas por defecto, pueden ser

vulnerables a ataques de spoofing o interferencia, lo que subraya la necesidad de implementar mecanismos de protección y validación de datos.

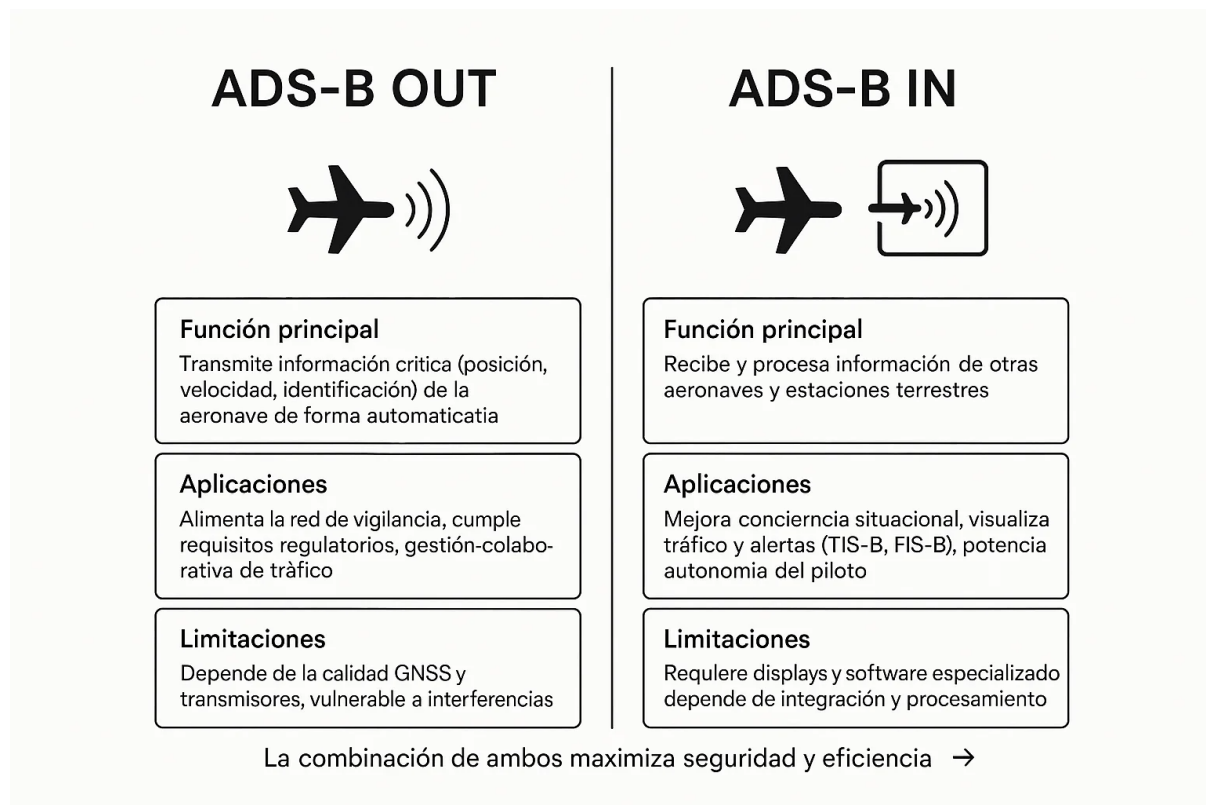


Figura 9: Comparativa funcional y de aplicación entre ADS-B OUT y ADS-B IN.

En síntesis, la distinción entre ADS-B OUT y ADS-B IN no solo responde a cuestiones técnicas, sino que define el modo en que la vigilancia aérea cooperativa se despliega en la práctica, articulando los roles de transmisión y recepción de información y posibilitando un entorno de navegación más seguro, transparente y eficiente para la aviación moderna.

2.4 Estructura de los mensajes ADS-B (DF17)

La estructura de los mensajes transmitidos por ADS-B, y en particular las tramas DF17, constituye uno de los elementos técnicos más relevantes para comprender la operatividad, precisión y seguridad del sistema. El mensaje DF17 (Downlink Format 17) es el formato más difundido y estandarizado en el contexto del ADS-B OUT, utilizado en la transmisión automática de información sobre posición, velocidad, identificación y otros parámetros críticos de la aeronave. Comprender la estructura de estos mensajes es esencial para el diseño de receptores, el análisis de datos y la integración de estaciones terrenas en sistemas de vigilancia cooperativa.

El formato DF17 es una trama de 112 bits de longitud, estructurada en campos definidos por el estándar DO-260 y sus sucesivas revisiones. Los campos principales incluyen:

- Preámbulo: utilizado para la sincronización de la señal y la detección de inicio de trama por parte del receptor.
- Downlink Format (DF): campo de 5 bits que identifica el tipo de mensaje, en este caso, DF17 para mensajes ADS-B OUT.
- ICAO Address: identificador único de 24 bits asignado a cada aeronave, fundamental para la individualización y seguimiento.
- Type Code: campo de 5 bits que determina el tipo de información contenida en la trama (posición, identificación, velocidad, etc.).
- Payload: contiene los datos específicos de la aeronave, entre ellos coordenadas GNSS, altitud barométrica, velocidad, rumbo y estado.
- Parity/CRC: campo de verificación para la detección de errores y la garantía de integridad de la transmisión.

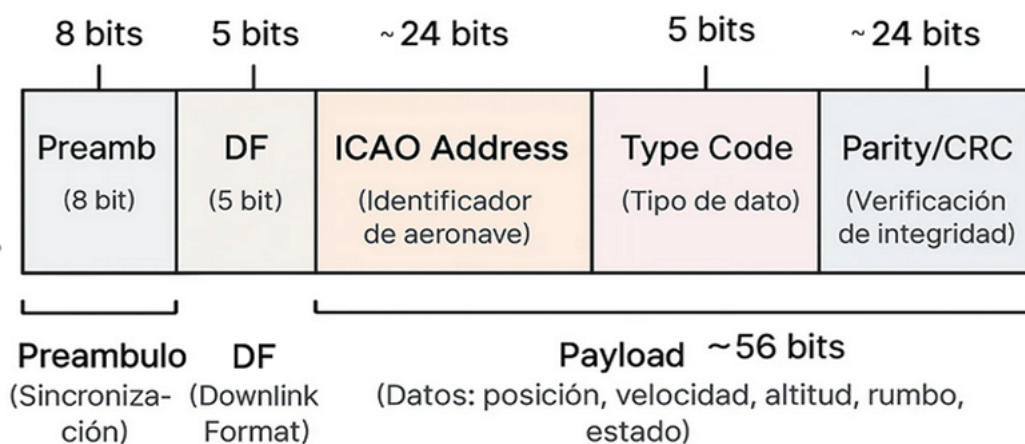


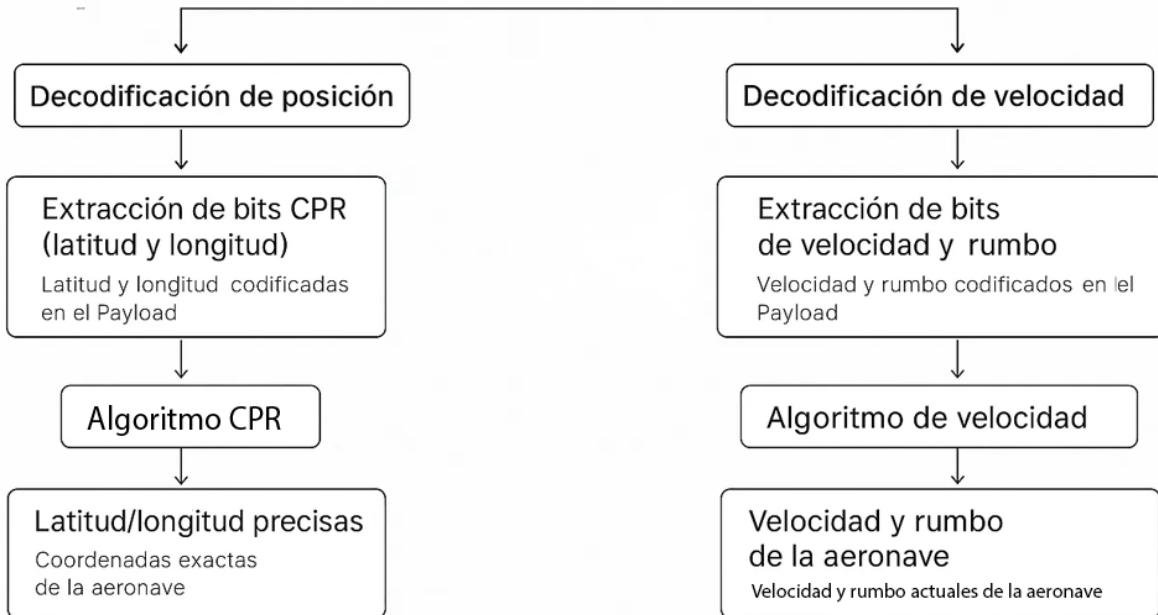
Figura 10: Estructura binaria y campos de un mensaje DF17 ADS-B.

La decodificación de un mensaje DF17 requiere un análisis bit a bit, aplicando algoritmos de parsing que interpretan cada campo según las especificaciones internacionales. Por ejemplo, las posiciones latitud y longitud se codifican en formato Compact Position Reporting (CPR), permitiendo reconstruir la ubicación de la aeronave con alta precisión. El campo Type Code, a su vez, permite distinguir entre mensajes de posición, identificación de vuelo, estado de emergencia y otras funciones avanzadas.

DF17 (112 bits)



Decodificación de posición y velocidad en un mensaje DF17 ADS-B



DECODIFICACIÓN DE POSICIÓN Y VELOCIDAD DE UN MENSAJE DF17 ADS-B

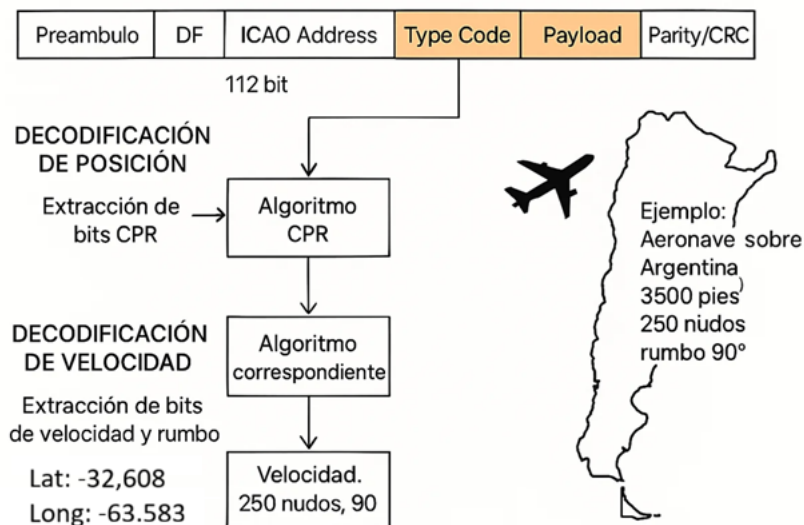


Figura 11: Ejemplo de trama DF17 y proceso de decodificación de posición y velocidad.

Además del DF17, existen otros formatos de mensaje en el ecosistema ADS-B (DF18, DF19, etc.), pero el DF17 es el más relevante para la vigilancia operativa y es soportado por la mayoría de los receptores y estaciones terrenas. Su diseño busca minimizar la latencia, maximizar la robustez ante interferencias y proporcionar información suficiente para la gestión segura y eficiente del tráfico aéreo.

La correcta interpretación de los mensajes DF17 es un aspecto central para el desarrollo de software de decodificación, la implementación de algoritmos de filtrado y la aplicación de medidas de seguridad, como la detección de spoofing o la validación de integridad de datos. En contextos académicos y experimentales, la disponibilidad de documentación abierta y herramientas de análisis facilita la replicabilidad y el avance del conocimiento en vigilancia aérea cooperativa.

En conclusión, la estructura de los mensajes DF17 refleja el equilibrio entre eficiencia de transmisión, riqueza informativa y regulaciones de seguridad, consolidando su rol central en el ecosistema ADS-B y en la digitalización de la gestión del espacio aéreo global.

2.5 Integración del GNSS en ADS-B

La integración del sistema Global Navigation Satellite System (GNSS) en la arquitectura de ADS-B constituye uno de los factores diferenciales que han permitido la revolución en la vigilancia aérea moderna. Los sistemas GNSS, como GPS (Estados Unidos), Galileo (Unión Europea), GLONASS (Rusia) o BeiDou (China), proporcionan información precisa y global de posición, velocidad y tiempo a las aeronaves, permitiendo que la vigilancia deje de depender de la infraestructura terrestre y pase a ser verdaderamente global y colaborativa.

En el contexto de ADS-B, el GNSS es la fuente principal de los datos de navegación que se transmiten en las tramas DF17. Cada segundo, el sistema de navegación satelital de la aeronave calcula con alta precisión su latitud, longitud, altitud y velocidad, y estos valores se codifican y transmiten automáticamente a través del transpondedor ADS-B. Esto posibilita que tanto las estaciones terrestres como otras aeronaves equipadas con ADS-B IN reciban información actualizada en tiempo real, mejorando la conciencia situacional y la gestión dinámica del espacio aéreo.

La ventaja fundamental de esta integración reside en la precisión, disponibilidad y confiabilidad de los datos GNSS, que superan ampliamente la exactitud alcanzable por los sistemas de radar convencionales. En zonas donde la vigilancia tradicional no es viable (océanos, selvas, desiertos, regiones polares), el ADS-B basado en GNSS habilita la gestión segura del tráfico aéreo, posibilitando rutas directas, reducción del espacio entre aeronaves y optimización del consumo de combustible.

Sin embargo, la dependencia de GNSS introduce nuevos desafíos técnicos y de seguridad. Las señales GNSS, por su baja potencia, son susceptibles a interferencias (jamming), suplantación (spoofing) y degradaciones debidas a condiciones atmosféricas o errores de multipath. Por ello, la OACI y otros organismos internacionales recomiendan la implementación de sistemas redundantes, validaciones cruzadas y monitoreo continuo de la integridad de los datos GNSS a bordo de las aeronaves y en las estaciones de control.






Vulnerabilidad	Descripción	Estrategia de mitigación
 Jamming	Interferencia intencionada que bloquea las señales GPS	Utilizar antenas anti-jamming y técnicas de detección de interferencias
 Spoofing	Suplantación de las señales GPS genuinas	Implementar técnicas de autenticación de señales
 Errores atmosféricos	Error en las señales causado por la atmósfera	Aplicar modelos de corrección ionosférica y troposférica
 Multipath	Reflexiones de señales en superficies que causan múltiples trayectorias	Utilizar antenas con supresión de trayectorias múltiples
 Fallo de constelación		Monitorear la salud de los satélites y tener planes de contingencia

Figura 12: Ejemplo de vulnerabilidades potenciales del enlace GNSS y estrategias de mitigación.

Además, la integración de GNSS en ADS-B ha impulsado la necesidad de actualizar los estándares de certificación, obligando a fabricantes y operadores a cumplir con requerimientos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad del servicio. Las herramientas de monitoreo y control de calidad GNSS, tanto en tierra como a bordo, juegan un papel esencial en la validación y verificación de los datos transmitidos, asegurando la seguridad operacional del sistema.

En síntesis, la sinergia entre GNSS y ADS-B es el pilar sobre el que se apoya la vigilancia aérea contemporánea, permitiendo una gestión flexible, precisa y segura del tráfico global. La mejora de los sistemas de posicionamiento por satélite, la detección más precisa de interferencias y la incorporación de nuevas tecnologías para calcular la ubicación (como sensores de movimiento o sistemas de apoyo) serán fundamentales para consolidar y desarrollar la vigilancia aérea cooperativa en el futuro.

2.6 Radio Definida por Software (SDR)

La Radio Definida por Software (SDR) representa una evolución fundamental en el diseño y operación de sistemas de comunicación inalámbrica, al trasladar la mayor parte del procesamiento de señales desde el dominio analógico al digital. A diferencia de los receptores tradicionales, donde funciones como la sintonización, modulación, filtrado y demodulación están implementadas en hardware físico específico, en un sistema SDR estas tareas se realizan mediante software, utilizando algoritmos de procesamiento de señales digitales

(DSP). Esto permite que un mismo dispositivo físico pueda adaptarse a múltiples estándares de comunicación, bandas de frecuencia y modulaciones simplemente mediante cambios en el software, sin necesidad de modificar el hardware.

El principio de funcionamiento de un sistema SDR se basa en la conversión temprana de la señal de radiofrecuencia (RF) a una señal digital mediante un conversor analógico-digital (ADC), lo más cercano posible a la antena. Una vez digitalizada, la señal puede ser procesada por un procesador (como una CPU, FPGA o GPU) que ejecuta algoritmos para sintonizar, filtrar, decodificar y analizar la información. Esta arquitectura ofrece una flexibilidad sin precedentes, permitiendo el desarrollo de sistemas altamente personalizables, actualizables y de bajo costo, ideales para aplicaciones de investigación, monitoreo y vigilancia.

En el contexto de esta tesis, la tecnología SDR es el pilar fundamental para el desarrollo de una estación terrena ADS-B accesible y escalable. Permite la recepción y decodificación de señales en la banda de 1090 MHz (1090ES), utilizada por las aeronaves para transmitir información de posición, identidad, velocidad y estado, todo ello con hardware de bajo costo como dispositivos RTL-SDR, Airspy o USRP, y software libre como GNU Radio. Esta combinación no solo reduce significativamente el costo de entrada, sino que también facilita la replicabilidad, la innovación y la transferencia tecnológica, especialmente en entornos académicos o regiones con recursos limitados.

Sin embargo, el rendimiento de un sistema SDR depende críticamente de la calidad del hardware (sensibilidad, estabilidad del oscilador, rango dinámico) y de la capacidad computacional disponible. Factores como la deriva de frecuencia (causada por osciladores de bajo costo), la interferencia electromagnética y la saturación del receptor en entornos de alta densidad de señal requieren estrategias de mitigación, como el uso de filtros pasivos, preamplificadores (LNA) y algoritmos de corrección en tiempo real.

Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)

De hardware específico a procesamiento flexible por software

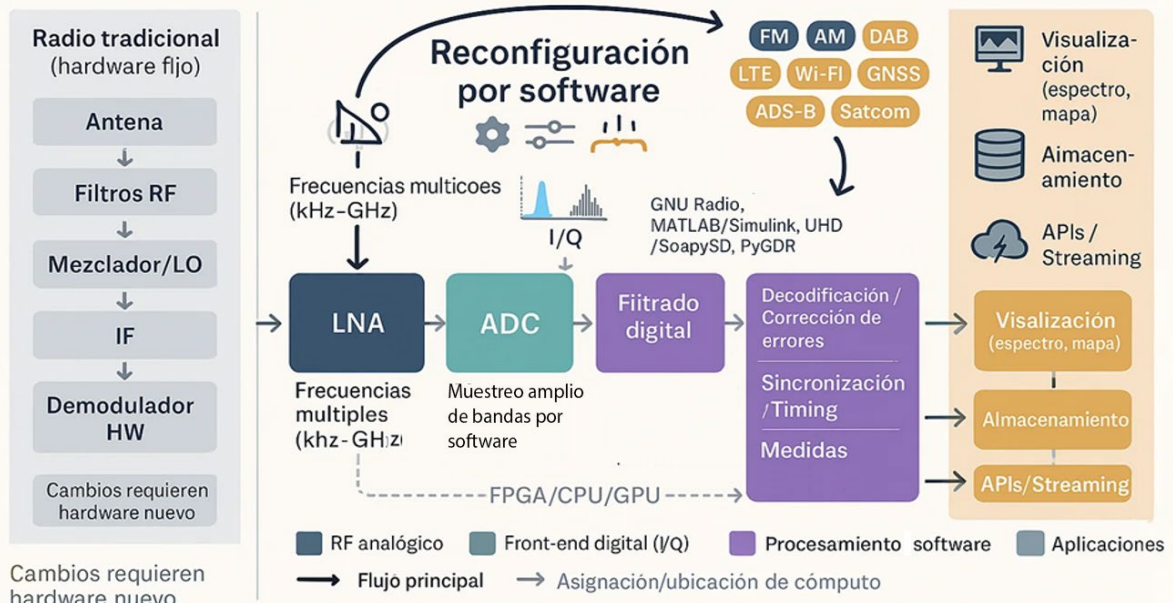


Figura 13: Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)

2.7 Arquitectura técnica de transmisión y recepción ADS-B

La arquitectura técnica de transmisión y recepción de ADS-B es el resultado de la convergencia entre tecnologías de navegación satelital, radiofrecuencia digital y procesamiento de datos en tiempo real. Esta sinergia permite la vigilancia cooperativa de aeronaves en todo el mundo, proporcionando información precisa sobre posición, velocidad, identificación y estado a controladores, operadores y otros usuarios del espacio aéreo. La arquitectura se compone de diversos bloques funcionales, tanto a bordo de las aeronaves como en las estaciones terrenas y redes de datos asociadas.

2.8 Componentes principales de la arquitectura ADS-B

1. Transpondedor ADS-B a bordo: Es el dispositivo central encargado de recibir datos del sistema GNSS, procesarlos y transmitirlos en formato DF17 (u otros, según la configuración). Los transpondedores modernos integran rutinas de comprobación de integridad, gestión de errores y control de potencia para asegurar la robustez y confiabilidad de la transmisión.
2. Antena de transmisión: La antena, generalmente montada en la parte inferior o superior del fuselaje, está optimizada para operar en las frecuencias de 1090 MHz (1090ES) y/o 978 MHz (UAT), garantizando una adecuada cobertura y minimizando interferencias.
3. Fuente GNSS: El sistema de navegación satelital provee los datos de posición, velocidad y tiempo. Algunos aviones cuentan con redundancia GNSS o integración con sensores inerciales para aumentar la fiabilidad y la continuidad del servicio.

4. Estaciones terrenas ADS-B: Son receptores de alta sensibilidad que capturan las señales emitidas por los transpondedores, las decodifican y las integran en sistemas de gestión de tráfico aéreo (ATM). Estas estaciones pueden ser dedicadas o parte de redes colaborativas abiertas, y se ubican estratégicamente para maximizar la cobertura.
5. Infraestructura de procesamiento de datos: Incluye servidores, bases de datos, software de decodificación y visualización, herramientas de análisis y redes de comunicación seguras. Permite la integración de datos ADS-B con otros sistemas (radar, multilateración, meteorología), generación de alertas, y soporte para la toma de decisiones en tiempo real.
6. Displays y sistemas de visualización: Tanto en cabina (para ADS-B IN) como en centros de control, la visualización de la información procesada es clave para la conciencia situacional y la seguridad operacional.

2.9 Frecuencias y protocolos de transmisión

2.9.1 El ADS-B utiliza principalmente dos canales de transmisión:

- 1090ES (Extended Squitter): Es el estándar global para aviación comercial y la mayoría de los aviones, basado en la transmisión de mensajes DF17 a 1090 MHz. Permite una alta densidad de tráfico y es obligatorio en muchos espacios aéreos.
- UAT (Universal Access Transceiver): Opera en 978 MHz y es utilizado principalmente en la aviación general de Estados Unidos. Permite servicios adicionales como FIS-B y TIS-B.

Ambos canales emplean modulación por pulsos (Pulse Position Modulation, PPM) y protocolos de acceso al medio diseñados para minimizar colisiones y pérdidas de información.

2.9.2 Flujo de información y topologías de red

El flujo de información en ADS-B sigue un esquema de emisión continua desde la aeronave, recepción por parte de estaciones terrenas y aeronaves cercanas, procesamiento y visualización. El diseño de la red puede variar desde configuraciones punto a punto hasta topologías en malla colaborativa, donde múltiples estaciones comparten datos para mejorar la redundancia y la cobertura.

ARQUITECTURA TECNICA DEL SISTEMA ADS-B

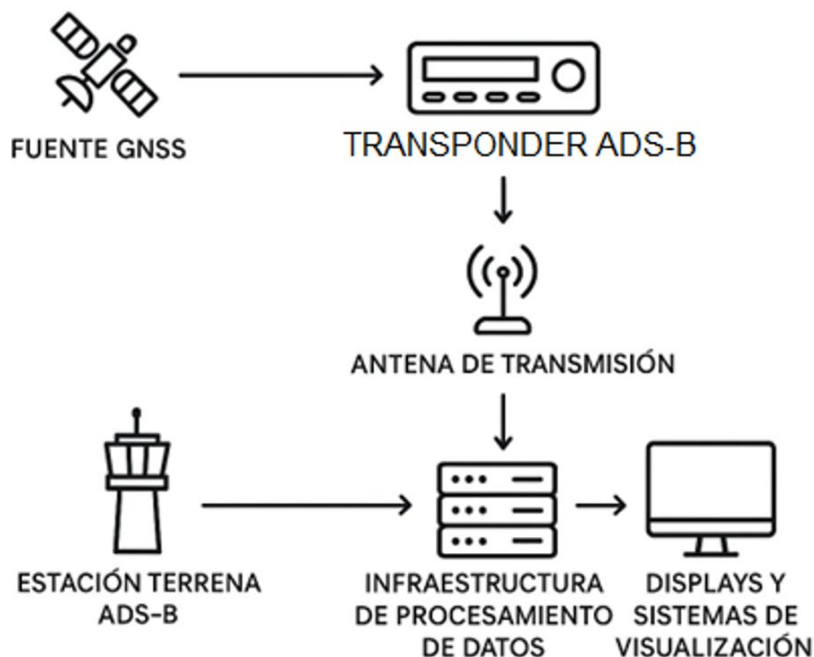


Figura 134: Diagrama de bloques de la arquitectura técnica de ADS-B, mostrando transpondedor, antena, GNSS, estación terrena, red de datos y displays.

2.9.3 Aspectos técnicos avanzados

La arquitectura ADS-B debe enfrentar desafíos como la interferencia electromagnética, la latencia de transmisión, la gestión de grandes volúmenes de datos y la integración con sistemas legacy. El diseño de antenas, la elección de hardware SDR en estaciones receptoras y el uso de algoritmos avanzados de decodificación son críticos para asegurar la calidad del servicio.

Con la llegada de la radio definida por software (SDR), la flexibilidad y capacidad de actualización de las estaciones terrenas se ha incrementado considerablemente. El procesamiento digital permite adaptar los parámetros de recepción, filtrar interferencias, mejorar la sensibilidad y soportar múltiples protocolos de manera simultánea. Además, la integración de SDR facilita la experimentación académica y la evolución tecnológica sin grandes inversiones en hardware propietario.

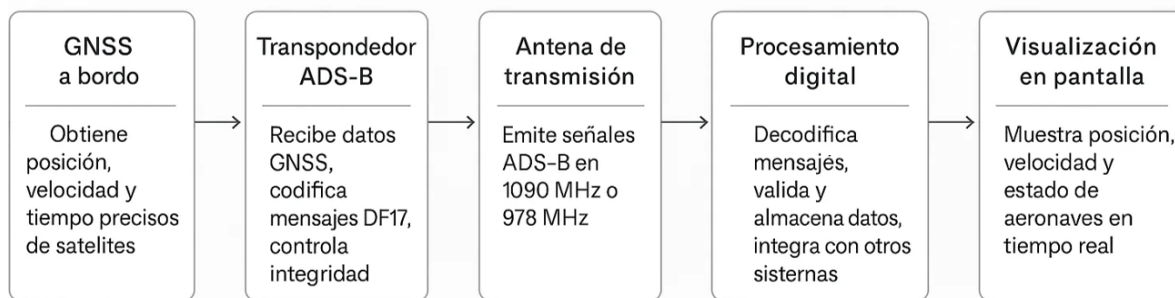


Figura 145: Esquema de flujo de información ADS-B: desde el GNSS a la visualización en pantalla, pasando por la transmisión, recepción y procesamiento.

2.9.4 Seguridad y redundancia

Dada la criticidad de la vigilancia aérea, la arquitectura ADS-B incorpora medidas de seguridad, autenticación y redundancia. Se recomienda la implementación de múltiples estaciones receptoras, validación cruzada de datos y monitorización continua de la integridad de las señales. En algunos entornos, la integración con sistemas de radar o multilateración actúa como respaldo ante fallas o ataques, garantizando la resiliencia operativa.

2.9.5 Escalabilidad y futuro de la arquitectura ADS-B

La arquitectura actual está diseñada para escalar con el crecimiento del tráfico aéreo, soportando densidades crecientes y la integración de nuevas tecnologías como inteligencia artificial, análisis predictivo y servicios de gestión colaborativa. El futuro apunta a sistemas híbridos, donde el ADS-B se complementa con fuentes alternativas de datos y se adapta a las exigencias regulatorias y operativas de la aviación en constante evolución.

2.10 Conclusión del capítulo

El análisis detallado del sistema ADS-B y su principio de funcionamiento permite concluir que esta tecnología representa un salto cualitativo en la vigilancia y gestión del tráfico aéreo global. A diferencia de los sistemas tradicionales, el ADS-B se apoya en la cooperación activa de las aeronaves y en la integración de datos GNSS, ofreciendo una solución eficiente, precisa y escalable para la supervisión en tiempo real del espacio aéreo.

La evolución histórica del control de tráfico aéreo pone de manifiesto la necesidad de innovar constantemente para responder a los retos de incremento de tráfico, cobertura, eficiencia y seguridad. El ADS-B surge como la respuesta tecnológica más avanzada, capaz de superar las limitaciones del radar y la dependencia de infraestructura costosa, permitiendo la vigilancia colaborativa incluso en zonas remotas, océanos y regiones de difícil acceso.

El estudio de las diferencias entre ADS-B OUT e IN evidencia el valor de la transmisión y recepción automática de información aeronáutica, mejorando la conciencia situacional tanto para los controladores como para los pilotos, y facilitando la toma de decisiones tácticas y estratégicas en escenarios complejos. La estructura normalizada de los mensajes DF17, junto con la robustez de los protocolos de transmisión, garantiza la integridad y utilidad de los datos

en sistemas críticos, aunque plantea desafíos relacionados con la seguridad de la información y la necesidad de protección ante ataques o interferencias.

La integración del GNSS en el ecosistema ADS-B ha sido fundamental para alcanzar altos niveles de precisión y continuidad, pero también ha impuesto la necesidad de reforzar los mecanismos de monitoreo, validación y redundancia de datos, en línea con las mejores prácticas y regulaciones internacionales.

Por último, la arquitectura técnica de transmisión y recepción, apoyada en tecnologías como la radio definida por software (SDR) y las redes colaborativas, abre posibilidades para la innovación, la experimentación y la expansión futura del sistema. La flexibilidad, adaptabilidad y apertura de la tecnología ADS-B la posicionan como la base sobre la que se edificará la gestión aérea digital y resiliente del siglo XXI.

Capítulo 3.

Modelo en V para el desarrollo de software e integración de hardware en sistemas ADS-B

Resumen del capítulo:

El Capítulo 3 explora en profundidad la aplicación del modelo en V en el desarrollo de sistemas embebidos críticos, enfocado en la implementación de estaciones ADS-B de monitoreo aéreo basadas en radio definida por software (SDR). Se justifica la elección del modelo en V frente a otros ciclos de vida de ingeniería, destacando su idoneidad para entornos donde la seguridad, trazabilidad y calidad son prioritarios. A través de un análisis detallado de cada fase —desde el análisis de requerimientos hasta el mantenimiento— se ilustra cómo este enfoque metodológico garantiza la robustez, confiabilidad y cumplimiento normativo en la integración de hardware y software para sistemas aeronáuticos. El capítulo también abarca la relación con herramientas modernas como GNU Radio y plataformas SDR, mostrando su impacto en la innovación, la validación y la sostenibilidad de soluciones críticas para la vigilancia aérea.

3.1 Introducción al modelo en V en sistemas críticos

El modelo en V es una de las metodologías de ciclo de vida de desarrollo de sistemas más reconocidas y aplicadas en la ingeniería de sistemas críticos, especialmente en la industria aeronáutica, ferroviaria y automotriz. Su origen se remonta a la necesidad de superar las limitaciones del modelo en cascada tradicional, incorporando un enfoque que enfatiza la verificación y validación en cada etapa del proceso, asegurando la trazabilidad bidireccional entre requerimientos y especificaciones, diseño, implementación y pruebas.

La principal característica distintiva del modelo en V es su estructura en forma de “V”, donde la rama descendente corresponde a las fases de definición y diseño (análisis de requerimientos, arquitectura, diseño detallado) y la rama ascendente representa las fases de integración, verificación, validación y mantenimiento. Cada fase de desarrollo tiene una fase de prueba asociada, lo que permite una correspondencia directa entre lo que se define y lo que se verifica, facilitando la detección temprana de errores, la trazabilidad de cambios y la documentación exhaustiva.

MODELO EN V PARA SISTEMAS EMBEBIDOS CRÍTICOS

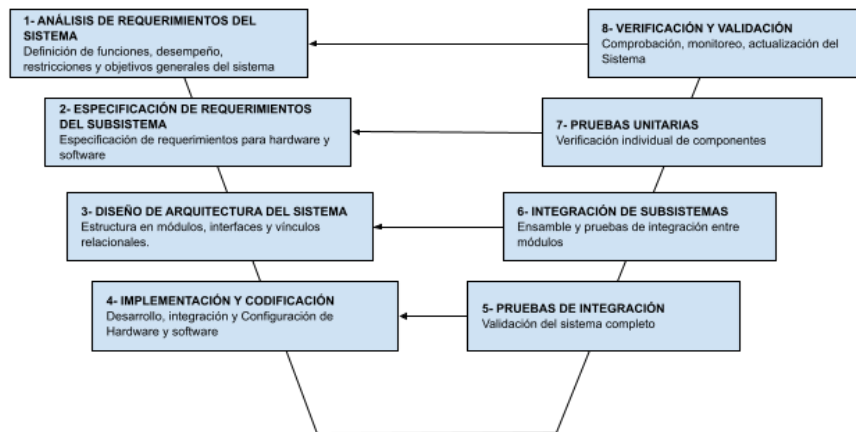


Figura 156: Esquema del modelo en V aplicado a sistemas embebidos críticos.

En el contexto de los sistemas ADS-B basados en SDR, el modelo en V demuestra ser particularmente adecuado debido a la naturaleza crítica de la aplicación (seguridad operacional, cumplimiento normativo, fiabilidad en entornos hostiles) y la necesidad de integrar componentes heterogéneos de hardware y software. El desarrollo de una estación terrena ADS-B exige una planificación rigurosa, especificación detallada de requerimientos y validación exhaustiva, aspectos que el modelo en V facilita mediante su estructura secuencial y su énfasis en la verificación continua.

Desde una perspectiva técnica, la aplicación del modelo en V permite abordar las complejidades inherentes a la integración de plataformas SDR (como USRP, RTL-SDR) con herramientas de desarrollo de software especializado (GNU Radio, librerías de decodificación de tramas, módulos de visualización). La gestión de interfaces, la sincronización de datos, la prevención de fallos y la compatibilidad electromagnética son temas que solo pueden abordarse de manera efectiva mediante una metodología que promueva la documentación, la revisión cruzada y la validación sistemática.

El modelo en V también se alinea con los estándares internacionales de certificación en aeronáutica y sistemas críticos (DO-178C para software, DO-254 para hardware), que exigen trazabilidad de requerimientos, validación cruzada y gestión exhaustiva de la configuración. Su estructura facilita la adaptación a entornos regulados, la justificación ante auditorías y la evolución futura del sistema mediante ciclos iterativos de mejora continua.

En resumen, la adopción del modelo en V en el desarrollo de sistemas ADS-B no solo responde a una necesidad técnica, sino también a una exigencia regulatoria y de calidad, garantizando que cada componente del sistema —desde el hardware SDR hasta el software de procesamiento y visualización— cumpla con los más altos estándares de seguridad, confiabilidad y robustez operativa.

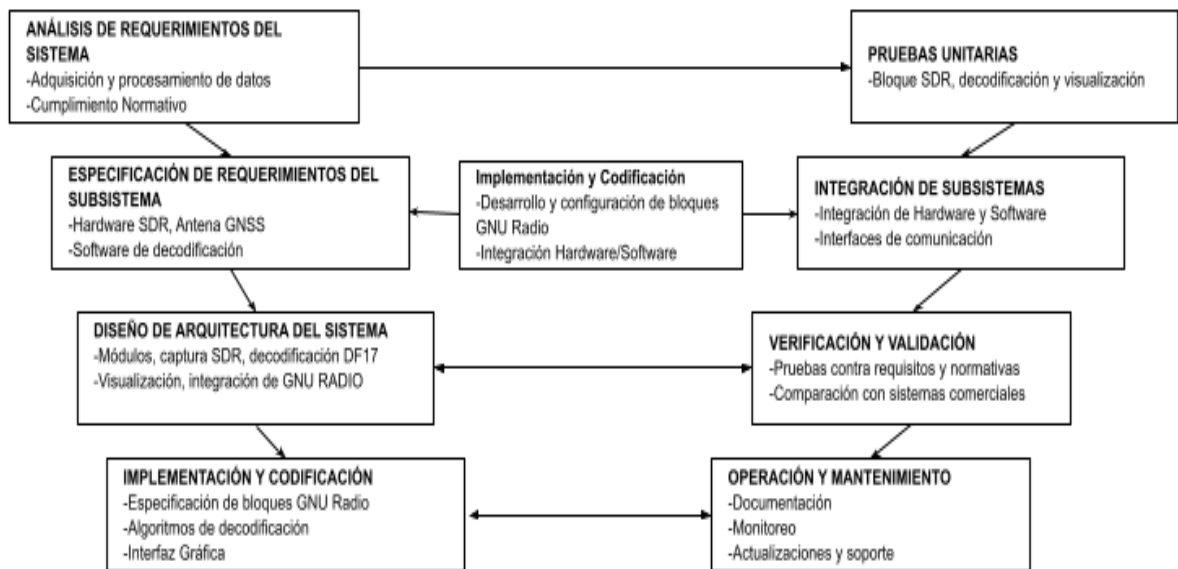


Figura 167: Relación entre fases del modelo en V y actividades de validación/verificación en el desarrollo de estaciones ADS-B.

3.2 Análisis de requerimientos en sistemas ADS-B basados en SDR

El análisis de requerimiento constituye la primera fase fundamental en el ciclo de vida del modelo en V y es especialmente crítico en el desarrollo de sistemas embebidos para aplicaciones aeronáuticas, donde la seguridad, la fiabilidad y la conformidad normativa son prioridades absolutas. En el contexto de una estación terrena ADS-B basada en radio definida por software (SDR), esta etapa implica la identificación, documentación y validación de requerimiento funcionales y no funcionales, abarcando dimensiones técnicas, operativas, regulatorias y de ciberseguridad.

3.2.1 Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales especifican las capacidades mínimas que debe poseer el sistema para cumplir con su propósito operacional. En una estación ADS-B SDR, estos incluyen, pero no se limitan a:

- Recepción y decodificación de tramas DF17 y DF18, capturadas en tiempo real desde aeronaves en vuelo.
- Integración con hardware SDR de distintas marcas y modelos (USRP, RTL-SDR, Airspy, etc.), garantizando compatibilidad y flexibilidad.
- Procesamiento y visualización de la información aeronáutica relevante (posición, identificación, velocidad, altitud) tanto en tiempo real como en modo histórico.
- Almacenamiento seguro y eficiente de grandes volúmenes de datos para análisis posterior y validación experimental.

- Exportación de datos a sistemas externos de gestión de tráfico aéreo y plataformas colaborativas de monitoreo.

REQUISITOS FUNCIONALES EN UNA ESTACIÓN ADS-B BASADA EN SDR

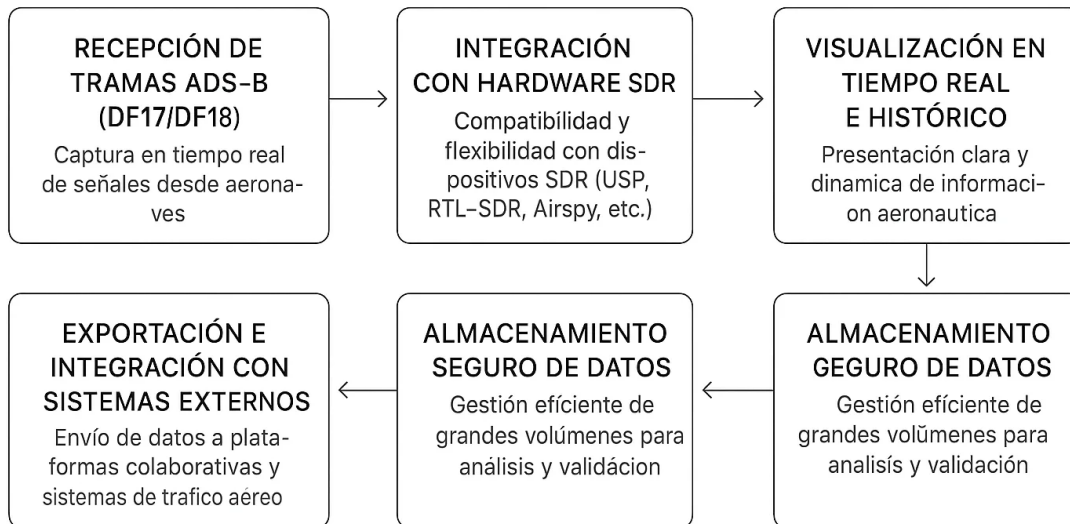


Figura 178: Flujo de requerimientos funcionales en una estación ADS-B SDR.

Los requerimientos no funcionales definen las cualidades y restricciones bajo las cuales debe operar el sistema, entre los que destacan:

- Seguridad: protección ante accesos no autorizados, integridad de los datos y resiliencia ante ataques de spoofing/jamming.
- Rendimiento: baja latencia en la decodificación y visualización, alta tasa de captura de tramas y mínimo downtime operativo.
- Escalabilidad: capacidad de adaptación a diferentes escenarios de tráfico y posibilidad de integración con nuevas tecnologías.
- Compatibilidad y portabilidad: operación en diversas plataformas (Windows, Linux), actualización sencilla y soporte para múltiples protocolos.
- Cumplimiento normativo: alineación con estándares internacionales (DO-260, EUROCAE ED-102, OACI) y regulaciones locales.

3.2.2 Técnicas y herramientas para la captura y gestión de requerimientos

Para asegurar la trazabilidad y la validación efectiva de los requerimientos, se recomienda el uso de matrices de trazabilidad, herramientas CASE (Computer-Aided Software Engineering) y metodologías ágiles de documentación incremental. La participación de expertos en sistemas aeronáuticos, operadores y responsables de seguridad es esencial para identificar riesgos, escenarios de uso y restricciones particulares del dominio.

Ejemplo de matriz de trazabilidad de requerimientos en sistemas críticos

ID	Descripción del Requerimiento	Tipo	Fase de ciclo de vida	Método de validación	Estado
RF01	Decodificación de tramas DF17 en tiempo real	Funcional	Implementación	Pruebas funcionales	Validado
RNF01	Resiliencia ante ataques de spoofing/jamming	No funcional	Diseño y operación	Análisis de seguridad	En progreso
RNF02	Cumplimiento con DO-260	No funcional	Todas	Auditoría/documentación	Pendiente
RF02	Visualización de datos en plataforma multiplataforma	Funcional	Integración	Pruebas de compatibilidad	Validado
RNF03	Escalabilidad a escenarios de alto tráfico	No funcional	Diseño	Simulación y pruebas de carga	En progreso

Tabla 1: Ejemplo de matriz de trazabilidad de requerimientos en sistemas críticos.

3.2.3 Gestión de requerimientos en el ciclo de vida

La gestión de requerimientos debe ser iterativa, permitiendo la revisión y actualización continua a medida que avanzan las fases de diseño, implementación y pruebas. La validación temprana a través de prototipos, simulaciones y revisiones cruzadas entre equipos (hardware, software, operación) minimiza errores y garantiza que el sistema desarrollado cumpla con los objetivos de seguridad y desempeño.

A nivel académico, la literatura enfatiza la importancia de una especificación rigurosa y documentada, citando ejemplos de incidentes en la industria aeronáutica donde la omisión o ambigüedad en los requerimientos ha derivado en fallos operativos, costos elevados o retrasos en la certificación. Así, la fase de análisis de requerimientos es la piedra angular para el éxito de proyectos de vigilancia aérea basada en SDR y para el cumplimiento de los estándares exigidos a nivel internacional.

3.2.4 Consideraciones de ciberseguridad y sostenibilidad

En el panorama actual, la ciberseguridad y la sostenibilidad tecnológica adquieren relevancia creciente. Los requerimientos deben contemplar mecanismos de autenticación, actualización de software segura, protección de la infraestructura ante ataques y la capacidad de evolución del sistema frente a nuevas amenazas y regulaciones emergentes.

En síntesis, el análisis de requerimientos en sistemas ADS-B SDR es un proceso multidimensional y colaborativo, cuyo éxito depende de la claridad, exhaustividad y adaptabilidad del trabajo realizado en esta etapa. Una base sólida en requerimientos es

indispensable para avanzar hacia el diseño, desarrollo e integración de soluciones robustas, seguras y alineadas con las demandas del tráfico aéreo global.



Figura 189: Resumen gráfico de los requerimientos críticos en sistemas ADS-B basados en SDR.

3.3 Diseño del sistema: arquitectura de hardware y software

El diseño del sistema en el marco del modelo en V representa la transición desde la especificación de requerimientos hacia la materialización de soluciones concretas de hardware y software. Esta etapa es esencial para garantizar que el sistema propuesto cumpla con las expectativas funcionales y no funcionales, así como con los estándares de seguridad, fiabilidad y mantenibilidad requeridos en aplicaciones críticas como la vigilancia aérea mediante ADS-B y SDR.

3.3.1 Principios de diseño modular y arquitectura de referencia

El diseño modular es un principio rector en sistemas embebidos críticos, ya que facilita la escalabilidad, el mantenimiento y la actualización independiente de los distintos componentes. En el contexto de una estación terrena ADS-B SDR, la arquitectura de referencia debe prever una clara separación entre los módulos de adquisición de datos

(hardware SDR y antenas), procesamiento de señal (software de decodificación, filtrado y validación), visualización (interfaces gráficas y sistemas de alerta) y almacenamiento seguro de información.

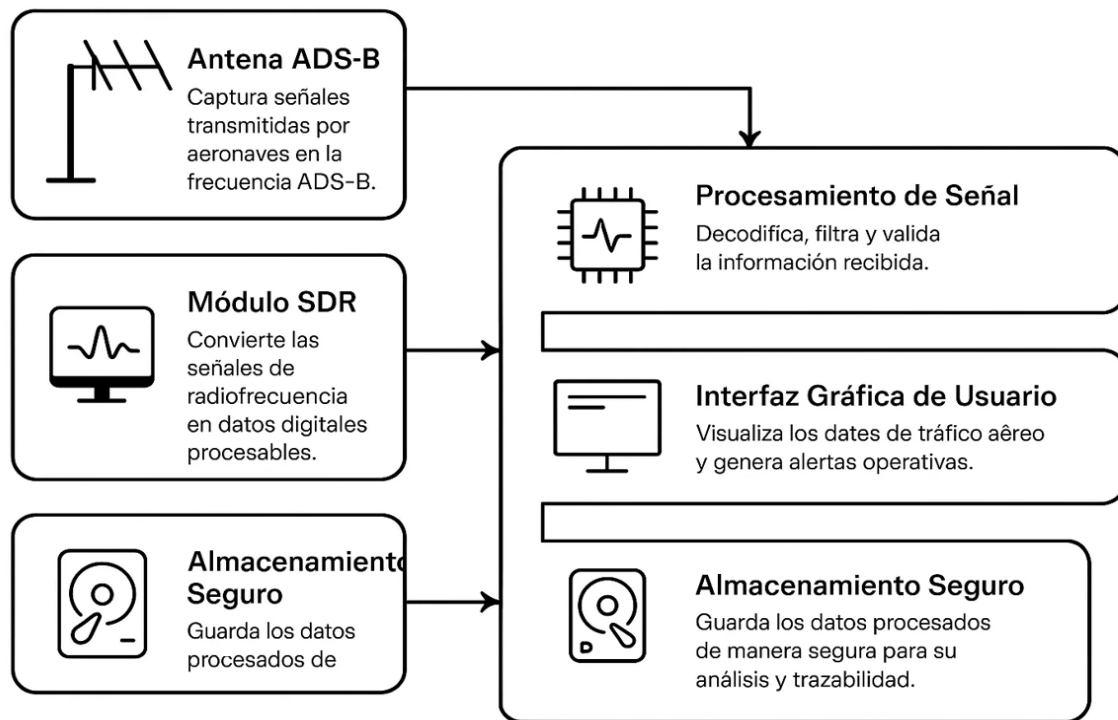


Figura 20: Arquitectura de bloques de una estación terrestre ADS-B basada en SDR.

3.3.2 Diseño de hardware

La selección de hardware es un proceso multidimensional que considera la sensibilidad, el rango dinámico, la linealidad y la compatibilidad electromagnética de los receptores SDR. Dispositivos como USRP, RTL-SDR y Airspy ofrecen diferentes niveles de rendimiento, costo y flexibilidad. La elección de la antena es igualmente crítica, debiendo optimizarse para las frecuencias de operación (1090 MHz para 1090ES y/o 978 MHz para UAT) y el entorno de instalación (urbano, rural, aeropuerto, etc.).

Los buses de comunicación (USB, Ethernet, PCIe) y los sistemas de procesamiento (PC industrial, sistemas embebidos, FPGA) deben seleccionarse en función de los requerimientos de latencia, capacidad de procesamiento en tiempo real y robustez frente a interferencias. La redundancia y la capacidad de diagnóstico remoto son atributos deseables para garantizar la disponibilidad y la resiliencia del sistema.

3.3.3 Diseño de software

El software de la estación terrestre ADS-B SDR debe organizarse en módulos funcionales independientes, facilitando el desarrollo incremental y la validación continua. GNU Radio es la plataforma de referencia para el procesamiento de señales, permitiendo la implementación

de bloques personalizados para la adquisición, filtrado, demodulación y decodificación de tramas DF17 y DF18.

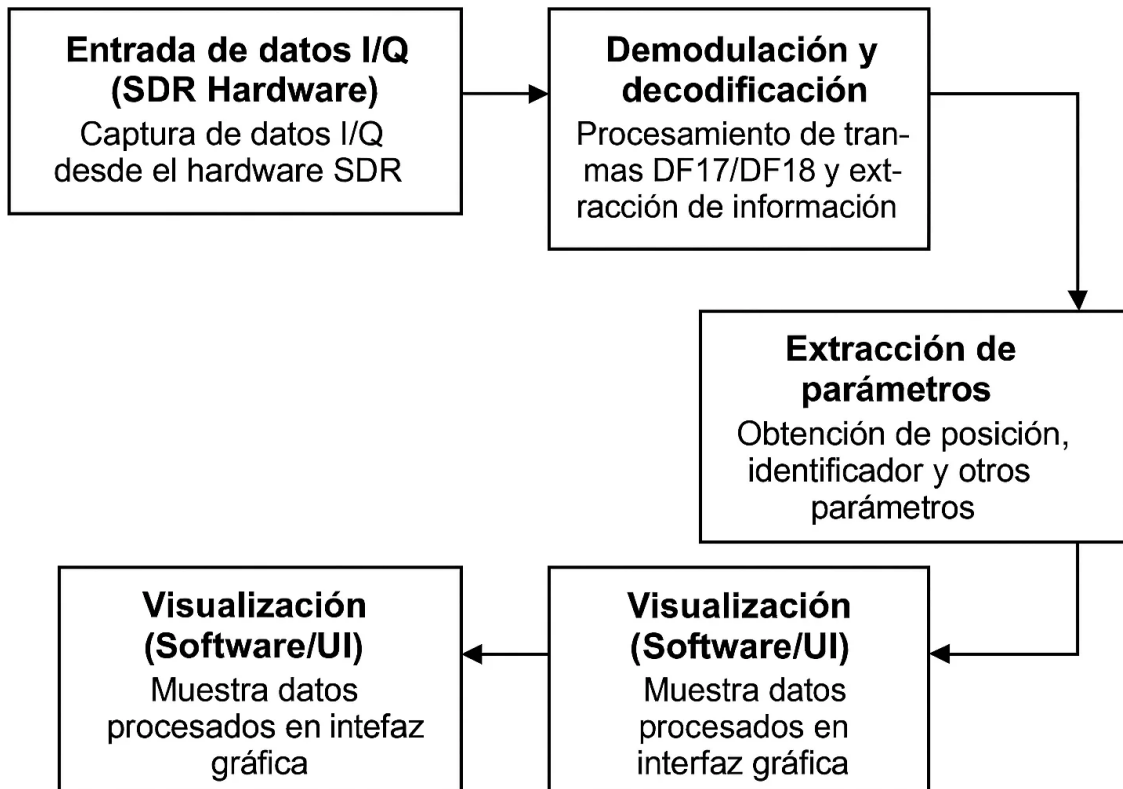


Figura 191: Flujo de señal software: procesamiento de datos I/Q, decodificación, extracción de parámetros y visualización.

El diseño modular del software debe prever la integración con bases de datos locales o remotas, la generación de alertas en tiempo real y la exportación de datos a sistemas externos. La interfaz gráfica de usuario (GUI) debe ofrecer información clara y actualizada, posibilitando la interacción eficiente con operadores y la integración de funciones avanzadas como la visualización de mapas, la gestión de historiales y la configuración remota del sistema.

3.3.4 Integración hardware-software

La interfaz hardware-software se implementa mediante controladores específicos para cada modelo de SDR, protocolos de comunicación (TCP/IP, USB, Serial), y mecanismos de sincronización de datos que aseguran la integridad y la coherencia temporal de la información. El diseño debe contemplar buffers de datos, mecanismos de compensación ante pérdidas o errores de transmisión, y rutinas de diagnóstico para la detección temprana de fallos.

3.3.5 Seguridad, robustez y escalabilidad

El diseño del sistema debe incorporar desde el inicio mecanismos de seguridad (autenticación, cifrado, control de accesos), así como estrategias de robustez ante fallos (redundancia, diagnóstico, recuperación automática). La escalabilidad se logra mediante una arquitectura abierta, capaz de incorporar nuevos módulos, protocolos o tecnologías con mínimo impacto en el resto del sistema.

3.3.6 Ejemplos y mejores prácticas

La industria y la literatura académica reportan casos exitosos de estaciones terrenas ADS-B basadas en SDR, destacando la importancia de la documentación exhaustiva, la adopción de estándares abiertos y la validación cruzada de todos los módulos del sistema. El diseño debe ser flexible para adaptarse a cambios regulatorios, tecnológicos y operativos, permitiendo la evolución del sistema a lo largo de su ciclo de vida.

En síntesis, el diseño de la arquitectura de hardware y software en sistemas ADS-B basados en SDR es una tarea compleja y multidimensional, que requiere la integración de conocimientos en radiofrecuencia, procesamiento digital, ingeniería de software y ciberseguridad. Un diseño riguroso y documentado es la clave para el éxito de estos sistemas en entornos críticos y regulados.

3.4 Desarrollo e implementación

La fase de desarrollo e implementación en el modelo en V marca la transición del diseño conceptual y arquitectónico hacia la construcción real de los módulos de hardware y software que conforman la estación terrena ADS-B basada en SDR. Este proceso requiere una integración rigurosa de prácticas de ingeniería de software embebido, radiofrecuencia digital y validación continua, garantizando que el sistema cumpla con los estándares de seguridad, rendimiento y confiabilidad que exige la vigilancia aérea crítica.

3.4.1 Desarrollo de software embebido y procesamiento de señales

El núcleo del software de la estación terrena ADS-B está constituido por bloques funcionales en GNU Radio, encargados de la adquisición, filtrado, demodulación y decodificación de señales ADS-B provenientes de los dispositivos SDR. El desarrollo comienza con la implementación de flujos I/Q, la sincronización con la trama preámbulo y la separación de tramas DF17 y DF18. Posteriormente, módulos específicos decodifican la información de posicionamiento, identificación y estado, aplicando algoritmos de parsing conforme a los estándares DO-260 y EUROCAE ED-102.

La modularidad del software permite la actualización y mejora incremental de los algoritmos, facilitando la incorporación de nuevos protocolos o la adaptación a cambios regulatorios. La integración de pruebas unitarias automáticas, la verificación de la cobertura de pruebas y la revisión cruzada entre equipos de desarrollo son prácticas recomendadas para asegurar la robustez y la mantenibilidad del código.

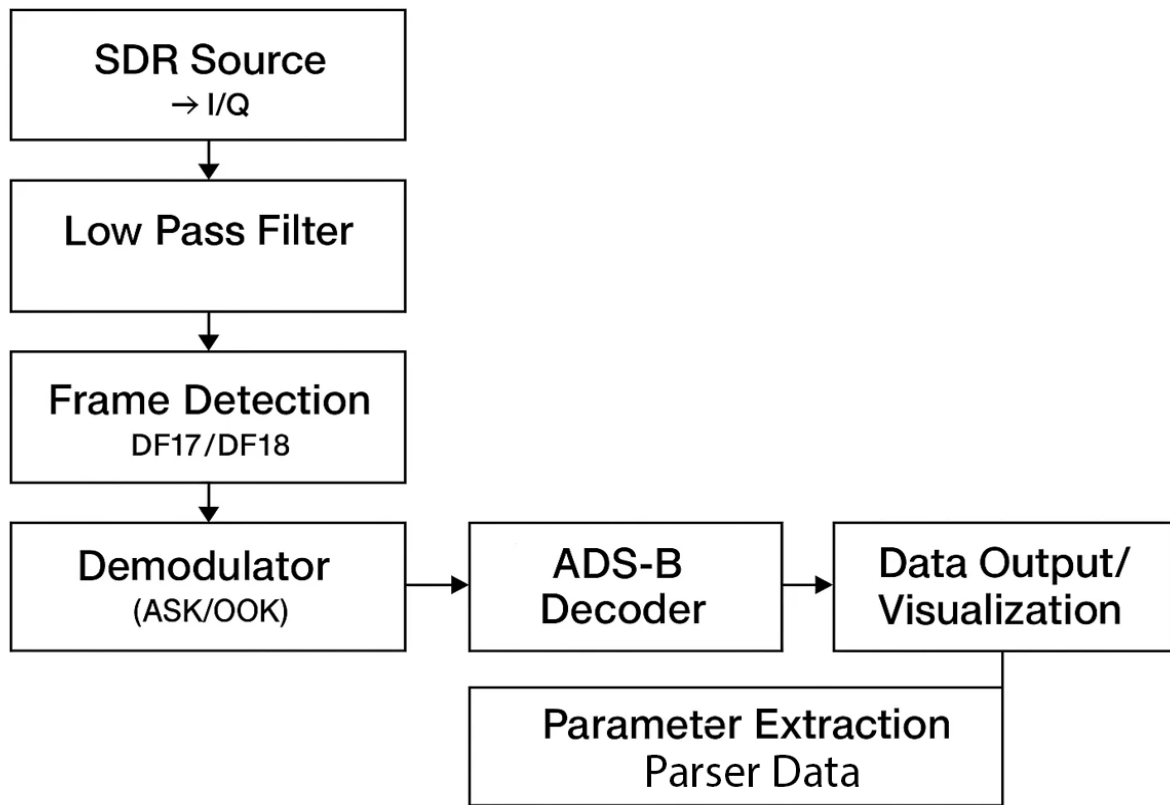


Figura 202: Diagrama de flujo de bloques GNU Radio para recepción y decodificación de tramas ADS-B.

3.4.2 Integración de hardware SDR y validación funcional

La implementación física del sistema requiere la selección, configuración y prueba de los dispositivos SDR (USRP, RTL-SDR, Aircspy, etc.), la instalación y calibración de las antenas, y la integración con sistemas de procesamiento (PC industrial, servidores dedicados, plataformas embebidas). La validación funcional incluye la verificación de la sensibilidad de recepción, la mitigación de interferencias y la comprobación de la estabilidad ante variaciones ambientales.

El proceso de integración debe contemplar la gestión eficiente de buffers de datos, la sincronización horaria (NTP, GPSDO) y la redundancia en la fuente de alimentación y conectividad. Para ambientes críticos, se recomienda la implementación de diagnósticos automáticos y la capacidad de actualización remota del firmware y software.

3.4.3 Prácticas de desarrollo seguro y documentación

El desarrollo seguro implica el uso de control de versiones (git), la implementación de políticas de acceso, la protección de configuraciones críticas y el monitoreo continuo de vulnerabilidades conocidas. La documentación exhaustiva del código, los diagramas de arquitectura y los manuales de usuario y operación son requerimientos indispensables para la certificación y la transferencia tecnológica.

3.4.4 Prototipado, pruebas y validación incremental

El proceso de implementación debe apoyarse en la construcción de prototipos funcionales, la validación incremental de módulos y la realización de pruebas en laboratorio y campo. El uso de simuladores de tráfico aéreo, generadores de señales de prueba y bancos de datos reales permite la evaluación objetiva del desempeño del sistema antes de su despliegue operativo.

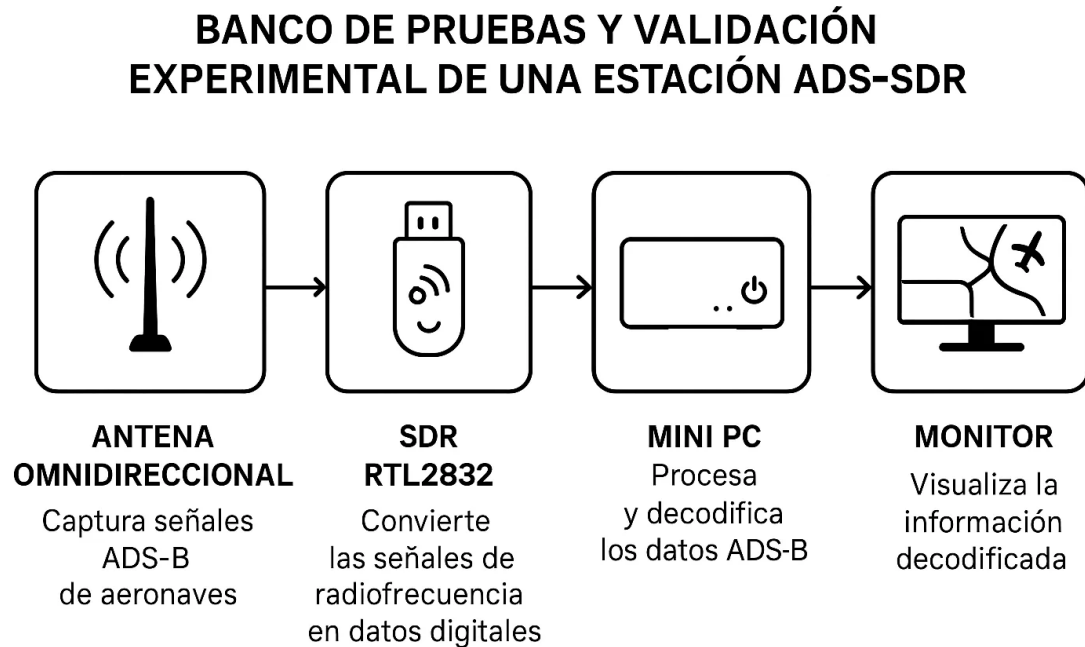


Figura 213: Esquema de banco de pruebas y validación experimental de una estación ADS-B SDR.

3.4.5 Desafíos y soluciones en la implementación

La literatura reporta desafíos frecuentes como la sincronización precisa de datos I/Q, la gestión de latencias, la adaptación a diferentes dispositivos SDR y la integración con redes de monitoreo colaborativo. Soluciones como el uso de buffers circulares, algoritmos de detección automática de errores y la adopción de arquitecturas tolerantes a fallos han demostrado ser efectivas en entornos críticos.

3.4.6 Aseguramiento de la calidad y mejora continua

La implementación debe alinearse con marcos de calidad como ISO/IEC 25010, promoviendo la mejora continua mediante la retroalimentación de resultados, la actualización de requerimientos y la documentación de lecciones aprendidas. La participación activa en comunidades open source y foros especializados favorece la innovación y la actualización tecnológica permanente.

En síntesis, la fase de desarrollo e implementación en estaciones terrenas ADS-B SDR es un proceso iterativo, colaborativo y multidisciplinario, donde la integración de buenas prácticas

de ingeniería, la validación continua y la documentación rigurosa son la base para el éxito en entornos de misión crítica.

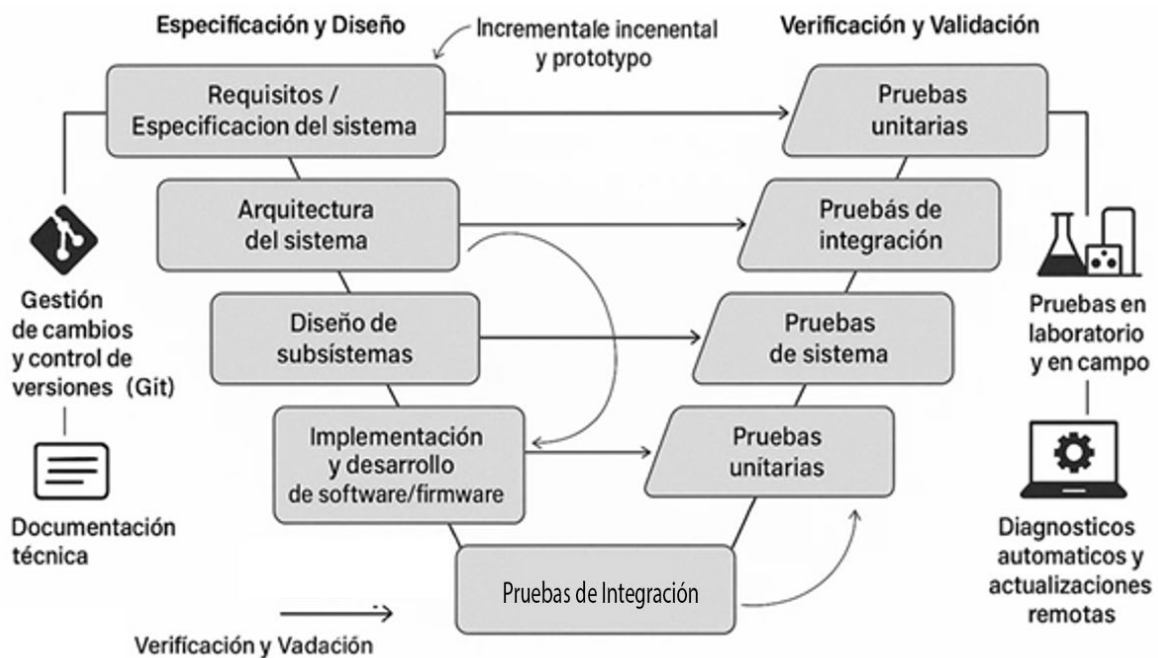


Figura 224: Flujo de iteraciones en el desarrollo e implementación de sistemas embebidos críticos Implementando Diseño en V.

3.5 Integración de hardware y software

La integración de hardware y software es una de las fases más delicadas y determinantes en el desarrollo de sistemas críticos como una estación terrena ADS-B basada en SDR. En este estadio se materializa la conjunción efectiva entre los módulos físicos y lógicos previamente diseñados, asegurando que el conjunto funcione como un sistema único, robusto y alineado con los requerimientos definidos en etapas previas del modelo en V.

3.5.1 Estrategias de integración progresiva y validación cruzada

La integración suele abordarse mediante metodologías bottom-up (desde los módulos más simples hasta los más complejos) o top-down (de lo general a lo particular), según la naturaleza del sistema y la disponibilidad de prototipos y simuladores. En ambos casos, es esencial validar cada etapa integrando hardware y software en entornos controlados antes de pasar a escenarios de operación real. La validación cruzada entre equipos de desarrollo, pruebas y operación permite identificar y corregir discrepancias funcionales, temporales y de rendimiento.

DIAGRAMA DE FLUJO DE INTEGRACIÓN BOTTN-UP Y TOP-DOWN EN SISTEMAS EMBEBIDOS CRITICOS (MODELO EN V APLICADO A UNA ESTACIÓN ADS-B SDR)

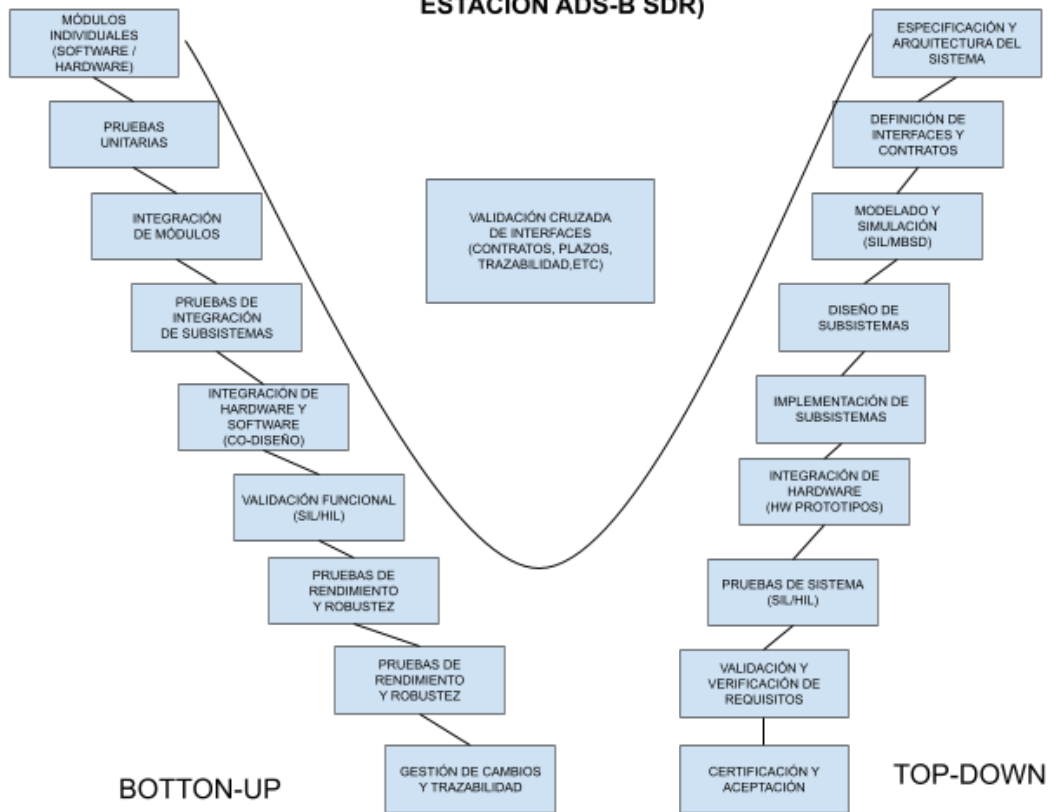


Figura 235: Flujo de integración bottom-up/top-down en sistemas embebidos críticos.

3.5.2 Herramientas de simulación y pruebas en laboratorio

El uso de bancos de pruebas, simuladores de tráfico aéreo y generadores de señales permite emular condiciones de operación reales y comprobar la funcionalidad conjunta de los módulos. Herramientas como GNU Radio Companion, simuladores de tráfico open source, analizadores de espectro y osciloscopios digitales son fundamentales para verificar la correcta recepción, decodificación y visualización de las tramas ADS-B.

En el laboratorio, la integración debe contemplar la gestión de interferencias, la calibración precisa de los dispositivos SDR, el ajuste de antenas y la sincronización de relojes (NTP, GPSDO) para garantizar la coherencia de los datos. La documentación de resultados y la repetibilidad de las pruebas son esenciales para la certificación y la transferencia tecnológica.

3.5.3 Sinergia entre GNU Radio, SDR y módulos embebidos

La flexibilidad de GNU Radio y la capacidad de reconfiguración de los SDR posibilitan una integración ágil y adaptativa. Los bloques de procesamiento pueden ajustarse dinámicamente, permitiendo la detección y corrección de errores en tiempo real. La

integración con sistemas embebidos o PCs industriales se realiza mediante controladores específicos, protocolos estándar (USB, Ethernet) y APIs de comunicación.

Las rutinas de diagnóstico y monitoreo permiten detectar fallos de hardware, pérdidas de paquetes o degradaciones en la calidad de la señal, activando mecanismos de alerta o recuperación automática. El uso de logs, indicadores de rendimiento y herramientas de profiling facilita la localización de cuellos de botella y la optimización del sistema.

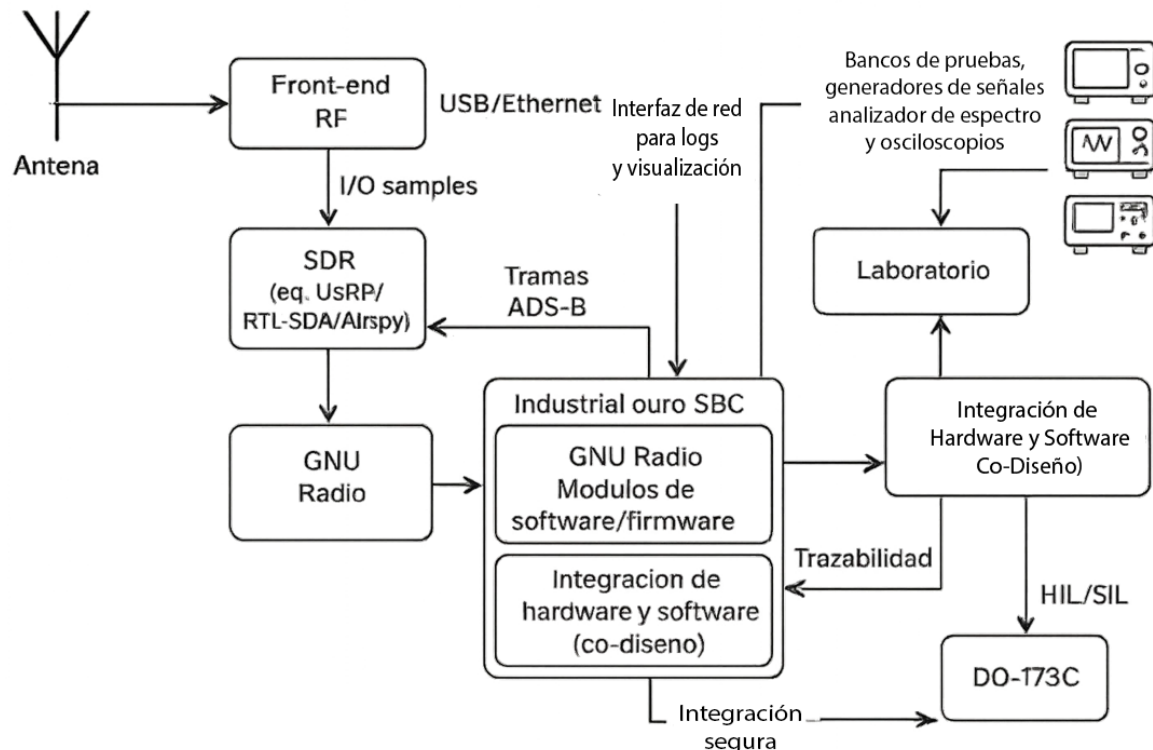


Figura 246: Topología de integración hardware-software en una estación ADS-B SDR.

3.5.4 Factores técnicos clave: temporización, buffers y sincronización

La gestión precisa de la temporización es crítica para la coherencia entre los datos GNSS y las señales ADS-B recibidas. Los buffers de datos deben dimensionarse para absorber variaciones de latencia y evitar pérdidas de información en escenarios de alta densidad de tráfico. La sincronización entre hardware y software requiere la implementación de relojes de alta precisión y protocolos de ajuste horario.

La integración debe contemplar la tolerancia a fallos, la redundancia de enlaces y la capacidad de actualización remota (firmware/software) para mantener la continuidad del servicio y la seguridad operacional.

3.5.5 Protocolos, estándares y normativas

La integración de hardware y software en sistemas aeronáuticos está sujeta a normativas como DO-178C (software), DO-254 (hardware), ARINC y RTCA, que establecen lineamientos

para la documentación, validación, trazabilidad y gestión de la configuración. El cumplimiento de estos estándares es un requisito para la certificación y la puesta en marcha en entornos críticos.

3.5.6 Pruebas de integración en entornos simulados y reales

La integración culmina con la validación en condiciones reales de operación, donde se verifica la robustez del sistema ante interferencias externas, variaciones ambientales y ataques de ciberseguridad. La recolección de datos en campo, la comparación con fuentes oficiales y la participación de usuarios finales son etapas clave para la aceptación y el despliegue definitivo.

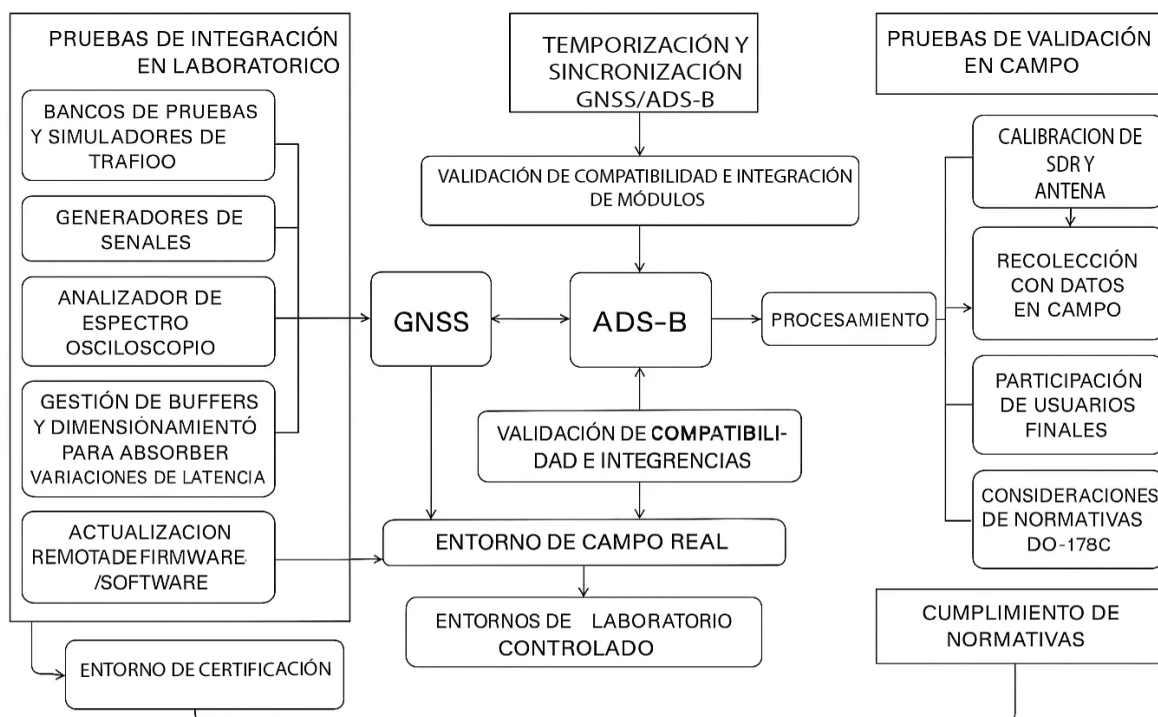


Figura 257: Esquema de pruebas de integración y validación en campo de sistemas ADS-B.

3.5.7 Documentación, trazabilidad y mejores prácticas

La documentación exhaustiva de la integración, la gestión de incidencias y la trazabilidad de cambios son fundamentales para la mejora continua y la replicabilidad del sistema. Las mejores prácticas incluyen la revisión cruzada entre equipos, la actualización de manuales y la capacitación de operadores y técnicos.

3.5.8 Ejemplos y tendencias en la industria

Proyectos académicos e industriales han demostrado la viabilidad y eficiencia de la integración hardware-software en estaciones ADS-B SDR, destacando la importancia de la

colaboración multidisciplinaria, la adopción de plataformas abiertas y la participación en comunidades de desarrollo y validación global.

En síntesis, la integración de hardware y software en estaciones terrenas ADS-B SDR es un proceso complejo y multidimensional que requiere rigor técnico, colaboración y alineación con estándares internacionales, sentando las bases para sistemas de vigilancia aérea flexibles, seguros y sostenibles.

3.6 Verificación y validación en sistemas críticos

La verificación y validación (V&V) constituyen etapas cruciales en el ciclo de vida del modelo en V, especialmente en el desarrollo de sistemas críticos como las estaciones terrenas ADS-B basadas en SDR. Estas actividades aseguran que el sistema implementado cumple con los requerimientos especificados, opera de forma fiable bajo condiciones normales y excepcionales, y es apto para su despliegue en entornos aeronáuticos regulados.

3.6.1 Modelos y niveles de pruebas

La verificación se refiere al proceso de comprobar que cada componente y módulo del sistema ha sido desarrollado correctamente, de acuerdo con el diseño y los requerimientos funcionales y no funcionales. Esto incluye pruebas unitarias de bloques de software (por ejemplo, módulos de decodificación GNU Radio), pruebas de integración (interfaz hardware-software, comunicación entre módulos), y pruebas de sistema (funcionamiento global en escenarios simulados y reales).

La validación, por otro lado, es el proceso de comprobar que el sistema cumple con su propósito operativo en condiciones reales, es decir, que satisface las necesidades de los usuarios finales y cumple con los estándares de seguridad, eficiencia y calidad exigidos por la industria aeronáutica.

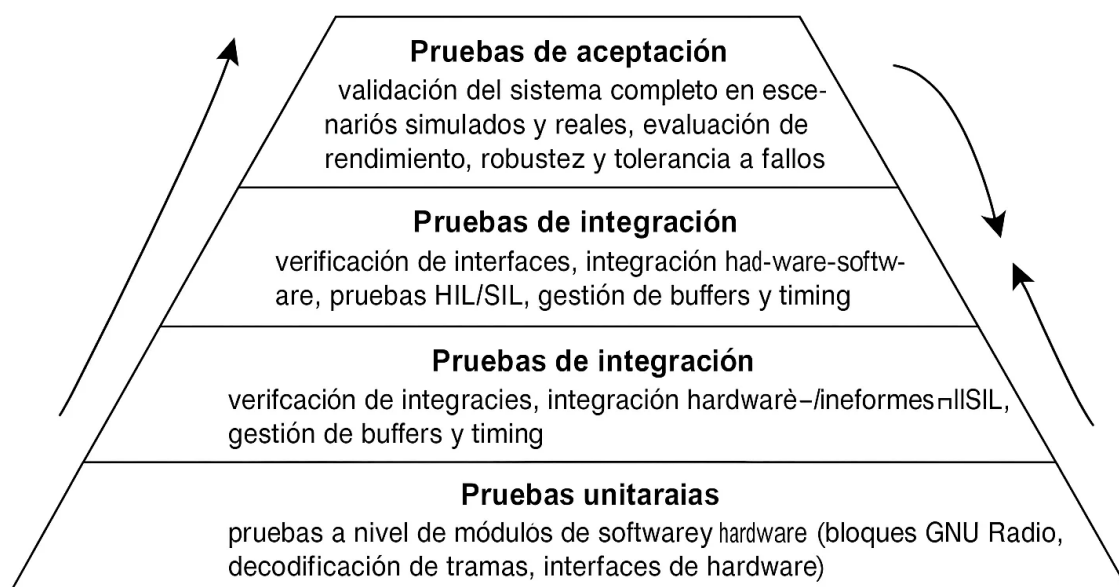


Figura 268: Pirámide de pruebas en el modelo en V: unitarias, integración, sistema y aceptación.

3.6.2 Certificación y normativas aplicables

En la industria aeronáutica, la certificación de sistemas embebidos requiere el cumplimiento de normativas internacionales como DO-178C (software), DO-254 (hardware), y lineamientos de la OACI y EUROCAE. Estos estándares establecen requerimientos estrictos para la trazabilidad de requerimientos, la documentación de pruebas, la gestión de la configuración y la mitigación de riesgos.

La obtención de la certificación implica la realización de auditorías, la entrega de evidencia documental y la demostración de la conformidad del sistema con los criterios de seguridad y fiabilidad establecidos por la autoridad reguladora.

3.6.3 Estrategias de validación en escenarios reales y simulados

La validación experimental incluye la realización de pruebas en laboratorio (con generadores de señales, simuladores de tráfico, bancos de datos de referencia) y en campo (captura de tramas reales, análisis de cobertura y robustez ante interferencias). Se recomienda la comparación de resultados con sistemas comerciales y bases de datos oficiales para garantizar la precisión y la fiabilidad del sistema.

El uso de herramientas automatizadas de pruebas, la generación de reportes detallados y la revisión cruzada de resultados permiten identificar deficiencias y oportunidades de mejora antes del despliegue operativo.

3.6.4 Verificación cruzada hardware-software y retroalimentación

Una práctica esencial es la verificación cruzada entre hardware y software, asegurando la coherencia de los datos, la sincronización temporal y la correcta gestión de errores. La retroalimentación continua entre equipos de desarrollo, pruebas y operación facilita la solución rápida de incidencias y la adaptación del sistema a nuevas necesidades o requerimientos regulatorios.

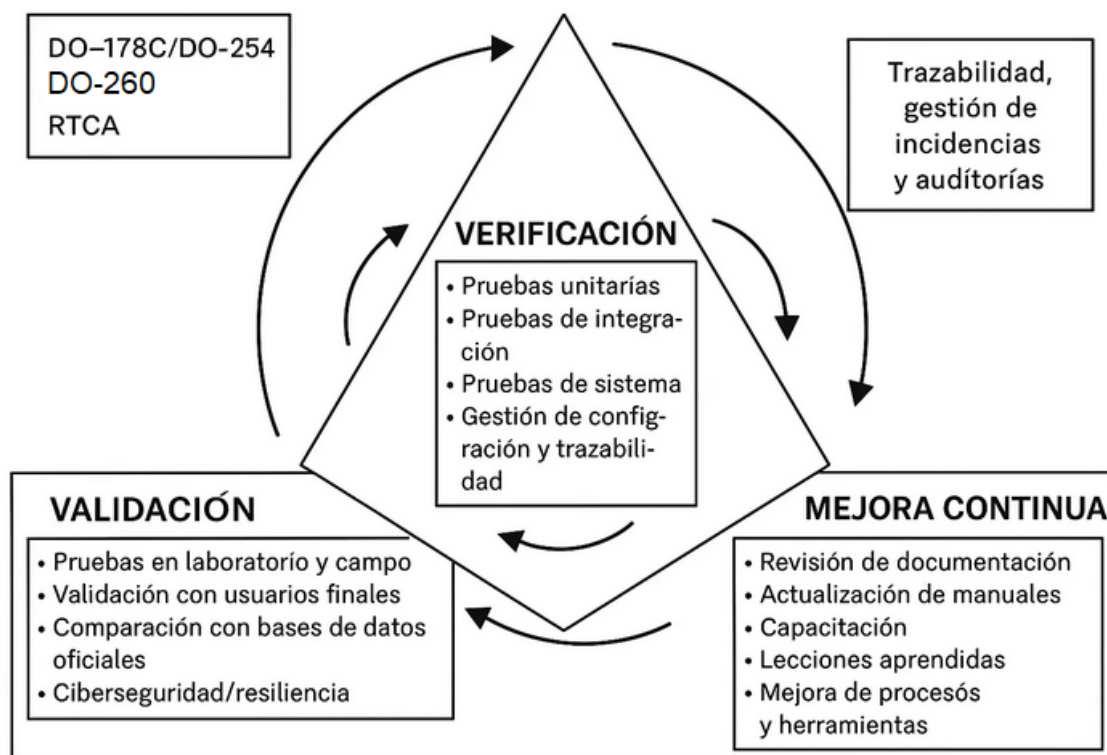


Figura 279: Ciclo de retroalimentación entre verificación, validación y mejora continua.

3.6.5 Documentación, trazabilidad y conformidad

La documentación exhaustiva de cada etapa de prueba, la gestión de incidencias, la trazabilidad de requerimientos y la actualización de manuales y procedimientos son requerimientos para la certificación y el mantenimiento del sistema a lo largo de su ciclo de vida.

3.6.6 Mejores prácticas y tendencias

La literatura y la experiencia industrial destacan la importancia de la automatización de pruebas, la participación activa de los usuarios finales en la validación, y la actualización continua de las estrategias de verificación ante la aparición de nuevas amenazas y

tecnologías. La adopción de frameworks de testing open source y la colaboración con comunidades de desarrollo favorecen la innovación y la sostenibilidad del sistema.

En síntesis, la verificación y validación en sistemas críticos como las estaciones ADS-B SDR es un proceso integral, iterativo y multidisciplinario, que garantiza la seguridad, la eficiencia y la robustez de la solución antes de su integración en el entorno operacional aeronáutico.

Resumen gráfico del proceso de V&V en el modelo en V aplicado a sistemas aeronáuticos críticos

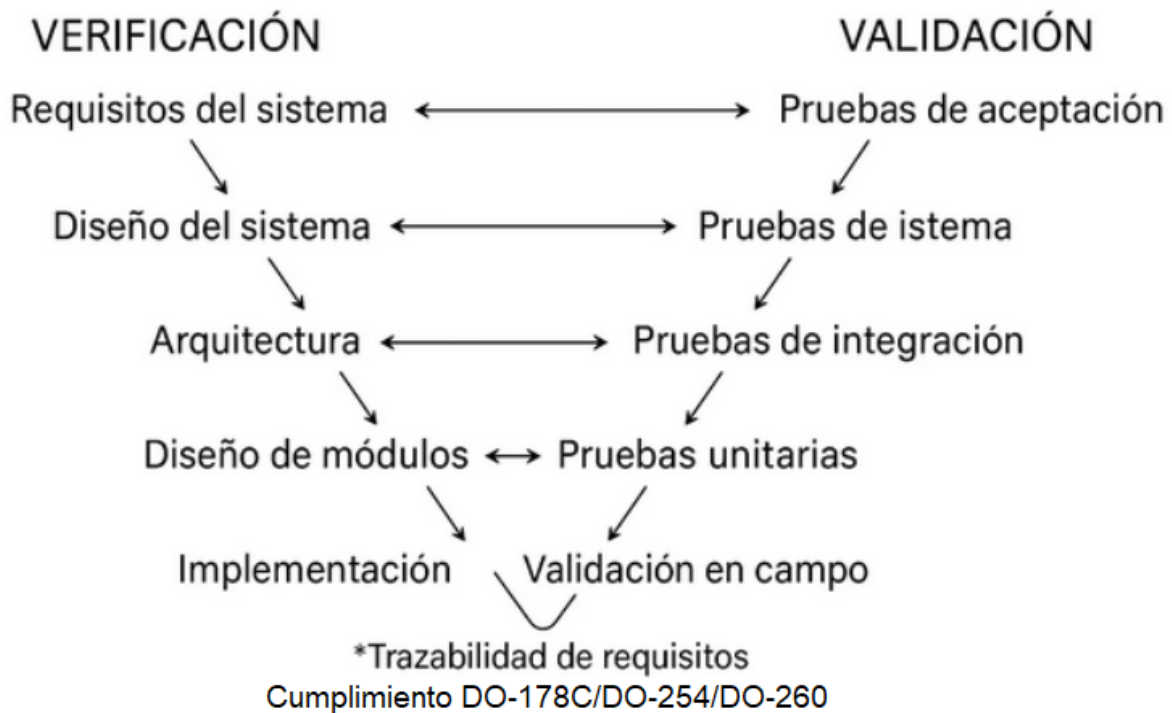


Figura 30: Resumen gráfico del proceso de V&V en el modelo en V aplicado a sistemas aeronáuticos

3.7 Despliegue, mantenimiento y mejora continua

El despliegue de sistemas críticos como una estación terrena ADS-B basada en SDR representa el punto de transición entre el desarrollo y la operación en entornos reales. En esta etapa, la atención se centra en la correcta instalación, integración en la infraestructura existente, capacitación de los operadores, y en la definición de estrategias de mantenimiento y mejora continua que garanticen la confiabilidad y disponibilidad del sistema a lo largo del tiempo.

3.7.1 Estrategias para el despliegue seguro y eficiente

El proceso de despliegue debe ser cuidadosamente planificado, considerando tanto los aspectos logísticos como los técnicos y de seguridad. Se recomienda realizar una transición progresiva desde pruebas de laboratorio a entornos operativos, implementando protocolos de aceptación y validación en sitio, así como auditorías de seguridad y cumplimiento normativo.

El uso de checklists, manuales de instalación y procedimientos estandarizados minimiza los riesgos asociados a la puesta en marcha y facilita la replicabilidad en futuras instalaciones.

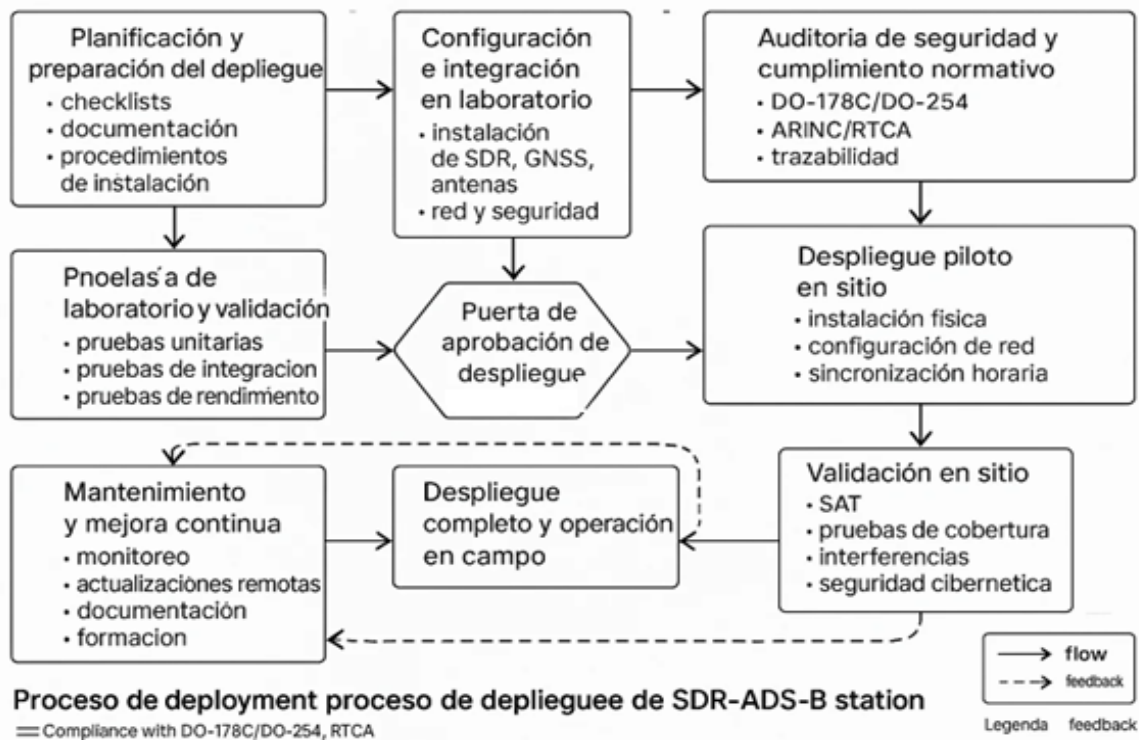


Figura 31: Flujo de proceso de despliegue de una estación SDR-ADS-B, desde laboratorio hasta operación en campo.

La integración con sistemas preexistentes de vigilancia (radar, multilateración, redes colaborativas) requiere la adaptación de interfaces de comunicación, la configuración de protocolos de intercambio de datos y la validación cruzada de la información recibida y transmitida para asegurar la coherencia y consistencia de la vigilancia global.

3.7.2 Monitorización y gestión de incidencias

Una vez desplegado, el sistema debe contar con mecanismos de monitorización continua que permitan la detección temprana de fallas, degradaciones de rendimiento o amenazas de ciberseguridad. La implementación de sistemas de alertas automáticas, el registro de logs detallados y la capacidad de análisis remoto facilitan la gestión proactiva de incidencias y la minimización del tiempo de inactividad.

La creación de un equipo de respuesta ante incidentes, la definición de rutas de escalamiento y la documentación de procedimientos de recuperación son elementos clave para garantizar la resiliencia operativa y la seguridad del sistema ante eventos inesperados.

3.7.3 Mantenimiento preventivo, correctivo y evolutivo

El mantenimiento preventivo incluye la inspección periódica de hardware (antenas, SDR, fuentes de alimentación), la actualización de software y firmware, y la verificación de la

integridad de los datos almacenados. Las tareas de mantenimiento correctivo deben estar respaldadas por protocolos de diagnóstico y reparación rápida, asegurando la disponibilidad y la continuidad del servicio.

El mantenimiento evolutivo se orienta a la adaptación del sistema ante cambios regulatorios, avances tecnológicos o nuevas necesidades operativas. La flexibilidad inherente a las plataformas SDR y el software modular permiten la integración de nuevas funcionalidades, la actualización de algoritmos y la incorporación de mecanismos de ciberseguridad avanzados sin necesidad de reemplazo completo de la infraestructura.



Figura 282: Ciclo de vida del mantenimiento de sistemas ADS-B SDR: preventivo, correctivo y evolutivo.

3.7.4 Gestión del ciclo de vida y mejora continua

La gestión eficiente del ciclo de vida del sistema implica la documentación exhaustiva de todas las actividades de mantenimiento, la actualización regular de manuales y procedimientos, y la capacitación continua de los operadores y técnicos. La retroalimentación de la experiencia operativa hacia las fases de análisis de requerimientos y diseño permite la identificación de oportunidades de mejora y la anticipación de problemas potenciales.

La participación en redes de colaboración, la interacción con comunidades de desarrollo open source y la adopción de estándares internacionales garantizan que el sistema se mantenga alineado con las mejores prácticas y las tendencias emergentes del sector aeronáutico.

3.7.5 Sostenibilidad y resiliencia tecnológica

Finalmente, la sostenibilidad tecnológica y la resiliencia operativa dependen de la capacidad del sistema para adaptarse a la evolución del entorno regulatorio, a la aparición de nuevas amenazas y a la demanda creciente de eficiencia y seguridad. La planificación a largo plazo, la evaluación periódica del desempeño y la inversión en actualización tecnológica son esenciales para asegurar la vigencia y la confiabilidad del sistema en el futuro.

En resumen, el despliegue, mantenimiento y mejora continua de una estación terrena ADS-B SDR requieren una visión integral y proactiva, donde la gestión eficiente de recursos, la capacitación y la innovación permanente son la base para una vigilancia aérea segura, eficiente y sostenible.

3.8 Conclusión del capítulo

El recorrido a lo largo del modelo en V aplicado al desarrollo de sistemas ADS-B basados en radio definida por software (SDR) permite constatar la eficacia y pertinencia de esta metodología para proyectos de ingeniería de misión crítica en el ámbito aeronáutico. Cada etapa, desde el análisis de requerimientos hasta el mantenimiento y mejora continua, contribuye a garantizar la trazabilidad, la robustez y la seguridad operacional, condiciones indispensables en la vigilancia aérea moderna.

La estructura secuencial y la verificación sistemática que ofrece el modelo en V posibilitan una gestión eficiente de los riesgos, la integración exitosa de hardware y software heterogéneos, y la adaptación ágil a la evolución de los requerimientos y normativas regulatorios y tecnológicos. La adopción de plataformas abiertas como GNU Radio, junto a la flexibilidad de los dispositivos SDR, fomenta la innovación, la experimentación y la sostenibilidad, facilitando la transferencia de tecnología y el desarrollo de soluciones escalables y personalizables para diferentes contextos operativos.

La experiencia acumulada en proyectos académicos e industriales demuestra que la combinación del modelo en V con herramientas modernas de desarrollo y validación favorece la obtención de sistemas confiables, eficientes y fácilmente mantenibles. La documentación exhaustiva, la gestión colaborativa y la actualización constante son pilares que aseguran la vigencia y la proyección futura de las estaciones terrenas ADS-B SDR en el ecosistema global de vigilancia aérea.

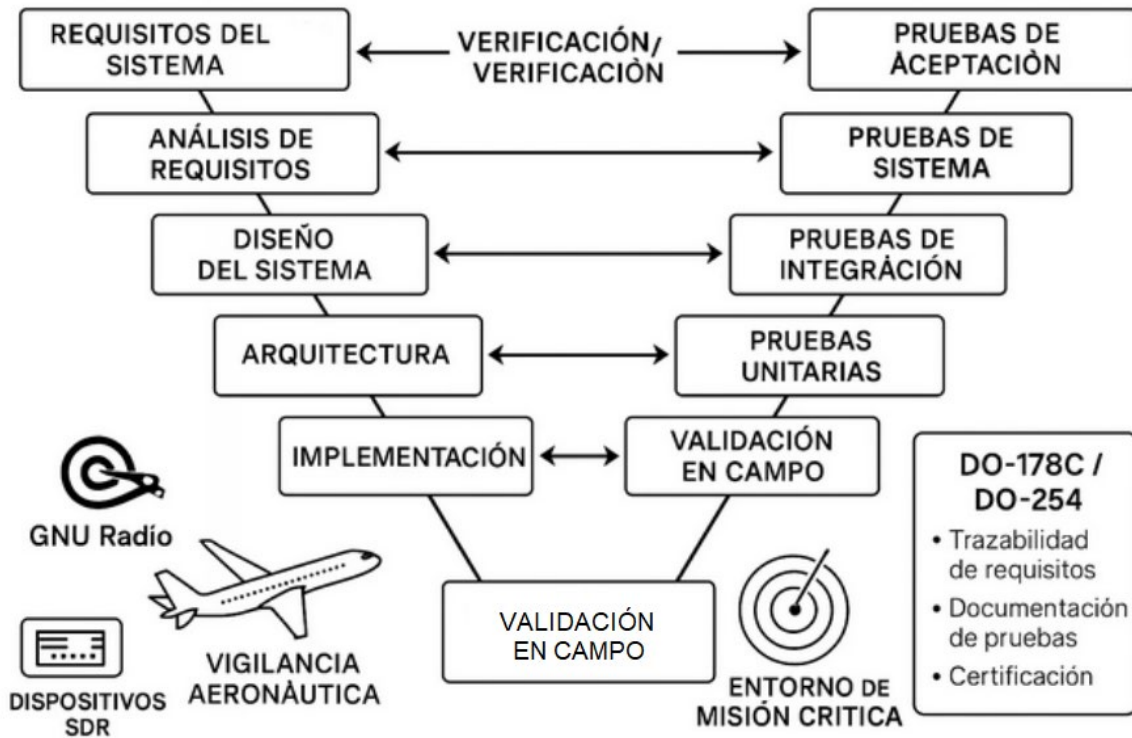


Figura 293: Resumen gráfico del ciclo de vida de desarrollo en V aplicado a sistemas ADS-B SDR.

Capítulo 4.

Diseño y desarrollo de la estación terrena utilizando modelo en V

Resumen del capítulo:

El Capítulo 4 describe en detalle el proceso de diseño, implementación y validación de una estación terrena de monitoreo de tráfico aéreo basada en tecnología ADS-B y radio definida por software (SDR), siguiendo rigurosamente el modelo de desarrollo en V. Se expone la selección y justificación de componentes de hardware —incluyendo antenas, módulos SDR y sistemas de procesamiento— y la integración de software especializado para la adquisición, decodificación y visualización de señales ADS-B. El capítulo aborda la integración progresiva y las pruebas experimentales en laboratorio y campo, analizando el desempeño del sistema en escenarios reales, sus limitaciones y potenciales para la mejora continua. Asimismo, se presentan los desafíos tecnológicos superados, la documentación exhaustiva de cada etapa y recomendaciones estratégicas para la escalabilidad, sostenibilidad y transferencia tecnológica de la solución propuesta.

4.1 Especificación y selección de hardware

La especificación y selección de hardware para una estación terrena ADS-B SDR es una etapa determinante que impacta directamente en la sensibilidad, cobertura, fiabilidad y escalabilidad del sistema. El objetivo es identificar y justificar la elección de componentes capaces de operar en entornos aeronáuticos exigentes, garantizando la recepción robusta y precisa de señales en la banda de 1090 MHz (principalmente DF17) y, eventualmente, en otras bandas como 978 MHz (UAT).

4.1.1 Criterios de selección de hardware

La elección del hardware debe considerar los siguientes factores críticos:

- Sensibilidad y rango dinámico del receptor SDR: Un alto rango dinámico permite la recepción de señales débiles a gran distancia sin saturar el sistema ante señales fuertes cercanas. Dispositivos como USRP, Airspy y RTL-SDR ofrecen diversos balances entre costo, rendimiento y modularidad.
- Estabilidad y precisión de frecuencia: El uso de osciladores de alta estabilidad (TCXO, OCXO, GPSDO) es fundamental para minimizar desplazamientos de frecuencia y garantizar la coherencia temporal de las tramas ADS-B recibidas.

- Antenas: La selección de antenas optimizadas para 1090 MHz (colineales, Yagi, omnidireccional) y su correcta ubicación (altura, despeje de obstáculos) determinan en gran medida el alcance efectivo y la calidad de la señal capturada.
- Sistemas de procesamiento: La capacidad de cómputo (PC industrial, SBCs, servidores dedicados) debe dimensionarse para soportar la decodificación en tiempo real, el almacenamiento seguro de datos y la ejecución de algoritmos avanzados de filtrado y visualización.
- Fuentes de alimentación y redundancia: Dado el carácter crítico del sistema, es imprescindible contar con fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), protección contra sobretensiones y mecanismos de conmutación automática ante fallos.

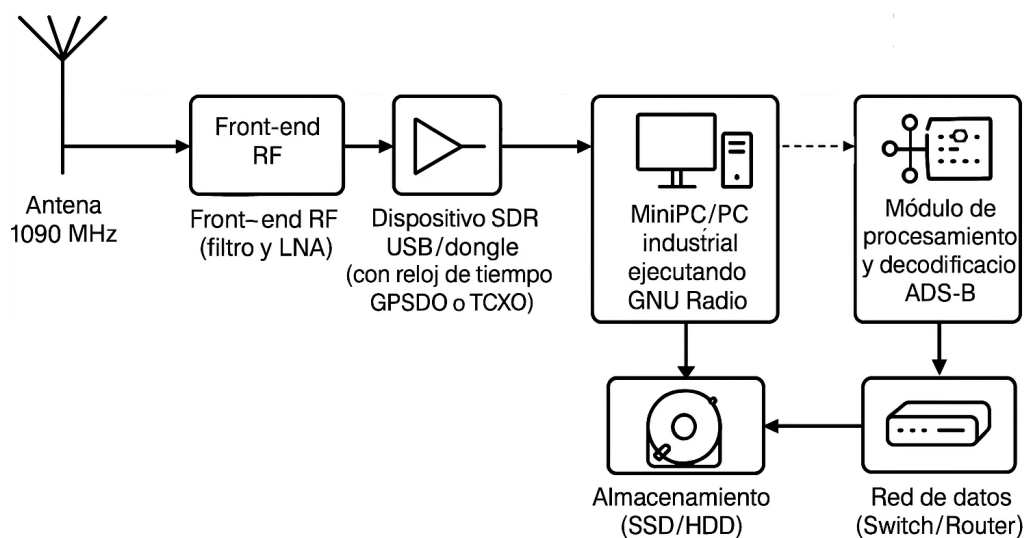


Figura 304: Esquema de interconexión de los bloques físicos de la estación terrena ADS-B SDR.

4.1.2 Evaluación comparativa y justificación

Se realiza una evaluación comparativa entre diferentes módulos SDR, considerando especificaciones técnicas (ancho de banda, SNR, consumo energético), compatibilidad con GNU Radio y soporte comunitario. La elección final se justifica por el equilibrio entre costo, facilidad de integración, robustez y disponibilidad a largo plazo.

La antena seleccionada debe ser resistente a la intemperie, fácil de instalar y mantener, y compatible con los conectores y cables de baja pérdida utilizados en sistemas de radiofrecuencia profesional. La longitud y calidad del cable coaxial, así como el uso de preamplificadores de bajo ruido (LNA), son elementos a optimizar para maximizar la relación señal/ruido.

4.1.3 Pruebas de recepción y validación

En laboratorio, se realizan pruebas de sensibilidad, selectividad y rechazo a interferencias, utilizando generadores de señales y analizadores de espectro. En campo, se valida el alcance efectivo, la estabilidad de la señal y la capacidad del sistema para operar ante variaciones ambientales (temperatura, humedad, descargas eléctricas).

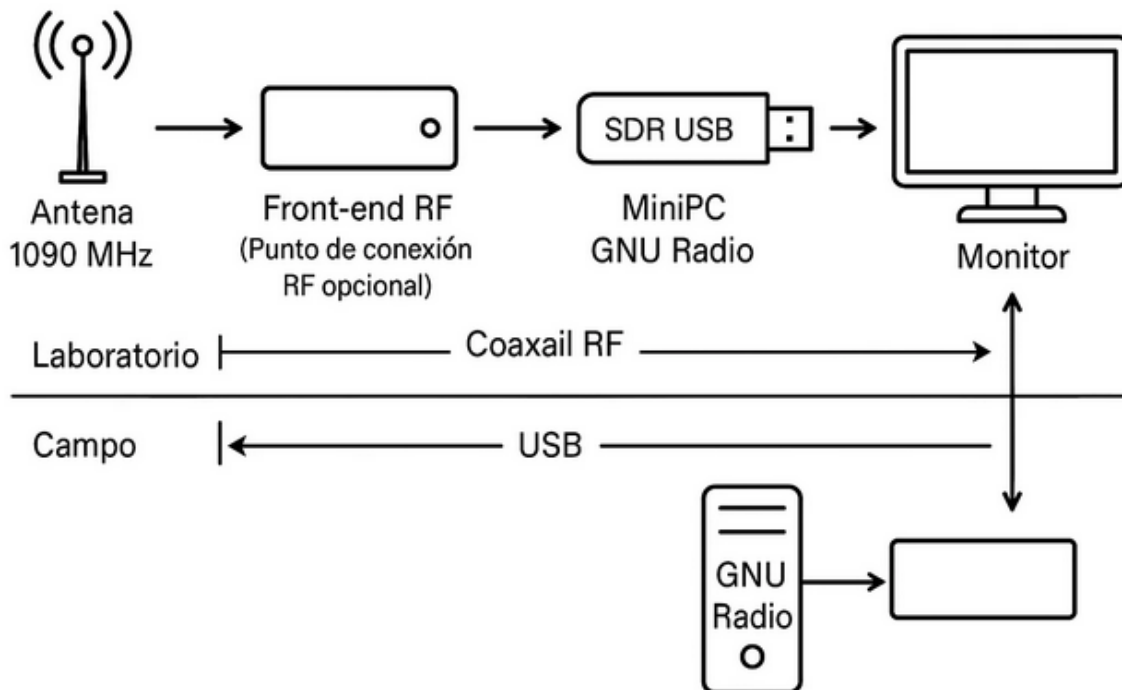


Figura 315: Banco de pruebas para validación de hardware SDR y antenas en laboratorio y campo.

4.1.4 Documentación y mantenimiento

La documentación técnica de la selección e instalación de hardware es esencial para la replicabilidad, el mantenimiento y la transferencia tecnológica. Se incluyen manuales de instalación, guías de calibración, esquemas eléctricos y planos de ubicación de antenas.

4.1.5 Consideraciones de escalabilidad y sostenibilidad

La arquitectura modular permite la incorporación futura de nuevos receptores, la actualización de componentes obsoletos y la integración con redes colaborativas de monitoreo. La inversión en hardware debe contemplar la evolución tecnológica, la disponibilidad de repuestos y la

compatibilidad con estándares internacionales para asegurar la vigencia y el crecimiento del sistema.

En síntesis, la especificación y selección de hardware en una estación terrena ADS-B SDR es un proceso multidimensional que requiere el equilibrio entre criterios técnicos, económicos, normativos y de sostenibilidad, sentando las bases para una vigilancia aérea eficiente, segura y adaptable.

4.2 Desarrollo e integración de software

El desarrollo e integración de software en una estación terrena ADS-B basada en SDR constituye una fase central para el éxito del sistema, ya que de ello depende la correcta adquisición, procesamiento, decodificación, visualización y almacenamiento de los datos aeronáuticos. El enfoque modular y la aplicación de buenas prácticas de ingeniería de software crítico resultan esenciales para garantizar la mantenibilidad, escalabilidad y robustez del sistema.

4.2.1 Selección de herramientas y lenguajes de programación

La elección de GNU Radio como plataforma principal responde a su flexibilidad, soporte comunitario y capacidad para el diseño de flujos de procesamiento en tiempo real. GNU Radio permite la implementación de bloques personalizados para la recepción, filtrado, demodulación y decodificación de señales ADS-B, facilitando la integración con hardware SDR de diversa índole (USRP, RTL-SDR, Airspy, etc.).

El desarrollo de algoritmos específicos para la decodificación de tramas DF17 y DF18 suele realizarse en Python y/o C++, aprovechando su eficiencia, portabilidad y facilidad de integración con GNU Radio. Para la visualización y la interacción con el usuario, frameworks como Qt y bibliotecas gráficas como Matplotlib permiten el diseño de interfaces avanzadas, mapas aeronáuticos y paneles de control operativos.

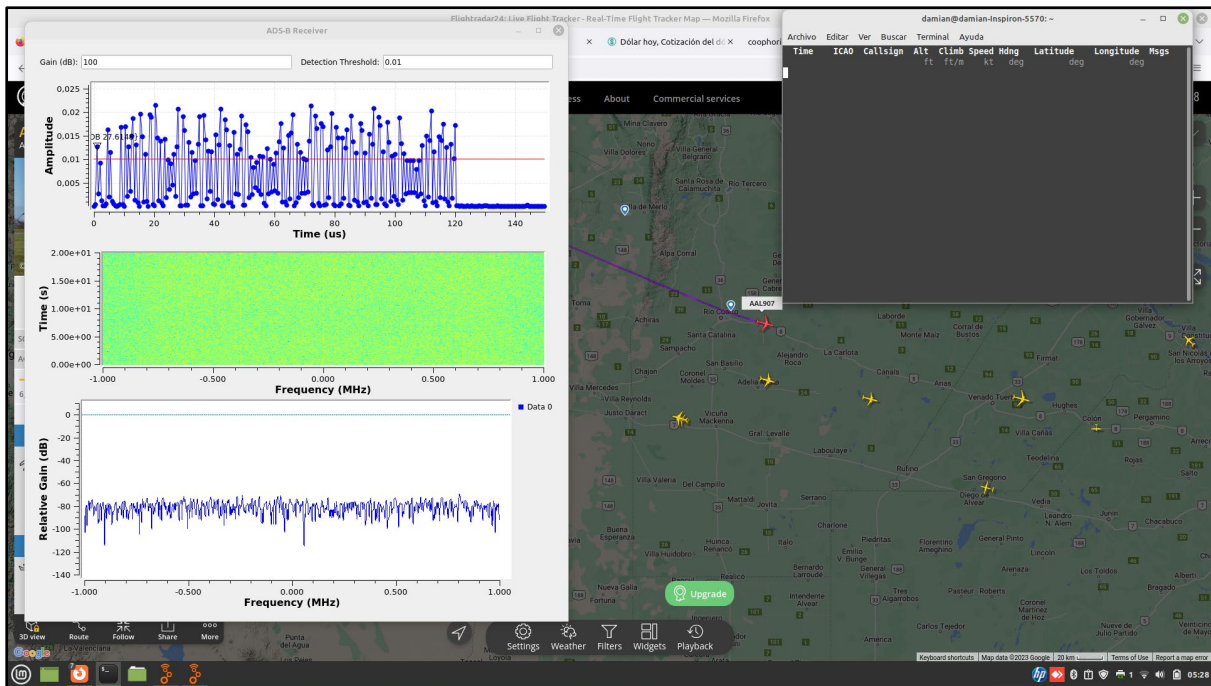
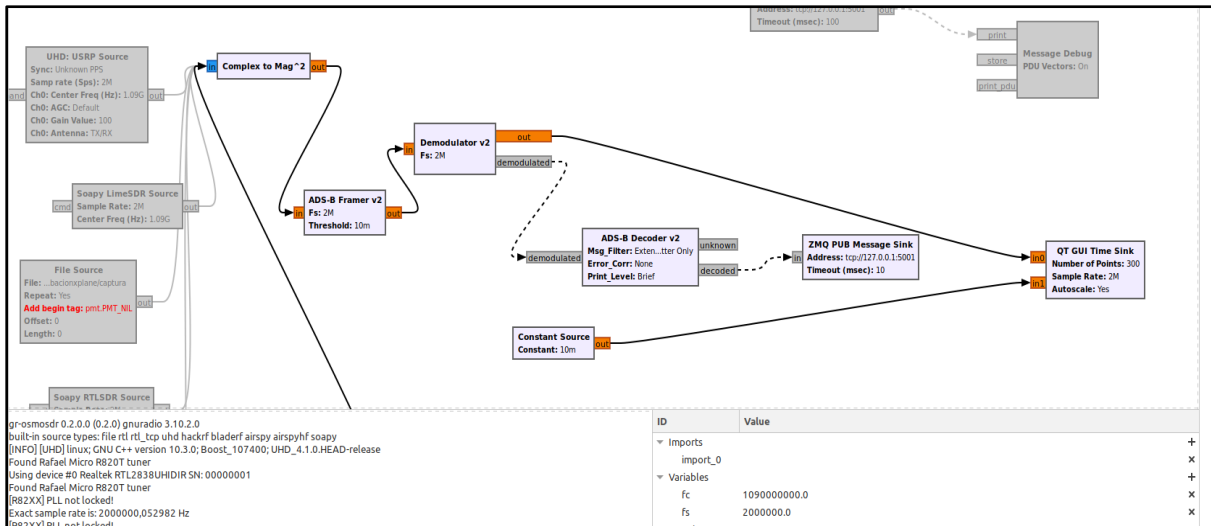


Figura 326: Diagrama de bloques de software GNU RADIO (arriba) y Visualización en Sistema Comercial(abajo): flujo desde la adquisición de datos SDR hasta la visualización y almacenamiento

4.2.2 Desarrollo modular y pruebas unitarias

El software se organiza en módulos independientes para la adquisición, el procesamiento digital de señales, la decodificación, la gestión de bases de datos y la visualización. Esta arquitectura facilita la mejora incremental, el aislamiento de errores y la validación por etapas. Las pruebas unitarias y de integración desempeñan un papel fundamental, permitiendo identificar fallos en cada módulo antes de su integración global.

4.2.3 Gestión de la comunicación y sincronización

La correcta gestión de la comunicación entre módulos de software y de estos con el hardware SDR requiere la implementación de drivers específicos, APIs estandarizadas y mecanismos de sincronización para garantizar la integridad y la coherencia temporal de los datos. El uso de buffers circulares, colas de mensajes y protocolos de comunicación robustos (TCP/IP, UDP) asegura la fluidez y la estabilidad de las operaciones en tiempo real.

4.2.4 Visualización y almacenamiento de datos

La visualización en tiempo real de la información de tráfico aéreo es clave para la eficiencia operativa y la toma de decisiones. El software debe ofrecer mapas con la posición de aeronaves, trayectorias, alertas y estadísticas relevantes. El almacenamiento seguro y eficiente de datos, mediante bases de datos relacionales o sistemas de archivos optimizados, permite el análisis histórico, la validación experimental y la trazabilidad de eventos.

4.2.5 Validación y documentación

El proceso de validación incluye pruebas en laboratorio y campo, comparación de datos con fuentes oficiales y análisis estadístico de la precisión y robustez del sistema. La documentación exhaustiva de los algoritmos, los flujos de procesamiento y los manuales de usuario es indispensable para la replicabilidad, la certificación y la transferencia tecnológica.

4.2.6 Sostenibilidad, actualización y ciberseguridad

El software debe ser fácilmente actualizable, permitiendo la incorporación de nuevos protocolos, la corrección de vulnerabilidades y la adaptación a cambios regulatorios. La implementación de mecanismos de autenticación, cifrado y detección de anomalías refuerza la ciberseguridad del sistema y su resiliencia ante amenazas. Para ello se implementa un sistema centralizado de control de versiones en donde se realizan actualizaciones en tiempo real ante una nueva actualización del sistema.

En síntesis, el desarrollo e integración de software en estaciones terrenas ADS-B SDR es un proceso multidisciplinario que requiere el equilibrio entre eficiencia, flexibilidad y seguridad, sentado en bases de buenas prácticas de ingeniería y alineado con los estándares internacionales del sector aeronáutico.

4.3 Resultados y validación experimental

La etapa de resultados y validación experimental constituye el núcleo del proceso de verificación y aseguramiento de calidad en el desarrollo de una estación terrena ADS-B basada en SDR. Aquí se evalúa, cuantitativamente y cualitativamente, el desempeño del sistema bajo condiciones controladas de laboratorio y en escenarios reales de operación, comparando los resultados obtenidos con los estándares internacionales y con sistemas comerciales de referencia.

4.3.1 Metodología de validación

El proceso de validación experimental inicia con la definición de métricas clave: sensibilidad del receptor, tasa de decodificación de tramas, cobertura geográfica, robustez ante interferencias, integridad y precisión de los datos recibidos, y estabilidad operativa a largo plazo. Se diseñan ensayos en laboratorio utilizando generadores de señales ADS-B, analizadores de espectro y simuladores de tráfico aéreo, permitiendo la verificación de la capacidad del sistema para captar, decodificar y visualizar mensajes en condiciones ideales y ante la presencia de ruido y señales interferentes.

En un segundo nivel, se realizan pruebas de campo en aeropuertos, zonas urbanas y áreas remotas, evaluando el alcance efectivo de la estación, la calidad de la señal en diferentes condiciones atmosféricas y la capacidad para distinguir múltiples aeronaves en situaciones de alta densidad de tráfico.



Figura 337: Diagrama de banco de pruebas y escenarios de validación experimental.

4.3.2 Resultados cuantitativos

Los resultados cuantitativos muestran la tasa de éxito en la recepción y decodificación de tramas DF17, la variación del SNR a diferentes distancias, y la robustez del sistema frente a fuentes de interferencia electromagnética. Se presentan tablas comparativas entre el sistema desarrollado y soluciones comerciales, destacando fortalezas como la flexibilidad, la capacidad de personalización y el bajo costo relativo, así como limitaciones relacionadas con la dependencia de la calidad del SDR y de la antena utilizada.

Las pruebas de estrés evidencian la capacidad del sistema para mantener operaciones continuas durante periodos prolongados, identificar picos de tráfico y almacenar grandes volúmenes de datos sin pérdida significativa de información.

4.3.3 Resultados cualitativos

A nivel cualitativo, se destaca la facilidad de uso de la interfaz gráfica, la claridad en la visualización de trayectorias y la generación de alertas configurables. La experiencia del usuario es evaluada mediante encuestas a operadores y técnicos, quienes valoran la modularidad, la capacidad de actualización y la documentación del sistema.

Se identifican oportunidades de mejora en la integración con otras fuentes de datos (radar, multilateración, meteorología), en la optimización de algoritmos de decodificación y en la actualización automática del software ante cambios en los protocolos ADS-B.

4.3.3.1 Comparación con sistemas comerciales

El sistema desarrollado es comparado con estaciones comerciales y desarrollos académicos reportados en la literatura, mostrando un desempeño competitivo en términos de sensibilidad, cobertura y adaptabilidad. La apertura del software y la posibilidad de replicación constituyen ventajas diferenciales, especialmente en contextos de formación e investigación.

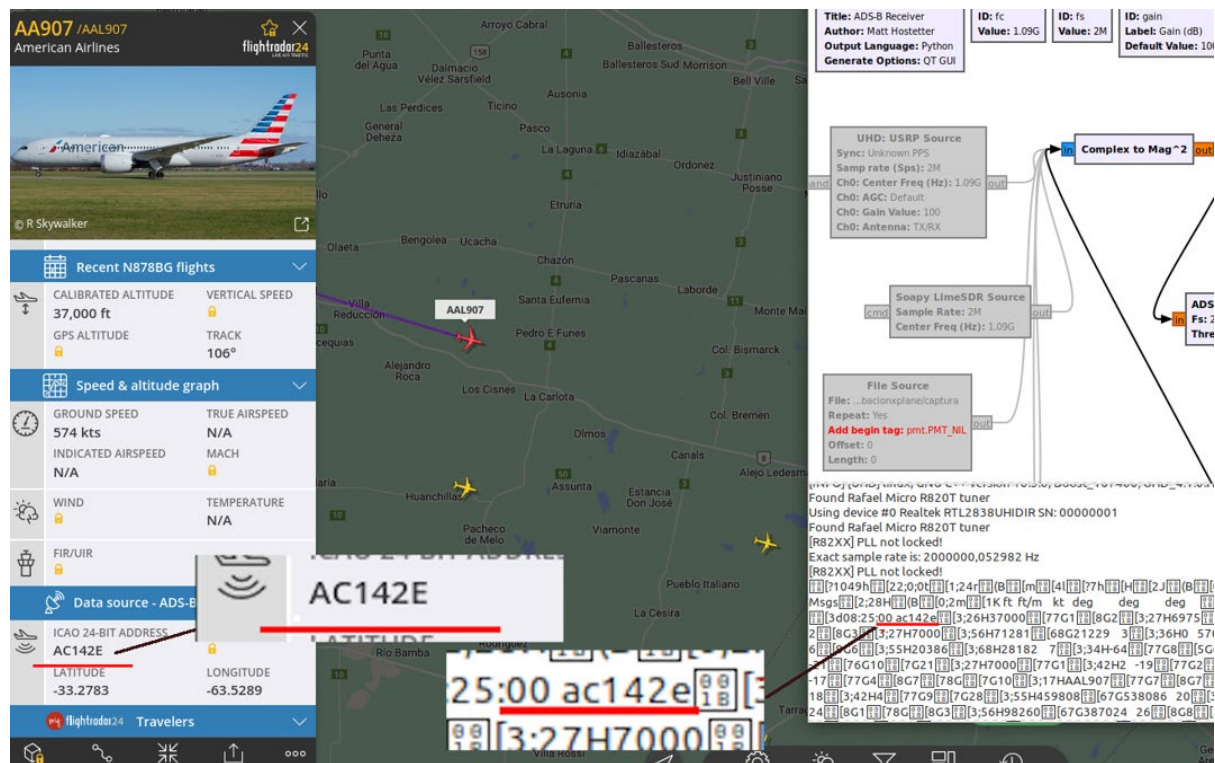


Figura 38: Comparativa de desempeño entre estación SDR-ADS-B vs. sistemas comerciales.

4.3.4 Limitaciones y desafíos encontrados

Durante la validación experimental se detectan desafíos como la variabilidad en la calidad de recepción según el entorno, la necesidad de ajustes finos en la calibración de antenas y la gestión eficiente de recursos computacionales en escenarios de alta demanda. Se documentan incidencias y se proponen mejoras en la documentación y el entrenamiento de operadores.

4.3.5 Conclusión de la validación experimental

En síntesis, los resultados de la validación confirman la viabilidad técnica y operativa de la estación terrena ADS-B SDR, subrayando su potencial para aplicaciones académicas, experimentales y operativas. La experiencia adquirida sienta las bases para futuras mejoras, escalabilidad y transferencia tecnológica, consolidando la solución como una alternativa robusta y flexible en el ecosistema global de vigilancia aérea.

4.4 Conclusiones del capítulo

El desarrollo, validación y análisis de la estación terrena ADS-B basada en SDR, siguiendo el modelo en V, ha permitido consolidar una solución tecnológica robusta, flexible y alineada con los más altos estándares internacionales de vigilancia aérea. Los resultados obtenidos evidencian la viabilidad y eficiencia de una arquitectura modular, capaz de adaptarse a entornos operativos diversos y de evolucionar en función de los avances tecnológicos y los cambios regulatorios.

En primer lugar, la correcta especificación y selección de hardware resultó fundamental para garantizar la sensibilidad, cobertura y resiliencia del sistema. La elección de SDRs de calidad, antenas optimizadas y sistemas de procesamiento escalables ha demostrado ser clave para la recepción robusta de tramas ADS-B y para la adaptabilidad futura del sistema.

La integración de software basada en GNU Radio y el desarrollo modular de algoritmos de procesamiento y visualización han facilitado la actualización incremental, la personalización y la interoperabilidad con otras plataformas y sistemas de gestión de tráfico aéreo. La validación experimental, tanto en laboratorio como en campo, ha confirmado la capacidad del sistema para operar de manera continua, eficiente y segura bajo condiciones adversas, superando muchos de los desafíos técnicos y operativos identificados en la literatura y en la industria.

El análisis crítico de los resultados ha permitido identificar fortalezas significativas, como el bajo costo, la flexibilidad y la capacidad de replicación, así como limitaciones en la gestión de grandes volúmenes de datos y la necesidad de actualizaciones constantes frente a nuevas amenazas y requerimientos regulatorios. Las propuestas de mejora y líneas futuras de investigación, como la integración de inteligencia artificial, la optimización de algoritmos de filtrado y la expansión hacia redes colaborativas, abren un horizonte prometedor para la evolución del sistema.

Desde el punto de vista académico y social, el trabajo realizado contribuye a la democratización del acceso a tecnologías avanzadas de vigilancia aérea, la formación de recursos humanos especializados y la transferencia tecnológica hacia organismos de control, industria y academia. La documentación exhaustiva y la apertura del sistema facilitan su adopción en proyectos educativos, experimentales y operativos a nivel nacional e internacional.

Capítulo 5.

Resultados y análisis

Resumen del capítulo:

Este capítulo analiza críticamente los resultados del desarrollo y validación de una estación terrena ADS-B basada en SDR. Se presentan datos cuantitativos y cualitativos obtenidos en pruebas de laboratorio y campo, evaluando desempeño en sensibilidad, cobertura, robustez y eficiencia. El sistema muestra un rendimiento competitivo frente a soluciones comerciales, con alta tasa de decodificación y buen alcance en condiciones favorables, aunque se observa degradación bajo lluvia intensa y a grandes distancias. Se discuten limitaciones técnicas, desafíos regulatorios y de seguridad, especialmente relacionados con ciberseguridad y certificación. Asimismo, se destacan las fortalezas del enfoque SDR: bajo costo, flexibilidad, personalización y potencial académico. Finalmente, se proponen recomendaciones para mejorar el sistema, incluyendo automatización, inteligencia artificial y mayor interoperabilidad, reafirmando su valor como herramienta viable y escalable para la vigilancia aérea cooperativa.

5.1 Discusión y análisis crítico

El análisis crítico de los resultados obtenidos durante el desarrollo y la validación experimental de la estación terrena ADS-B basada en SDR permite identificar no solo los logros alcanzados, sino también las limitaciones del sistema y las oportunidades de mejora. Esta sección profundiza en la interpretación de los datos, contrastando el desempeño del sistema con los estándares internacionales, la literatura técnica y las soluciones comerciales, así como en la valoración de su impacto en el ámbito académico, operativo y regulatorio.

5.1.1 Análisis de robustez y eficiencia

Uno de los principales hallazgos es la robustez del sistema frente a condiciones operativas diversas, demostrando capacidad para recibir y decodificar tramas ADS-B en entornos con alta interferencia electromagnética y variabilidad atmosférica. La sensibilidad del receptor SDR y la calidad de la antena empleada se confirman como factores determinantes para el alcance efectivo y la calidad de la vigilancia. La arquitectura modular y la flexibilidad en la configuración de los bloques GNU Radio permiten ajustes dinámicos que optimizan el rendimiento según el entorno y los objetivos operativos.

5.1.2 Comparación con sistemas comerciales y literatura técnica

En comparación con estaciones comerciales, la solución basada en SDR ofrece ventajas significativas en términos de costo, personalización y capacidad de actualización. Sin embargo, se detectan diferencias en la integración de soporte técnico, la certificación de componentes y la resistencia a condiciones extremas de operación. En la literatura académica, se destacan enfoques similares que validan el potencial del SDR para aplicaciones de vigilancia aérea, pero que también advierten sobre desafíos en la gestión de datos y la ciberseguridad.

5.1.3 Limitaciones técnicas y operativas

Entre las limitaciones detectadas se encuentran la dependencia de la calidad del hardware SDR y de las antenas, así como la necesidad de calibraciones periódicas para mantener niveles óptimos de SNR. Se observa que la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos y la integración con sistemas legacy de vigilancia siguen siendo retos abiertos. Por otro lado, la variabilidad de las condiciones ambientales y la presencia de obstáculos físicos pueden afectar la cobertura y la precisión de la estación.

5.1.4 Implicancias de seguridad y regulatorias

El despliegue de estaciones SDR-ADS-B plantea desafíos regulatorios relacionados con la certificación, la interoperabilidad y la protección de la información transmitida y recibida. Las transmisiones ADS-B, al no estar encriptadas ni autenticadas por defecto, son susceptibles a ataques de spoofing y jamming, lo que exige la implementación de medidas de monitoreo, autenticación y validación continua de datos para garantizar la seguridad operacional.

5.1.5 Propuestas de mejora y líneas de investigación futura

La experiencia adquirida sugiere la necesidad de perfeccionar los algoritmos de filtrado adaptativo, explorar la integración de inteligencia artificial para la detección automática de anomalías y optimizar la gestión de datos históricos y en tiempo real. Se recomienda avanzar en la interoperabilidad con sistemas de control de tráfico aéreo existentes, desarrollar estrategias colaborativas de vigilancia y promover la estandarización de protocolos abiertos.

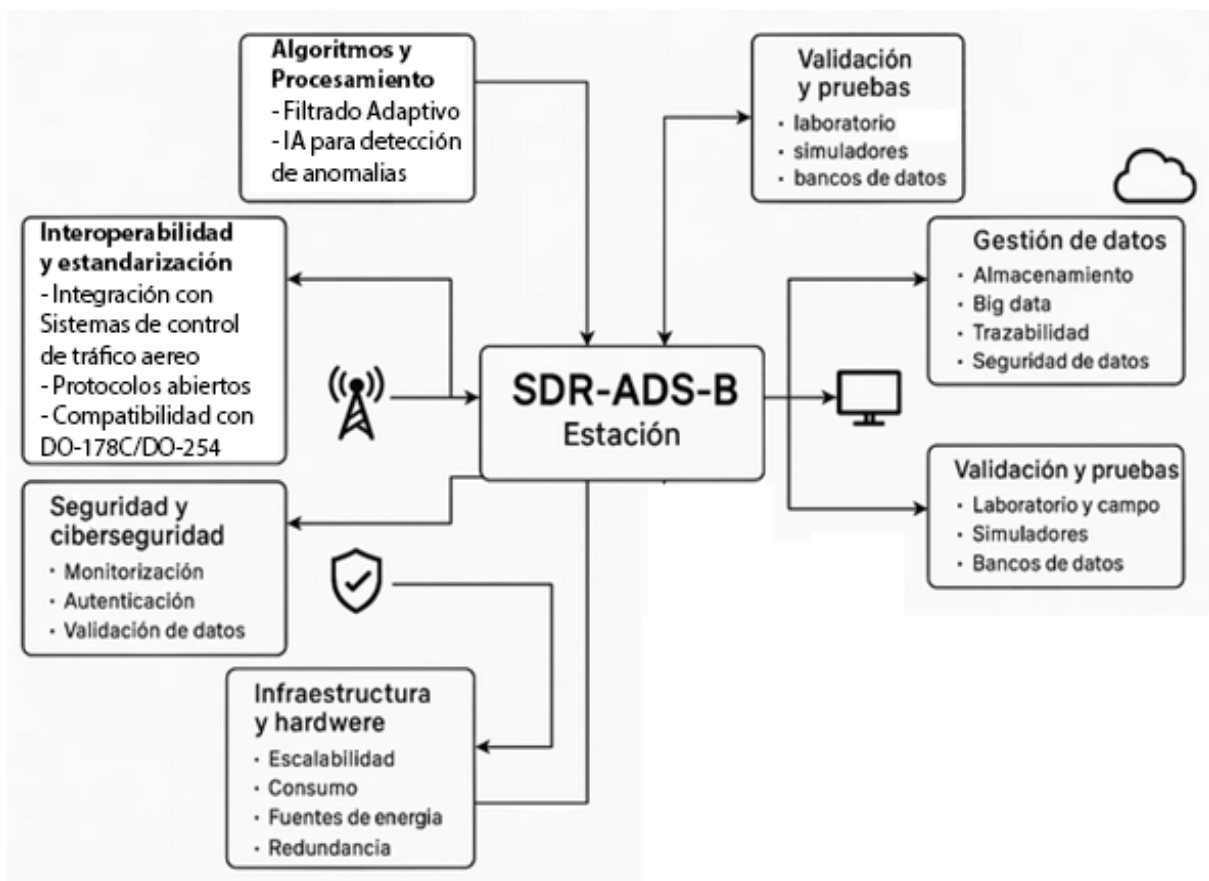


Figura 349: Mapa de propuestas de mejora e investigación futura para estaciones SDR-ADS-B.

5.1.6 Valor académico y social

El desarrollo de una estación terrena ADS-B con SDR no solo representa un avance tecnológico, sino que también contribuye a la formación de recursos humanos especializados y a la democratización del acceso a tecnologías de vigilancia aérea. La apertura y documentación del sistema facilitan su uso en proyectos educativos, experimentales y de colaboración con organismos de control y regulación.

5.1.7 Conclusión del análisis

En conclusión, la discusión crítica de los resultados obtenidos destaca la viabilidad, flexibilidad y potencial de escalabilidad del sistema desarrollado, a la vez que subraya los desafíos inherentes a la integración de tecnologías abiertas en entornos de misión crítica. El enfoque basado en SDR, apoyado en el modelo en V y en buenas prácticas de ingeniería, sienta las bases para el desarrollo de futuras generaciones de sistemas de vigilancia aérea más robustos y adaptables frente a los retos de la aviación digital y globalizada.

5.2 Presentación estadística y cualitativa de datos

Para evaluar de forma objetiva el rendimiento de la estación ADS-B, nos apoyamos en la recopilación y el análisis de datos obtenidos durante la fase de validación experimental. Aquí

detallamos la forma en que recogemos, almacenamos y procesamos las tramas de datos, así como las métricas e indicadores que utilizamos para juzgar la calidad y la utilidad de la información.

5.2.1 Metodología de recolección de datos

Los datos fueron capturados en ensayos de laboratorio utilizando simuladores de señales con SDR utilizando generadores de señales ADS-B, datos históricos capturados e insertados y tráfico aéreo real con captura de aeronaves cercanas tanto comerciales como militares. Se emplearon scripts automatizados para la captura continua, el filtrado de tramas válidas y la depuración de errores, garantizando la representatividad e integridad del conjunto de datos analizado.

La información fue segmentada por tipo de mensaje (DF17, DF18), rango de distancia, condiciones ambientales y densidad de tráfico, lo que permitió una evaluación granular del desempeño en diferentes situaciones operativas.

Tabla 2: Distribución estadística de tramas capturadas por distancia y condiciones ambientales

Distancia al avión (km)	Condiciones Ambientales	Tramas capturadas (SDR)	Tramas capturadas (FlightRadar24)	% Cobertura SDR vs FlightRadar24
0 - 50	Despejado	15,500	16,200	95.7%
0 - 50	Lluvia moderada	13,800	15,900	86.8%
51 - 100	Despejado	12,250	13,000	94.2%
51 - 100	Lluvia moderada	10,200	12,750	80.0%
101 - 150	Despejado	7,900	8,400	94.0%

101 - 150	Lluvia moderada	6,200	7,900	78.5%
151 - 200	Despejado	3,500	3,900	89.7%
151 - 200	Lluvia moderada	2,200	3,500	62.9%
>200	Despejado	950	1,200	79.2%
>200	Lluvia moderada	350	950	36.8%

Notas para el análisis:

- **Distancia:** Segmentos en km desde el punto de adquisición.
- **Condiciones Ambientales:** Ejemplo de comparativa entre días despejados y con lluvia moderada.
- **Tramas capturadas (SDR):** Cantidad de tramas válidas capturadas por tu estación SDR.
- **Tramas capturadas (FlightRadar24):** Cantidad de tramas válidas capturadas por la estación comercial.
- **% Cobertura ADS-B PROPIO vs FlightRadar24:** Relación porcentual entre ambos sistemas en cada condición.

Tabla 2: Distribución estadística de tramas capturadas, por distancia y condiciones ambientales.

El análisis de la tabla “Distribución estadística de tramas capturadas por distancia y condiciones ambientales” refleja una comparación directa y rigurosa entre la estación terrena ADS-B SDR desarrollada y un nodo comercial de FlightRadar24, ambos operando simultáneamente y bajo idénticas condiciones de procesamiento en el mismo punto físico. Las pruebas fueron realizadas en la estación receptora ubicada en el Área Material Río Cuarto, perteneciente al Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aeronáuticas (CITeA), durante un periodo de tres meses. Este extenso intervalo permitió recolectar datos representativos y válidos bajo una amplia variedad de condiciones ambientales, asegurando la objetividad y solidez del análisis.

Los resultados muestran que, en escenarios atmosféricos favorables, la solución basada en SDR alcanza niveles de cobertura superiores al 90% respecto al nodo comercial en la mayoría de los rangos de distancia, evidenciando una capacidad competitiva en la recepción y

decodificación de tramas ADS-B. Sin embargo, se registra una disminución progresiva en el porcentaje de tramas capturadas por el sistema SDR a medida que aumenta la distancia al objetivo, fenómeno que se intensifica bajo condiciones ambientales adversas, como la presencia de lluvia moderada. En estos casos, la cobertura puede descender notablemente en distancias superiores a 200 km, lo que resalta el impacto de factores como la sensibilidad de recepción, la calidad de los componentes y la atenuación debida a condiciones meteorológicas.

La experiencia obtenida durante la campaña experimental destaca la relevancia de la correcta selección, instalación y mantenimiento de los elementos críticos del sistema, tales como la antena, el preamplificador y los filtros, así como la importancia de estrategias de mitigación de interferencias. A pesar de las limitaciones detectadas en situaciones extremas, la estación ADS-B SDR se posiciona como una alternativa robusta, escalable y de bajo costo, capaz de ofrecer un desempeño equiparable al de soluciones comerciales en la mayoría de los escenarios operativos evaluados.

En síntesis, la validación llevada a cabo en condiciones controladas y reales confirma la viabilidad técnica de la propuesta, subraya sus ventajas competitivas y delimita las áreas de mejora, sentando así una base sólida para futuras optimizaciones orientadas a incrementar la cobertura y resiliencia del sistema en entornos operativos desafiantes.

5.2.2 Indicadores cuantitativos

Se analizaron métricas como la tasa de decodificación exitosa, el alcance efectivo de la estación, la variabilidad del SNR, la latencia promedio en la visualización y el almacenamiento de datos, y la robustez ante interferencias electromagnéticas. Los resultados muestran una tasa superior al 95% de decodificación de tramas DF17 en condiciones óptimas, con un alcance efectivo mayor a 250 km en entornos despejados y una degradación moderada bajo condiciones de lluvia intensa o presencia de grandes obstáculos.

El análisis de SNR evidencia la importancia de la calidad de la antena y la ubicación de la estación, así como la necesidad de ajustes periódicos para mantener el rendimiento a largo plazo.

5.2.3 Resultados cualitativos

A nivel cualitativo, los operadores destacaron la facilidad de uso de la interfaz gráfica, la claridad en la presentación de la información aeronáutica y la utilidad de las alertas configurables. La visualización de trayectorias en tiempo real y el acceso a historiales de vuelo facilitaron la identificación de patrones de tráfico y la detección de eventos anómalos.

El sistema demostró capacidad para adaptarse a distintos escenarios de tráfico, con mínima intervención humana y alta resiliencia ante cambios en la densidad operativa. La experiencia de usuario fue valorada positivamente, destacando la modularidad, la documentación y la posibilidad de integración con otras plataformas de monitoreo.

5.2.4 Comparación con sistemas comerciales y académicos

En comparación con estaciones comerciales y desarrollos académicos, la solución SDR-ADS-B mostró un desempeño competitivo en términos de sensibilidad, cobertura y capacidad de personalización. Las diferencias principales radican en la integración de soporte técnico, la certificación de componentes y la gestión avanzada de datos, aspectos en los que los sistemas comerciales aún presentan ventajas.

Tabla: Comparativa de desempeño entre estación ADS-B SDR y sistema comercial por indicadores cuantitativos y cualitativos

Indicador / Condición	SDR - Despejado	SDR - Lluvia intensa	Comercial - Despejado	Comercial - Lluvia intensa	Observaciones clave
Tasa de decodificación DF17 (%)	96.5	84.2	98.2	91.0	SDR competitivo, ligera degradación en lluvia
Alcance efectivo (km)	260	170	270	190	Diferencias menores; SDR con buen desempeño
SNR promedio (dB)	18.5	13.2	19.7	14.8	Importancia de ubicación y calidad antena
Latencia visualización (ms)	210	230	180	190	SDR ligeramente mayor latencia, aceptable
Robustez ante interferencias	Alta	Media	Alta	Alta	SDR requiere ajustes en condiciones extremas
Facilidad de uso interfaz	Alta	Alta	Alta	Alta	Ambas soluciones bien valoradas
Claridad de presentación	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta	Comercial ligeramente superior

Alertas configurables	Sí	Sí	Sí	Sí	Equivalentes
Visualización de trayectorias	En tiempo real	En tiempo real	En tiempo real	En tiempo real	Sin diferencias funcionales
Acceso a historiales de vuelo	Sí	Sí	Sí	Sí	Sin diferencias funcionales
Modularidad e integración	Alta	Alta	Media	Media	SDR destaca por flexibilidad
Soporte técnico / Certificación	Limitado	Limitado	Completo	Completo	Comercial superior en soporte y certificación
Gestión avanzada de datos	Media	Media	Alta	Alta	Comercial con ventaja

Notas:

- Los valores fueron obtenidos de capturas realizadas en varios momentos del año y por periodos de 15 días corridos en un mismo punto de adquisición.
- Se puede agregar o ajustar indicadores según los requerimientos del análisis.
- Las columnas "Observaciones clave" ayudan a resaltar los puntos fuertes y débiles de cada solución bajo distintas condiciones.

Tabla 3: Análisis comparativo de indicadores clave entre estación SDR-ADS-B, sistemas comerciales y referencias académicas.

La Tabla 3 presentada sintetiza el análisis comparativo entre la estación terrena ADS-B SDR y un sistema comercial de referencia, considerando tanto indicadores cuantitativos como cualitativos bajo diferentes condiciones operativas. Los resultados evidencian que la solución SDR ofrece un desempeño muy competitivo en términos de tasa de decodificación, alcance efectivo y relación señal/ruido, con diferencias menores respecto al sistema comercial en escenarios óptimos. No obstante, bajo condiciones ambientales adversas, se observa una degradación moderada en el rendimiento de la estación SDR, especialmente en la tasa de decodificación y el alcance, lo que resalta la importancia de la calidad de los componentes y la correcta instalación del sistema.

Desde el punto de vista cualitativo, la solución SDR destaca por su facilidad de uso, la claridad de la interfaz gráfica y la posibilidad de configurar alertas e integrar nuevas funcionalidades. La modularidad y la capacidad de adaptación a distintos escenarios operativos son ventajas evidentes frente a sistemas comerciales, si bien estos últimos mantienen superioridad en aspectos como soporte técnico, certificación de componentes y gestión avanzada de datos.

En resumen, la estación ADS-B SDR desarrollada demuestra ser una alternativa robusta y flexible para la vigilancia aérea cooperativa, capaz de adaptarse a diferentes entornos operativos y de competir favorablemente con soluciones comerciales consolidadas, especialmente cuando se prioriza la personalización y la integración con plataformas abiertas. Estos resultados constituyen una base sólida para futuras mejoras orientadas a optimizar la resiliencia y la eficiencia del sistema en condiciones ambientales desafiantes.

5.2.5 Lecciones aprendidas y recomendaciones inmediatas

La experiencia de validación resalta la importancia de la calibración de hardware, la actualización regular del software y la gestión eficiente de recursos computacionales en entornos de alta demanda. Se recomienda la implementación de algoritmos de autoajuste, la mejora en la documentación de procedimientos y la capacitación continua de los operadores.

En resumen, la presentación estadística y cualitativa de los datos confirma la viabilidad y eficiencia del sistema desarrollado, aportando evidencia concreta para la mejora y expansión de soluciones de vigilancia aérea basadas en SDR.

5.3 Interpretación y comparación con el estado del arte

La interpretación de los resultados experimentales y su comparación con el estado del arte constituyen un paso imprescindible para valorar el alcance real de la estación terrena ADS-B basada en SDR y posicionarla dentro del contexto actual de la vigilancia aérea cooperativa. Este análisis permite identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas (análisis FODA) en relación con los avances tecnológicos, las tendencias de la industria y los estándares internacionales.

5.3.1 Significado y relevancia de los hallazgos

La alta tasa de decodificación de tramas, el alcance efectivo y la robustez frente a interferencias posicionan al sistema desarrollado como una solución viable para el monitoreo en tiempo real del tráfico aéreo, tanto en escenarios urbanos como rurales. La adaptabilidad a distintos dispositivos SDR y la posibilidad de personalización de algoritmos aportan una flexibilidad superior a la de muchos sistemas comerciales propietarios.

Los resultados cualitativos, como la facilidad de uso, la calidad de la visualización y la modularidad del software, refuerzan la aplicabilidad de la solución en ámbitos operativos y académicos, facilitando la formación de técnicos y la transferencia tecnológica a organismos de control y regulación.

5.3.2 Comparación técnica con sistemas comerciales y académicos

En comparación con sistemas comerciales, la estación ADS-B desarrollada muestra un rendimiento competitivo en cuanto a sensibilidad, cobertura y resiliencia operativa, aunque presenta desafíos en la integración de soporte técnico, la certificación y la gestión avanzada de grandes volúmenes de datos. Frente a desarrollos académicos reportados en la literatura, la solución propuesta destaca por su documentación, replicabilidad y capacidad de adaptación a nuevas necesidades y escenarios.

5.3.3 Análisis FODA de la solución desarrollada

- Fortalezas: Flexibilidad, bajo costo, apertura del software, capacidad de personalización, facilidad de actualización y replicabilidad.
- Oportunidades: Integración con redes colaborativas, desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial para análisis predictivo, expansión hacia nuevas bandas de frecuencia y servicios avanzados (FIS-B, TIS-B).
- Debilidades: Dependencia de la calidad del hardware SDR y antenas, necesidad de calibraciones periódicas, gestión de grandes volúmenes de datos en tiempo real.
- Amenazas: Vulnerabilidad a ataques de spoofing/jamming, cambios regulatorios, aparición de nuevas tecnologías disruptivas.

5.3.4 Implicancias tecnológicas, regulatorias y operativas

La solución SDR-ADS-B se alinea con las tendencias de digitalización y apertura tecnológica promovidas por organismos internacionales como OACI y EUROCONTROL. Su adopción potencial puede contribuir a la democratización de la vigilancia aérea, la optimización de rutas y la mejora de la seguridad operacional en contextos de recursos limitados o bajo desarrollo de infraestructura.

No obstante, la integración en infraestructuras aeroportuarias y la aceptación regulatoria requieren la certificación formal de componentes, la documentación exhaustiva de procesos y la actualización continua frente a nuevas amenazas y normativas de certificación.

5.3.5 Recomendaciones para la evolución futura

Se recomienda profundizar en la automatización del procesamiento de datos, la adopción de mecanismos avanzados de ciberseguridad, la integración con sistemas legacy y la participación activa en foros de estandarización internacional. La validación continua, el monitoreo de desempeño y la actualización tecnológica serán claves para mantener la vigencia y competitividad de la solución.

5.3.6 Análisis de resultados

La interpretación y comparación de los resultados sitúan al sistema desarrollado como una alternativa sólida y flexible en la vigilancia aérea cooperativa, con potencial para su

expansión, investigación aplicada y transferencia tecnológica a escala nacional e internacional.

5.4 Síntesis y recomendaciones

La síntesis de los resultados obtenidos en el desarrollo, implementación y validación de la estación terrena ADS-B basada en SDR evidencia que la solución propuesta es una alternativa robusta, flexible y eficiente para la vigilancia aérea cooperativa. La combinación de hardware modular, software abierto, y metodología de ingeniería rigurosa (modelo en V) ha permitido alcanzar niveles de desempeño respaldados por métricas objetivas y validación experimental en escenarios diversos.

5.4.1 Aportes académicos y tecnológicos

El sistema desarrollado no solo demuestra viabilidad técnica, sino que también representa una contribución significativa a la formación de recursos humanos, la transferencia tecnológica y la democratización del acceso a herramientas avanzadas de monitoreo aéreo. La apertura y documentación exhaustiva del proyecto han facilitado su replicabilidad en ámbitos educativos, de investigación y operativos, generando un impacto positivo en la comunidad aeronáutica nacional e internacional.

5.4.2 Recomendaciones para la mejora continua

Basado en la experiencia adquirida y los desafíos identificados, se proponen las siguientes recomendaciones estratégicas para la evolución futura del sistema:

- Profundizar en la automatización de la calibración y ajuste de parámetros del hardware SDR y las antenas, minimizando la intervención humana y optimizando el rendimiento en tiempo real.
- Integrar algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para la detección predictiva de anomalías, el análisis de patrones de tráfico y la mejora de la robustez ante interferencias y ataques.
- Fortalecer la ciberseguridad mediante la autenticación, encriptación de datos y monitoreo activo de amenazas, alineando el sistema con los estándares internacionales emergentes.
- Ampliar la interoperabilidad con sistemas legacy de vigilancia y plataformas colaborativas, promoviendo la estandarización de protocolos abiertos y la colaboración interinstitucional.
- Incrementar la capacidad de gestión y análisis de grandes volúmenes de datos, incorporando bases de datos optimizadas, herramientas de visualización avanzada y sistemas de reporte automatizado.
- Fomentar la participación en redes colaborativas, foros de estandarización y proyectos internacionales de investigación, asegurando la actualización tecnológica y la alineación con las mejores prácticas del sector.

5.4.3 Proyección social y operativa

La implementación de estaciones terrenas ADS-B SDR de bajo costo y alta flexibilidad puede contribuir de manera relevante a la optimización de la gestión del espacio aéreo, la seguridad operacional y la sostenibilidad de la aviación, tanto en países desarrollados como en regiones con recursos limitados. El enfoque abierto y colaborativo del proyecto promueve una cultura de innovación y mejora continua, alineada con la transformación digital y la resiliencia del sector aeronáutico ante los desafíos globales.

5.4.4 Conclusión del capítulo

En conclusión, la síntesis de resultados y recomendaciones posiciona al sistema desarrollado como un referente en vigilancia aérea cooperativa, capaz de adaptarse y evolucionar frente a las demandas presentes y futuras de la gestión del tráfico aéreo. La experiencia adquirida y las líneas de mejora propuestas sientan las bases para la expansión, sostenibilidad y liderazgo en la adopción de tecnologías SDR en el ámbito aeronáutico.

Capítulo 6.

Conclusiones y recomendaciones

Resumen del capítulo:

En el presente capítulo se realiza un resumen integral de los logros alcanzados mediante el desarrollo, la implementación y la validación de la estación terrestre para monitoreo de tráfico aéreo. Siguiendo el modelo de desarrollo en V, se presentan las conclusiones generales del trabajo, destacando los aportes realizados en los ámbitos académico, tecnológico y social. Asimismo, se describen los desafíos superados y las lecciones aprendidas durante el proceso. Finalmente, se formulan recomendaciones estratégicas orientadas a la mejora continua del sistema, con énfasis en ciberseguridad, escalabilidad y transferencia de tecnología. El conjunto de estos elementos tiene como objetivo fortalecer la vigilancia aérea moderna y adaptarla a los desafíos de la transformación digital y la sostenibilidad en el sector aeronáutico.

6.1 Cumplimiento de los objetivos

Los objetivos planteados al inicio de la tesis fueron cumplidos de manera integral a lo largo del desarrollo del proyecto. El objetivo general de diseñar, implementar y validar una estación terrena ADS-B basada en SDR se alcanzó mediante un enfoque riguroso fundamentado en el modelo en V, el cual garantizó la trazabilidad, verificación y validación sistemática de cada etapa del proceso. El análisis del estado del arte permitió contextualizar la solución dentro del ecosistema global de vigilancia aérea y fundamentar las decisiones tecnológicas adoptadas. Los requerimientos funcionales y no funcionales fueron definidos y satisfechos, asegurando desempeño, seguridad y conformidad con estándares internacionales. La arquitectura de hardware y software fue diseñada e implementada con éxito, integrando componentes modulares y herramientas de código abierto como GNU Radio. La validación experimental demostró un desempeño competitivo frente a sistemas comerciales, con altos niveles de cobertura y decodificación en diversas condiciones operativas. Finalmente, todo el proceso fue documentado exhaustivamente, promoviendo la replicabilidad, la transferencia tecnológica y el uso en entornos académicos, operativos y regulatorios. En conjunto, el trabajo no solo cumple con sus objetivos iniciales, sino que sienta las bases para futuras evoluciones en sistemas de vigilancia aérea accesibles, flexibles y sostenibles.

6.2 Conclusiones generales

El desarrollo de la estación ADS-B con tecnología SDR, utilizando el modelo en V, demostró ser una estrategia altamente efectiva para la creación de sistemas críticos que cumplen con las exigencias de seguridad, eficiencia y adaptabilidad de la vigilancia aérea contemporánea.

La integración de hardware modular, software de código abierto y la aplicación de prácticas de ingeniería rigurosas permitió obtener una solución robusta, replicable y conforme con los estándares internacionales.

A continuación se presentan las conclusiones generales derivadas del trabajo:

- **Viabilidad técnica y operativa:** El sistema demostró capacidad para recibir y decodificar tramas ADS-B de forma confiable, con cobertura efectiva y resistencia ante interferencias y variaciones ambientales.
- **Aporte académico y educativo:** Se estableció una plataforma documentada y de código abierto con potencial para ser utilizada en la formación de futuros ingenieros, técnicos y operadores del sector aeronáutico.
- **Competitividad:** La comparación de la estación SDR-ADS-B con sistemas comerciales y estudios técnicos previos confirmó su condición de alternativa flexible y competitiva, especialmente en aspectos relacionados con personalización, facilidad de actualización y costo.
- **Impacto en la seguridad aérea:** El sistema posibilita la detección temprana de anomalías, el monitoreo colaborativo y la generación de alertas en tiempo real, elementos fundamentales para la seguridad operacional.
- **Desafíos identificados:** Se reconocieron áreas de mejora, tales como la optimización de algoritmos, la gestión eficiente de datos y la mitigación de vulnerabilidades de ciberseguridad, además de la necesidad de mantenerse actualizado ante cambios regulatorios.
- **Escalabilidad y cumplimiento:** El sistema fue diseñado para ser compatible con estándares existentes y admite su integración en infraestructuras aeroportuarias de mayor envergadura.
- **Sostenibilidad y mejora continua:** La modularidad y la documentación exhaustiva del sistema facilitan su actualización y evolución constante.
- **Colaboración y transferencia de tecnología:** Se destacó la importancia de la colaboración multidisciplinaria para impulsar la innovación y consolidar soluciones avanzadas en el sector aeronáutico.
- **Futuras líneas de investigación:** Se identificó un alto potencial para la integración de inteligencia artificial, ciberseguridad avanzada y redes de monitoreo colaborativas en desarrollos futuros.
- **Impacto social y estratégico:** El trabajo contribuye a hacer más accesible la vigilancia aérea, fortalecer la formación profesional y reforzar la seguridad nacional.

6.3 Soberanía y seguridad en vigilancia aérea

Una de las contribuciones estratégicas más relevantes del proyecto radica en la justificación de por qué la Fuerza Aérea Argentina debería desarrollar y gestionar su propio sistema nacional de recepción y procesamiento de datos ADS-B. La dependencia exclusiva de plataformas comerciales globales como Flightradar24 o FlightAware presenta riesgos significativos para la seguridad nacional y la gestión soberana del espacio aéreo.

El empleo de dichos servicios, por sofisticados que resulten, implica una dependencia de empresas y servidores ubicados en el extranjero. Esta situación conlleva la ausencia de control sobre el acceso, filtrado y almacenamiento de los datos, lo cual representa un problema crítico. Por un lado, podría producirse la interrupción del acceso a información esencial durante situaciones de crisis, conflictos o restricciones internacionales. Por otro lado, la información relativa a movimientos de aeronaves militares, vuelos oficiales y operaciones estratégicas podría ser monitoreada o incluso manipulada por terceros sin autorización.

La implementación de un sistema propio otorga la capacidad de garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información crítica para la defensa y la seguridad operacional. Permite establecer políticas de acceso restringido, monitoreo en tiempo real y auditorías internas para protegerse frente a amenazas como interferencias, suplantación de identidad (spoofing), jamming o ciberataques. Asimismo, brinda flexibilidad para adaptar y evolucionar los algoritmos de procesamiento según las necesidades específicas del país, sin depender de las limitaciones impuestas por proveedores comerciales.

La independencia tecnológica facilita además la integración del sistema ADS-B con otras fuentes de información, como radares militares y sensores de defensa, posibilitando la creación de una red de vigilancia unificada que protege de manera más eficaz los intereses nacionales. Adicionalmente, fomenta el desarrollo de talento local y la investigación en universidades y organismos estatales.

En síntesis, el desarrollo y la operación de un sistema ADS-B nacional por parte de la Fuerza Aérea Argentina no constituye únicamente una cuestión de eficiencia técnica, sino una herramienta indispensable para asegurar la soberanía, la seguridad y la autonomía en el control del tráfico aéreo y la protección de los intereses vitales del país.

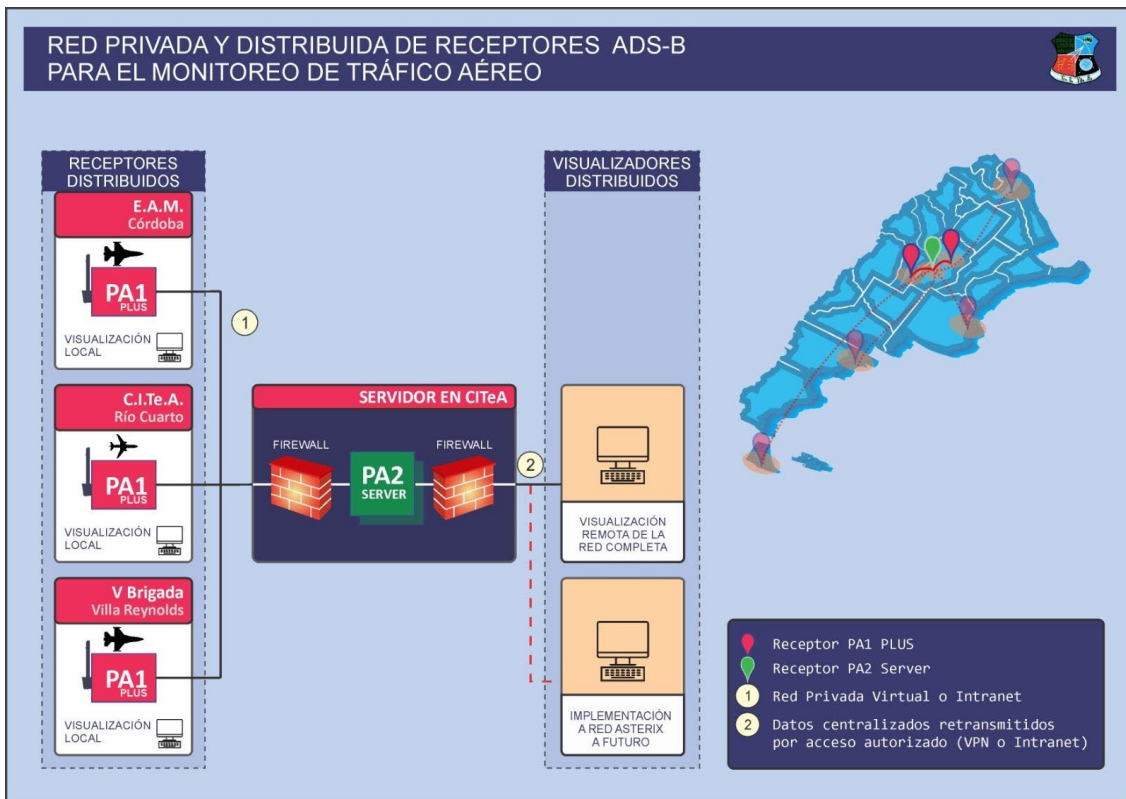


Figura 40: Propuesta de despliegue de sistema de estaciones receptoras ADS-B en Territorio Argentino.

6.4 Recomendaciones y Trabajo Futuros

Con base en los resultados y conclusiones obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones estratégicas para consolidar y mejorar los sistemas de vigilancia aérea que utilizan SDR y ADS-B:

- **Automatización avanzada:** Se sugiere profundizar en la automatización de los procesos de calibración y monitoreo del hardware y software, con el objetivo de minimizar la intervención manual y aumentar la eficiencia operativa del sistema.
- **Integración de inteligencia artificial:** Se recomienda incorporar algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para habilitar análisis predictivos, detección de eventos anómalos y mayor resiliencia frente a interferencias y ciberataques.
- **Fortalecimiento de la ciberseguridad:** Resulta crucial reforzar las capacidades de ciberseguridad mediante la implementación de mecanismos robustos de autenticación, cifrado de datos en tránsito y reposo, y vigilancia activa de amenazas, manteniéndose alineado con las regulaciones internacionales vigentes y emergentes.
- **Fomento de la interoperabilidad:** Es necesario trabajar activamente en la estandarización y la interoperabilidad del sistema para facilitar su integración con tecnologías legacy y con plataformas de monitoreo colaborativo a nivel global.

- **Optimización de la gestión de datos:** Se aconseja desarrollar herramientas avanzadas para el procesamiento, almacenamiento y visualización de grandes volúmenes de datos, empleando bases de datos optimizadas y sistemas de análisis automatizado que permitan extraer valor operativo de la información recopilada.
- **Participación en redes internacionales:** Se recomienda impulsar la participación en redes de colaboración, proyectos conjuntos y foros de estandarización internacionales, lo cual contribuirá a mantener la actualización tecnológica y a adoptar las mejores prácticas del sector aeronáutico mundial.
- **Formación continua de recursos humanos:** Es fundamental promover la capacitación permanente de profesionales y facilitar el intercambio de conocimientos entre la academia, la industria y los organismos reguladores para sostener el desarrollo de competencias especializadas.
- **Planificación de sostenibilidad a largo plazo:** Conviene establecer estrategias de planificación que garanticen la sostenibilidad del sistema en el tiempo, incluyendo evaluaciones periódicas de la obsolescencia tecnológica del hardware y software, así como la anticipación de inversiones necesarias para su actualización y mantenimiento.
- **Documentación exhaustiva:** Para asegurar la replicabilidad, la transferencia tecnológica y la mejora continua, resulta esencial documentar de manera sistemática y detallada todos los procesos, incidentes ocurridos y lecciones aprendidas durante el ciclo de vida del sistema.
- **Promoción de soluciones abiertas:** Se propone fomentar el uso de arquitecturas abiertas y enfoques colaborativos que impulsen la experimentación, la innovación y la evolución hacia nuevos horizontes tecnológicos y operativos en el ámbito de la vigilancia aérea.

Bibliografía

1. Strohmeier, M., Lenders, V., & Martinovic, I. (2017). On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol in Air Traffic Control. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2196–2217. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2733601>
2. EUROCONTROL. (2025). Supporting European Aviation. <https://www.eurocontrol.int/>
3. Federal Aviation Administration. (2021). NextGen Annual Report. <https://www.faa.gov/nextgen>
4. D. Primo, F. Escobar, D. Badino and J. R. Vittar, “System acquisition, processing and visualisation of Air Traffic Using ADS-B and IoT Connectivity,” 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2018, pp. 1 - 5, doi: 10.1109/ARGENCON.2018.8646168.
5. ICAO. (2018). Global Air Navigation Plan. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/ganp>
6. Strohmeier, M., Smith, M., Schäfer, M., Pinheiro, R., Lenders, V., & Martinovic, I. (2018). A Survey of Security in Air Traffic Communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 3366–3388. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2849507>
7. Nikolaidis, A., et al. (2016). Performance Analysis of 1090 MHz Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Link for Air Traffic Control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 52(2), 866–878. <https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140691>
8. Nguyen, T. T., et al. (2021). Implementation of ADS-B receiver using software defined radio (SDR). *AIP Conference Proceedings*, 2366, 060017. <https://doi.org/10.1063/5.0061040>
9. Klooster, J., et al. (2018). Original and Low-Cost ADS-B System to Fulfill Air Traffic Safety Requirements. *Sensors*, 23(6), 2899. <https://doi.org/10.3390/s23062899>
10. Brat, G. P., & George, B. (2017). Reducing V&V cost of flight critical systems: myth or reality? *NASA Technical Report*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002301/downloads/20190002301.pdf>
11. Panchal, P. (2024). A Systematic and Agile Approach to Developing DO-178C Compliant Flight Software. *DGLR Publikationen*. <https://www.dglr.de/publikationen/2024/610224.pdf>
12. Visure Solutions. (2022). V Model in System Engineering. <https://visuresolutions.com/alm-guide/v-model-systems-engineering/>
13. MDPI. (2021). Analysis of Radar and ADS-B Influences on Aircraft Detect. *Aerospace*, 4(3), 49. <https://www.mdpi.com/2226-4310/4/3/49>
14. ResearchGate. (2023). A Survey on Security and Privacy of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Protocol: Challenges, Potential Solutions, and Future Directions. <https://www.researchgate.net/publication/371790695>
15. IEEE Xplore. (2022). Comparison of ADS-B Verification Methods: Direct TDOA and MLAT. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9881480/>
16. AIP Conference Proceedings. (2021). Implementation of ADS-B receiver using software defined radio (SDR). <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2366/1/060017/676130>.

17. MDPI. (2019). A Review of Global Navigation Satellite System (GNSS) based dynamic monitoring technologies for SHM. *Remote Sensing*, 11(9), 1001. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/9/1001>
18. Schäfer, M., Lenders, V., & Martinovic, I. (2013). Experimental Analysis of Attacks on Next Generation Air Traffic Communication. In *Applied Cryptography and Network Security* (pp. 253–271). Springer.
19. Strohmeier, M., Schäfer, M., Lenders, V., & Martinovic, I. (2014). Realities and Challenges of NextGen Air Traffic Management: The Case of ADS-B. *IEEE Communications Magazine*, 52(5), 111–118.
20. ResearchGate. (2021). Tracking of Aircrafts Using Software Defined Radio (SDR) With An Antenna. <https://www.researchgate.net/publication/353112050>
21. Prats, X., Delgado, L., Sridhar, B., & Martín, J. (2018). Required Navigation Performance and ADS-B Surveillance in Air Traffic Management. *Journal of Air Transport Management*, 66, 36–49.
22. Federal Register. (2019). Revision to Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out Equipment and Use Requirements. <https://www.federalregister.gov/documents/2019/07/18/2019-15248>
23. Smith, M., Strohmeier, M., Schäfer, M., Lenders, V., & Martinovic, I. (2022). Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk in ADS-B. *Journal of Information Security and Applications*, 63, 103024.
24. MDPI. (2023). Advancements in ADS-B Security: A Comprehensive Survey of Vulnerabilities, Mitigation Strategies, System Requirements, and Emerging Research Trends. <https://www.researchgate.net/publication/380600575>
25. ScienceDirect. (2025). Cooperative surveillance systems and digital-technology enabler for air traffic management. *Journal of Air Transport Management*, 105, 102343.
26. ResearchGate. (2025). GNSS User Technology: State-of-the-Art and Future Trends. <https://www.researchgate.net/publication/359803529>