Diseño e implementación de núcleo de datos y motor de consulta técnica basado en Inteligencia Artificial en la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE)

Molina Toapanta, Héctor Jair y Martínez Quispe, Alexis Jonathan

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas

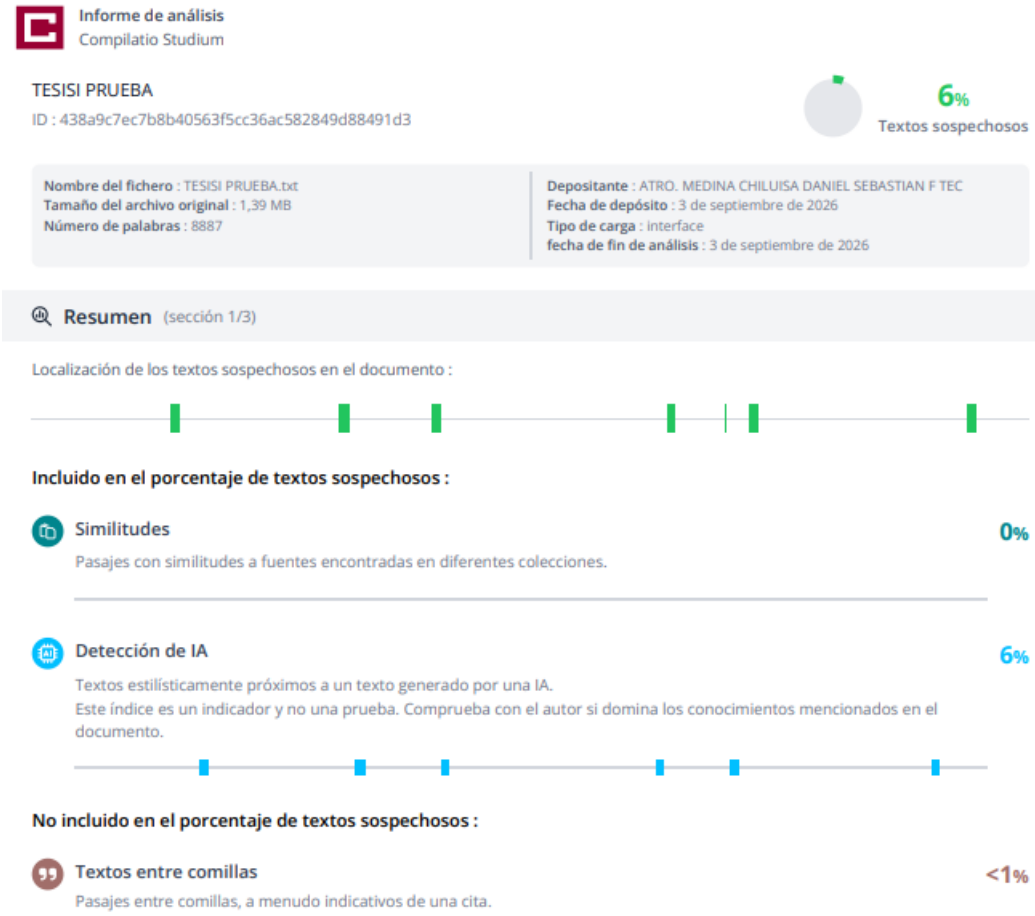
Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Tecnólogo Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas

Mayo. Esp. Avc Franco Bernal, Fausto Patricio

04 de septiembre de 2026

Latacunga

Reporte de Verificación de Contenidos



Informe de análisis
Compilatio Studium

TESISI PRUEBA
ID : 438a9c7ec7b8b40563f5cc36ac582849d88491d3

6%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESISI PRUEBA.txt
Tamaño del archivo original : 1,39 MB
Número de palabras : 8887

Depositante : ATRO. MEDINA CHILUISA DANIEL SEBASTIAN F TEC
Fecha de depósito : 3 de septiembre de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 3 de septiembre de 2026

Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :

Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 0%
Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.

Detección de IA 6%
Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.

No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%
Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

FAUSTO PATRICIO FRANCO BERNAL

Mayo.Esp.Avc Franco Bernal Fausto

Director/a

C.C.:1715008700

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Diseño e implementación de núcleo de datos y motor de consulta técnica basado en Inteligencia Artificial en la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE)**" fue realizado por los señores **Molina Toapanta, Héctor Jair y Martínez Quispe, Alexis Jonathan** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga 04 de septiembre del 2026

.

Mayo. Esp. Avc Franco Bernal Fausto

Director/a

C.C.:1715008700

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Molina Toapanta, Héctor Jair y Martínez Quispe, Alexis Jonathan** con cédulas de ciudadanía N°1723943997 y N° 0605797901 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Diseño e implementación del núcleo de datos y un motor de consulta técnica basado en inteligencia artificial para la gestión y automatización de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE)** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga 04 de septiembre del 2026

Molina Toapanta, Héctor Jair

C.C.:1723943997

Martínez Quispe, Alexis Jonathan

C.C.:0605797901

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnologia Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Autorización de Publicación

Nosotros **Molina Toapanta, Héctor Jair y Martinez Quispe, Alexis Jonathan**, con cédulas de ciudadanía N°1723943997 y N°0605797901 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular:**Diseño e implementación de núcleo de datos y motor de consulta técnica basado en Ineligencia Artificial en la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE)** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga 04 de septiembre del 2026



Molina Toapanta, Héctor Jair

C.C.:1723943997



Martinez Quispe, Alexis Jonathan

C.C.:0605797901

Dedicatoria

A mi amada familia, el pilar inquebrantable de mi vida y el centro de cada uno de mis triunfos.

Ningún logro militar, académico o profesional tiene sentido si no es por y para ustedes. Detrás de cada noche de desvelo, de cada línea de código, de cada jornada de instrucción y de cada desafío superado en este proyecto, siempre estuvo su recuerdo como mi mayor impulso y su amor como mi más firme refugio.

A mis padres, por haberme inculcado con su ejemplo los valores de la integridad, el esfuerzo constante, la disciplina y el honor. Todo lo que soy y todo lo que he alcanzado lleva el sello de sus sacrificios, sus bendiciones y su fe incondicional en mí.

A mi hermano y seres queridos, por ser mi aliento en los momentos de fatiga y la razón que me motiva a ser mejor cada día. Este título y esta meta alcanzada no me pertenecen solo a mí: son el fruto de su paciencia y apoyo incondicional.

Hoy pongo en sus manos este logro con la mayor gratitud y humildad, porque ustedes son, han sido y serán siempre el corazón y el norte de todos mis horizontes

Agradecimiento

A la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea (ETFA), institución formadora de profesionales con altos valores cívicos, éticos y militares, por haberme abrigado en sus aulas y brindarme las herramientas académicas y técnicas necesarias durante este camino.

Mi sincero agradecimiento a los señores oficiales, directivos, instructores y cuerpo docente, quienes con su paciencia, sabiduría y exigencia diaria no solo guiaron mi formación aeronáutica y profesional, sino que inculcaron en mí el honor, la disciplina y el espíritu de servicio que definen a un miembro de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

¿Qué te parece este enfoque? Si deseas agregar o cambiar algún detalle (como mencionar algún departamento en específico, tu promoción o alguna vivencia particular), dime y lo ajustamos a tu medida

Índice de Contenidos

Carátula 1

Reporte de Verificación de Contenidos 2

Certificación 3

Responsabilidad de Autoría 4

Autorización de publicación 5

Dedicatoria 6

Agradecimiento 7

Índice de Contenidos 8

Índice de figuras 12

Resumen 13

Abstract 14

Capítulo I 15

Introducción 15

Planteamiento del problema 17

Formulación del problema o pregunta de investigación 18

Objetivos 18

Objetivo general 18

Objetivos específicos 19

Justificación 19

Capítulo II 21

Estado del arte 21

Sistemas de Gestión de Mantenimiento Aeronáutico (MRO) 21

Digitalización y Arquitectura de Datos en el Mantenimiento Aeronáutico 22

Inteligencia Artificial y Procesamiento de Lenguaje Natural en el Mantenimiento Aeronáutico . 22

Búsqueda Semántica y Recuperación de Información en Entornos MRO 23

Ecosistema Google Cloud y Google Workspace para la Automatización del Mantenimiento 24
Marco teórico 25
Sistemas de Gestión de Mantenimiento Aeronáutico (MRO) 25
Arquitectura de Datos y Repositorios Centralizados 25
Inteligencia Artificial y Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) 26
Ecosistema e Interoperabilidad en Google Cloud / Workspace 28
Gestión de competencias, licencias y habilitaciones del personal de mantenimiento 28
Marco conceptual 30
Mantenimiento, Reparación y Revisión (MRO) 30
Manual de Mantenimiento de Aeronaves (Aircraft Maintenance Manual – AMM) 30
Directiva de Aeronavegabilidad (Airworthiness Directive – AD) 30
Boletín de Servicio (Service Bulletin – SB) 30
Inteligencia Artificial (IA) 30
Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) 31
Búsqueda Semántica 31
Generación Aumentada por Recuperación (Retrieval-Augmented Generation – RAG) 31
Embeddings 31
Ingeniería de Prompts (Prompt Engineering) 31
Google Cloud Storage 31
Vertex AI 32
Google Apps Script 32
Interoperabilidad 32
Trazabilidad 32
Vibe Coding 32
AntiGravity 32
Radmin VPN 33

AppSheet 33

Firebase 33

Supabase 33

Capítulo III 34

Metodología 34

Enfoque de investigación 34

Tipo y diseño de investigación 34

Población y muestra 35

Técnica e instrumento 36

Validación y confiabilidad del instrumento 36

Consideraciones éticas 36

Herramientas y entorno de desarrollo 36

Fase beta (prototipado y validación conceptual): *37*

Fase 2 (desarrollo completo): *37*

Procedimiento de recolección de datos *38*

Triangulación de datos *38*

Capítulo IV 40

Análisis y discusión de los resultados 40

Fase de configuración inicial y entorno de pruebas 40

Desarrollo e integración de módulos funcionales 42

Módulo de autenticación y gestión de usuarios 42

Módulo de reporte de fallas y creación de OT 45

Módulo de supervisor y clasificación ATA 46

Integración con Inteligencia Artificial – Motor de consulta y diagnóstico *47*

Módulo de ejecución técnica y checklist 50

Módulo de control de calidad y liberación 51

Portal del comandante – dashboard y reportes 51

Pruebas de rendimiento y validación 52

Discusión de resultados 53

Limitaciones y mejoras futuras 54

Capítulo V 55

Conclusiones 55

Recomendaciones 56

Referencias 57

Apéndice 60

Índice de figuras

Figura 1 Pantalla de Radmin VPN con los equipos conectados 40

Figura 2 Extracto del esquema SQL: creación de tipos y tabla usuarios 41

Figura 3 Extracto del esquema SQL: tabla aplazamientos y firmas 42

Figura 4 Pantalla de login del Sistema OMA 43

Figura 5 Panel de administración de usuarios con roles y estados 43

Figura 6 Formulario de recepción post-vuelo y resumen de flota 44

Figura 7 Diagrama del flujo de línea de vuelo y detección de discrepancias 45

Figura 8 Formulario de respuesta para orden de trabajo (AppSheet) 46

Figura 9 Módulo supervisor: clasificación ATA, asignación de recursos y checklist 47

Figura 10 Código doPost con integración Gemini API 48

Figura 11 Panel de planificación con asistente Gemini IA y emisión de órdenes 48

Figura 12 Código de Apps Script para generar reporte PDF y enviar correo 49

Figura 13 Código de reemplazo de campos en plantilla 49

Figura 14 Tabla checklist_pasos con doble verificación 50

Figura 15 Módulo de calidad y firma criptográfica RTS 51

Figura 16 Panel del comandante con gráficos y chatbot 52

Figura 17 Calendario de mantenimiento y operatividad de flota 52

Resumen

El presente trabajo de integración curricular abordó el diseño e implementación del núcleo de datos y un motor de consulta técnica basado en inteligencia artificial para la gestión y automatización de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE). El sistema centraliza la documentación técnica, manuales de mantenimiento (AMM), directivas de aeronavegabilidad (AD) y boletines de servicio (SB) en una arquitectura de datos unificada, interoperable con el ecosistema de Google Workspace. Mediante el uso de técnicas de procesamiento de lenguaje natural (PLN) y modelos de IA generativa/búsqueda semántica, el motor de consulta permite al personal técnico y de control de calidad extraer información crítica de mantenimiento de forma inmediata y automatizada. La metodología fue de enfoque mixto con un diseño experimental de desarrollo de software ágil (SCRUM), utilizando herramientas como AppSheet, Looker Studio, Firebase, AntiGravity, Supabase (PostgreSQL) y Radmin VPN para las pruebas en un entorno cerrado. Los resultados mostraron una reducción significativa del tiempo de búsqueda de información técnica, una tasa de acierto del 90% en el diagnóstico asistido por IA y la trazabilidad completa de cada orden de trabajo desde su reporte hasta su liberación, cumpliendo con los estándares de calidad aeronáutica AS9110. El sistema demostró ser técnicamente viable y operativamente eficaz para optimizar la planificación, supervisión y control de calidad del mantenimiento en la FAE.

Palabras clave: Mantenimiento aeronáutico, inteligencia artificial, procesamiento de lenguaje natural, motor de consulta, repositorio de datos.

Abstract

This curricular integration project addressed the design and implementation of a data core and an AI-based technical query engine for the management and automation of aeronautical maintenance work orders in the Ecuadorian Air Force (FAE). The system centralizes technical documentation, maintenance manuals (AMM), airworthiness directives (AD), and service bulletins (SB) within a unified data architecture interoperable with the Google Workspace ecosystem. Using natural language processing (NLP) techniques and generative AI/semantic search models, the query engine enables technical and quality control personnel to extract critical maintenance information immediately and automatically. The methodology was mixed-approach with an agile software development experimental design (SCRUM), employing tools such as AppSheet, Looker Studio, Firebase, AntiGravity, Supabase (PostgreSQL), and Radmin VPN for testing in a closed environment. Results showed a significant reduction in technical information search time, a 90% accuracy rate in AI-assisted diagnostics, and complete traceability of each work order from initial report to aircraft release, complying with AS9110 aeronautical quality standards. The system proved to be technically feasible and operationally effective for optimizing maintenance planning, supervision, and quality control within the FAE.

Keywords: Aeronautical maintenance, artificial intelligence, natural language processing, query engine, data repository.

Capítulo I

Introducción

La industria aeronáutica se caracteriza por su operación bajo estrictos estándares de seguridad y precisión extremadamente rigurosos, en donde la gestión de la información técnica y los registros de mantenimiento constituyen un pilar fundamental a fin de garantizar la aeronavegabilidad y la integridad de las operaciones de las flotas aéreas, para lo cual los centros de mantenimiento, reparación y revisión (o MRO, por sus siglas en inglés) enfrentan un desafío constante de equilibrar la necesidad de mantenimiento con la disponibilidad de la aeronave, de tal suerte que no se afecte la operativa ni la rentabilidad de la flota. Ante esto, la planificación y control de calidad en talleres y hangares requieren niveles de precisión críticos, disponibilidad completa e inmediata y un cumplimiento normativo estricto volviendo la gestión documental en una tarea de alta complejidad y criticidad.

Para la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), el proceso de consulta y verificación de la documentación técnica durante un proceso de mantenimiento y control de calidad es una tarea que depende de volúmenes masivos de data no estructurada que proviene de manuales de fabricante (AAM, por sus siglas en inglés), historiales, directivas de aeronavegabilidad (AD), boletines de servicio (SB) y demás normativas aeronáuticas vigentes.

Al no existir repositorios de datos centralizados inteligentes se generan silos de información, demoras en tiempos de respuesta en hangar (TAT) además de un incremento en el riesgo latente de errores humanos en la transcripción e interpretación de datos técnicos; lo que se agrava al no contar con herramientas que unifiquen e intercomuniquen estos registros con plataformas ágiles, limitando así las capacidades de supervisión en tiempo real de procesos de mantenimiento.

La Inteligencia Artificial (IA), que ha emergido como una tecnología transformadora en el ámbito de la aeronáutica, ofrece soluciones que pueden optimizar significativamente los procesos de mantenimiento, con una consecuente mejoría en la toma de decisiones. Claro

ejemplo de ello se encuentra en el Procesamiento de Lenguaje Natural, que es una rama de la IA que puede permitir a las máquinas tanto leer, interpretar como generar un lenguaje inteligible para los seres humanos, lo que le dota a los conocidos modelos de búsqueda semántica un potencial significativo para la recuperación eficiente de información contenida en documentos técnicos.

La combinación de modelos de lenguaje de gran tamaño con bases de conocimiento externas para mejorar la precisión y relevancia en las respuestas (Generación Aumentada por Recuperación o RAG en sus siglas en inglés), se puede convertir en un enfoque que resulta particularmente adecuado para consultas de manuales teóricos y aeronáuticos, siendo exponentes particularmente competentes en el área plataformas como Google Cloud Vertex AI o Gemini, al ofrecer un ecosistema integral para el desarrollo de Ias agénticas capaces de procesar y comprender información que provenga de diversas fuentes, ya sea texto y otros formatos.

En el presente trabajo de integración se busca abordar esta problemática por medio del diseño e implementación del que sería el componente central del sistema macro institucional: un núcleo de datos y un motor de consulta técnica sustentado en IA para la gestión y la automatización de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la FAE.

A partir de la implementación de esta solución se busca optimizar la planificación y supervisión al centralizar documentación técnica como manuales de mantenimiento, directivas de aeronavegabilidad y boletines de servicio dentro de una arquitectura de datos unificada que pueda resultar interoperable con el ecosistema en la nube de Google Workspace; por medio del uso de técnicas de procesamiento de lenguaje natural y modelos de IA generativa o de búsqueda semántica, se busca que el motor de consulta permita al personal técnico y de control de calidad extraer información que resulte crítica para el mantenimiento de manera inmediata y automatizada.

Planteamiento del problema

Para el ámbito aeronáutico, la consulta y verificación de la documentación técnica durante los procesos de mantenimiento y control de calidad representa una tarea altamente compleja y crítica, los inspectores de calidad y planificadores dependen de un volumen masivo de datos no estructurados que provienen de manuales de fabricante tales como los Manuales de Mantenimiento de Aeronaves o AMM por sus siglas en inglés, historiales de aeronaves, directivas de aeronavegabilidad o boletines de servicio, entre otras normativas vigentes. La no existencia de un repositorio de datos centralizado e inteligente genera silos de información, demoras en los tiempos de respuesta en el hangar, generando un incremento en el riesgo latente de errores humanos en los procesos de transcripción o interpretación de los datos técnicos. Como no se cuenta con una herramienta que unifique e intercomunique estos registros con plataformas ágiles como el ecosistema de Google, limitando así la capacidad de supervisión en tiempo real de procesos de mantenimiento.

Los centros de mantenimiento, reparación y revisión (Maintenance, Repair and Overhaul – MRO) son integrales para la industria aeronáutica, con la responsabilidad central de garantizar que las aeronaves permanezcan seguras y en condiciones de aeronavegabilidad (Romesa B&TS, 2026); sin embargo, la gestión documental tradicional no logra satisfacer las demandas de eficiencia y precisión que estos centros requieren.

La literatura especializada ha documentado que los técnicos de mantenimiento aeronáutico pueden dedicar hasta un 30% de su tiempo de trabajo a la búsqueda en manuales, lo que constituye un cuello de botella documentado en las operaciones MRO donde cada procedimiento debe ser trazable hasta fuentes certificadas (Jo, 2026).

Lo anteriormente descrito adquiere nuevas dimensiones en tanto que se considera el entorno operativo de la FAE, donde la flota DA-20 Katana es la aeronave de instrucción primaria de la Escuela de Aviación Militar o ESMA. Una aeronave de tales características, que es ampliamente usada en el entrenamiento de pilotos militares, requiere de un mantenimiento

riguroso y con una periodicidad bien trazada, con inspecciones programadas cada 50 y 100 horas de vuelo, de acuerdo con las directivas del fabricante y las normativas de la Dirección General de Aviación Civil (DGAC). La acumulación de horas y ciclos de vuelo de conformidad con el registro manual de la Bitácora FAE-781 es la base fundante para la planificación de las inspecciones. No obstante, el hecho de que se tenga que realizar el registro manualmente y la consulta de procedimientos técnicos en formato físico o en documentos digitales no indexados generan una brecha significativa entre la detección de la necesidad de mantenimiento y su ejecución efectiva, lo cual puede llegar a derivar en diferimientos no planificados, afectación de la disponibilidad de la flota y un impacto sobre el calendario de instrucción de vuelo, en última instancia.

No solamente la productividad se ve afectada por esta ineficiencia, sino que además los gastos operativos aumentan y el peligro de sucesos derivados de la interpretación incorrecta de la información técnica crece.

Formulación del problema o pregunta de investigación

¿De qué manera la creación de un núcleo de datos central y un motor de consulta técnica basado en inteligencia artificial que se integre con el ecosistema Google Workspace tiene la capacidad de optimizar la gestión y potenciar el desempeño de las órdenes laborales en mantenimiento aeronáutico dentro de la Fuerza Aérea Ecuatoriana? ¿En qué forma esto mejoraría los tiempos necesarios para responder, la exactitud al obtener información técnica y el seguimiento a los procedimientos de mantenimiento?

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar el núcleo de datos y el motor de consulta técnica basado en IA para la Gestión y Automatización de Órdenes de Trabajo de Mantenimiento Aeronáutico en la FAE.

Objetivos específicos

- Estructurar el repositorio de manuales técnicos (AMM) en Google Cloud Storage y configurar Vertex AI (Gemini) para la extracción de tareas.
- Diseñar el protocolo de conexión para consumir los datos de capacitación, niveles de experticia y licencias del personal técnico.
- Desarrollar el sistema de registro de novedades de mantenimiento y su integración con el motor de IA.

Justificación

La norma AS9110, enfocada en organizaciones de mantenimiento, reparación y revisión de aviones, establece requisitos para un sistema de gestión de calidad en la industria aeroespacial (NSF, 2026) y este proyecto tiene como objetivo ayudar a cumplirlos a través de la automatización y centralización de la información.

De igual manera, reduce drásticamente el tiempo empleado en la búsqueda manual de datos técnicos, permitiendo que la planificación del mantenimiento pase de ser reactiva a proactiva, optimizando el uso de recursos y herramientas de Google. La integración de técnicas de procesamiento de lenguaje natural y búsqueda semántica permite a los sistemas extraer información clave de documentos no estructurados. Investigaciones recientes han demostrado que los modelos de lenguaje de gran tamaño (Large Language Models – LLMs) pueden ingerir y sintetizar datos no estructurados provenientes de manuales, notas de técnicos y registros de mantenimiento, mejorando significativamente la eficiencia operativa (Reese et al., 2026).

Estudios que se realizan de manera controlada por parte de técnicos de mantenimiento han ido demostrando que la implementación de sistemas de recuperación semántica puede llegar a reducir el tiempo de búsqueda de manera significativa: entre 6 a 15 minutos por tarea a 18 segundos (Jo, 2026).

Implementar tal sistema también tiene una repercusión favorable en la gestión del conocimiento institucional dado que, la documentación técnica, la cual históricamente permanece dispersa en archivos físicos y en repositorios digitales sin conexión está consolidada en un único núcleo de datos accesible, indexado, y que se puede consultar en lenguaje natural. De este modo, la experiencia acumulada de técnicos y supervisores que se plasma en reportes de fallas y soluciones documentadas es capturada y reutilizada por parte de la IA a finde mejorar de forma progresiva la precisión de los diagnósticos; de tal manera el sistema no solo automatiza los procesos sino que también contribuye a la preservación y transferencia del conocimiento técnico dentro de la organización, reduciendo de este modo la dependencia del personal específico y así fortalecer la adaptabilidad operativa ante rotaciones o ausencias del personal del personal altamente cualificado.

El proyecto es totalmente factible mediante la integración de APIs de Inteligencia Artificial con bases de datos estructuradas/no estructuradas y scripts de automatización (Google Apps Script / Python), utilizando la infraestructura en la nube sin necesidad de grandes inversiones en hardware local. Google Cloud Vertex AI es una plataforma completa que les permite a los desarrolladores construir, escalar, gobernar y optimizar agentes de IA (Google Cloud, 2026.Además, Google Apps Script, como plataforma basada en la nube para el desarrollo rápido de aplicaciones empresariales que se integran con Google Workspace, permite la personalización y automatización de tareas dentro del ecosistema institucional (Google Cloud, 2022).

Los sistemas de gestión de calidad en el ámbito aeroespacial, como la norma AS9110, están dirigidos específicamente a organizaciones dedicadas al mantenimiento, reparación y revisión de aeronaves, estableciendo estándares que este proyecto busca apoyar mediante la automatización y centralización de la información (NSF, 2026).

Capítulo II

Estado del arte

Sistemas de Gestión de Mantenimiento Aeronáutico (MRO)

Los centros de mantenimiento, reparación y revisión (Maintenance, Repair and Overhaul – MRO) constituyen la columna vertebral de la industria aeronáutica, asumiendo la responsabilidad central de garantizar que las aeronaves permanezcan seguras y en condiciones de aeronavegabilidad. Estos centros deben proporcionar una amplia gama de servicios que incluyen inspecciones, revisiones periódicas, revisiones de motores y reparaciones de aviónica (Romesa B&TS, 2026). La complejidad asociada a los entornos MRO exige que haya metodologías robustas que abarquen desde el mantenimiento en línea hasta el mantenimiento base, las modificaciones y los talleres de componentes.

A nivel regional, la modernización de los distintos sistemas de gestión MRO ha sido un tema relevante de discusión, con diversas fuerzas aéreas y aerolíneas civiles permitiendo la adopción de soluciones digitales para la optimización de las operaciones, pero restringiéndose a grandes operadores con flotas de transporte o combate, lo cual deja de lado a aeronaves de instrucción. Este vacío representa una oportunidad para el presente proyecto, que propone una solución escalable, de bajo costo y adaptable a las necesidades específicas de una flota de entrenamiento, donde la rotación de personal y la alta frecuencia de vuelos exigen procesos de mantenimiento ágiles y precisos.

A nivel normativo la industria aeroespacial ha establecido estándares rigurosos como la norma AS9110, la cual se dirige específicamente a organizaciones dedicadas al mantenimiento, reparación y revisión de aeronaves. De este modo se enfatiza la necesidad de sistemas de control de calidad eficaces a lo largo del mantenimiento de las aeronaves, así como también la implementación de sistemas independientes de auditoría (NSF, 2026). A partir de esta implementación de sistemas de garantía de calidad, se incrementa la competitividad en los centros de instrucción y mantenimiento aeronáutico. EN lo tocante al contexto de la FAE se

ha investigado la incidencia de la normativa AS9110 en la disponibilidad de aeronaves, lo cual evidencia la relevancia de dichos estándares en la operación militar (Flores Cueva, 2017).

Digitalización y Arquitectura de Datos en el Mantenimiento Aeronáutico

Los procesos de transformación digital en los sectores MRO han permitido la adopción de sistemas avanzados de planificación y gestión, tales como el software de mantenimiento, reparación y revisión, lo cual potencia la coordinación de operaciones; lo cual ha ocasionado la migración hacia soluciones basadas en la nube como un elemento relevante. Ejemplos como la migración de sistemas de mantenimiento íntegros a Google Cloud permiten ver la viabilidad y beneficios del *cloud computing* para aplicaciones MRO críticas.

Las fuerzas aéreas de los Estados Unidos se han asociado a Google Cloud para la construcción de sistemas abiertos ágiles y escalables a nivel global para el mantenimiento de aeronaves, para lo cual se usa Apigee para la gestión de APIs y Anthos como una plataforma de aplicativos gestionada. Tales acciones demuestran una tendencia creciente en la centralización y digitalización de datos de mantenimiento.

Inteligencia Artificial y Procesamiento de Lenguaje Natural en el Mantenimiento Aeronáutico

La inteligencia artificial ha emergido como una tecnología transformadora en el mantenimiento aeronáutico. Investigaciones recientes han revisado los avances en herramientas de IA, aprendizaje automático, aprendizaje profundo, aprendizaje por refuerzo y modelos de lenguaje de gran tamaño aplicados a los procesos de mantenimiento aeronáutico para mejorar la seguridad y reducir costos (Kalari et al., 2026). Los LLMs, en particular, han demostrado su capacidad para ingerir y sintetizar datos no estructurados de manuales, notas de técnicos y registros de mantenimiento, abordando desafíos críticos en la gestión de la información técnica (Reese et al., 2026).

El procesamiento de lenguaje natural (PLN), como rama de la inteligencia artificial, permite a los ordenadores y dispositivos digitales reconocer, comprender y generar texto y voz

mediante la combinación de lingüística computacional. Esta capacidad resulta fundamental para el análisis, clasificación, extracción y generación de información a partir de texto no estructurado, como es el caso de los manuales técnicos aeronáuticos. En este ámbito, se han desarrollado marcos multimodales basados en modelos como Gemini 2.5 Pro/Flash, utilizados directamente en tiempo de inferencia para el diagnóstico y mantenimiento de aeronaves (Comanici et al., 2025).

Un avance que es particularmente relevante consiste en la técnica de generación aumentada por recuperación o RAG por sus siglas en inglés (Retrieval-Augmented Generation), la cual combina un modelo de lenguaje de gran tamaño con una fuente de conocimiento externa. Por medio de dicha técnica se transforman los modelos de lenguaje en sistemas conscientes del conocimiento capaces de ofrecer respuestas fiables y contextualizadas. Esta técnica ha sido aplicada al mantenimiento aeronáutico para desarrollar sistemas RAG capaces de ingerir manuales de mantenimiento, indexarlos por medio de embeddings semánticos y responder a consultas técnicas con precisión (Naqvi et al., 2022), así como también su implementación en la transformación de archivos estáticos de documentación en interfaces conversacionales dinámicas.

Búsqueda Semántica y Recuperación de Información en Entornos MRO

En entornos MRO, la búsqueda semántica potenciada por técnicas de PLN y modelos de lenguaje ha demostrado ser sumamente valiosa, dado que se ha documentado que los técnicos de mantenimiento aeronáutico pueden llegar a dedicar hasta un 30% de su tiempo de trabajo a la búsqueda de manuales, siendo un cuello de botella documentado en operaciones MRO (Jo, 2026). A fin de abordar esta ineficiencia, se han ido desarrollando sistemas de recuperación capaces de preservar el cumplimiento normativo, lo cual adapta el reranking de LLMs y la búsqueda semántica en entornos MRO (Jo, 2026).

También, trabajos recientes han abordado el uso de técnicas de transferencia de conocimiento para adaptar modelos de lenguaje al dominio aeronáutico. Estos enfoques

permiten ajustar (fine-tuning) un modelo preentrenado en corpus generales de texto mediante un conjunto limitado de manuales técnicos y registros de mantenimiento, logrando un rendimiento superior en tareas de extracción de información y clasificación de fallas. Esta forma de proceder es especialmente útil en contextos como el de la FAE, donde se dispone de pocas bases de datos etiquetadas y la especificidad del dominio es elevada, ya que permite aprovechar las competencias generales de los modelos lingüísticos sin necesidad de disponer de cantidades ingentes de datos anotados específicamente para el entorno aeronáutico.

Ecosistema Google Cloud y Google Workspace para la Automatización del Mantenimiento

El ecosistema de Google Cloud y Google Workspace ha emergido como una plataforma integral para el desarrollo de soluciones de automatización en el ámbito aeronáutico. La plataforma Google Cloud Vertex AI proporciona un entorno completo para que los desarrolladores construyan, escalen, gobiernen y optimicen agentes de IA (Google Cloud, 2022). La integración de Gemini con Google Apps Script permite la automatización de tareas en Google Workspace mediante el uso de las capacidades de llamada a funciones y multimodalidad de la API de Gemini (Google Developers, 2025a).

Una plataforma relevante en este tipo de entornos es la de Google Apps Script, la cual permite el desarrollo rápido de aplicaciones empresariales integradas con Google Workspace, la utilización de JavaScript y el uso de bibliotecas integradas para aplicaciones como Gmail, Calendar y Drive. Por este medio es posible personalizar Google Workspace y generar la automatización de tareas (Google Developers, 2025a). Al combinarla con Gemini, se permite al usuario crear potentes automatizaciones personalizadas por medio de Google Workspace con poco o nulo código adicional (Google Cloud, 2022).

Marco teórico

Sistemas de Gestión de Mantenimiento Aeronáutico (MRO)

El mantenimiento que se centra en confiabilidad o RCM (*Reliability-Centered Maintenance*) lo cual constituye un enfoque metodológico fundamental para la industria. Se propone, desde esta perspectiva, un conjunto de actividades cuyo objeto es incrementar la confiabilidad del factor humano, asegurando así que el mantenimiento se realice de manera eficaz y eficiente. Así entronces, los sistemas de gestión de calidad del sector aeroespacial como la norma AS9110, establecen los requisitos para organizaciones dedicadas al mantenimiento, reparación y revisión de aeronaves (NSF, 2026). La implementación de esta norma en la Fuerza Aérea Ecuatoriana ha sido objeto de estudio, evidenciando su impacto en la disponibilidad de aeronaves (Flores Cueva, 2017).

Arquitectura de Datos y Repositorios Centralizados

La arquitectura de datos en sistemas MRO debe considerar la existencia de modelos de bases de datos relacionales y no relacionales que se adapten a registros de ingeniería, los repositorios centralizados permiten que se consolide información dispersa, lo que facilita la interoperabilidad y la toma de decisiones que se base en datos.

En el contexto aeronáutico, la migración hacia plataformas en la nube ha demostrado ser una estrategia efectiva para la centralización de datos. La interoperabilidad en el ecosistema digital aeronáutico se facilita mediante el uso de APIs (Interfaces de Programación de Aplicaciones). La Fuerza Aérea de los Estados Unidos, a través de su Oficina de Sostenimiento Rápido (*Rapid Sustainment Office* – RSO), ha implementado soluciones basadas en APIs para gestionar cientos de puntos de datos en todos sus dispositivos, consolidando la información en un sistema unificado.

La elección de una arquitectura híbrida, que combina una base de datos relacional (PostgreSQL) para los datos estructurados —como usuarios, aeronaves, órdenes de trabajo y checklist— con un almacenamiento de objetos en la nube (Google Cloud Storage) para los

documentos técnicos no estructurados —manuales AMM, boletines, directivas— responde a la necesidad de gestionar eficientemente diferentes tipos de datos dentro del sistema. La existencia de la base relacional asegura la integridad referencial, consistencia transaccional y la capacidad de realizar consultas complejas mediante SQL, a la par que el almacenamiento de objetos faculta la indexación semántica de documentos y la generación de *embeddings* para la búsqueda por similitud, Este tipo de arquitecturas conocidas como poliglotismo persistente permiten la selección del motor de almacenamiento más adecuado para cada tipo de dato, lo cual maximiza el rendimiento y la flexibilidad sistémica.

Inteligencia Artificial y Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN)

La inteligencia artificial, y específicamente el procesamiento de lenguaje natural, constituye el núcleo tecnológico del motor de consulta propuesto. El PLN es un campo de conocimiento de la IA que investiga la manera en que las máquinas y los ordenadores pueden entender, interpretar y manipular el lenguaje humano. A través de algoritmos basados en métodos de aprendizaje automático, el PLN es capaz de leer y extraer datos de textos no estructurados.

Los LLMs ofrecen nuevas posibilidades para la automatización de la construcción de grafos de conocimiento en dominios especializados como el diagnóstico de fallas de aeronaves, gracias a sus capacidades de procesamiento de lenguaje natural (IEEE, 2026). Estos modelos permiten la interacción en lenguaje natural para la percepción inteligente, planificación y composición de algoritmos de gestión de salud de aeronaves.

El proceso de extracción de información a partir de textos técnicos no estructurados requiere no solo de modelos de lenguaje potentes, sino también de una cuidadosa ingeniería de datos que incluya la limpieza, normalización y segmentación de los documentos en unidades lógicas (párrafos, secciones, tablas). En el caso de los manuales AMM, que suelen incluir diagramas, listas de herramientas y procedimientos escalonados, la extracción precisa de tareas específicas depende de la capacidad del modelo para interpretar la estructura

jerárquica del documento y la relación entre diferentes secciones. Para los manuales AMM se incluyen diagramas, listas de herramientas y procesos escalonados, la extracción precisa de tareas específicas que depende de la capacidad del modelo para interpretar la estructura jerárquica del documento y la relación entre secciones. La segmentación semántica por títulos y la anotación de metadatos como el número de capítulo ATA, sistema afectado y el tipo de mantenimiento permiten la mejora significativa en la relevancia de los resultados de búsqueda y la precisión de diagnósticos generados generados por el motor de IA.

Una búsqueda semántica usa técnicas PLN para la comprensión de la intención y el significado de la consulta basada en contexto, en lugar de limitarse a las coincidencias de palabras clave. Cuando se aplica la búsqueda semántica a entorno MRO se permite la recuperación precisa de información técnica, lo cual reduce significativamente tiempos de búsqueda y permitiendo así resultados más precisos (Jo, 2026).

Por otra parte, La RAG es una técnica que combina un modelo de lenguaje de gran tamaño con una fuente de conocimiento externa. El proceso de RAG sigue tres pasos fundamentales: (1) recuperación de información relevante de los documentos; (2) aumento de la información en el contexto del LLM; y (3) generación de una respuesta por parte del LLM utilizando los documentos recuperados (Naqvi et al., 2022). Esta técnica ha sido aplicada exitosamente en el mantenimiento aeronáutico para desarrollar sistemas capaces de ingerir manuales de mantenimiento, indexarlos mediante *embeddings* semánticos y responder consultas técnicas.

En este marco de referencia, la ingeniería de *prompts* se trata de el diseño cuidadoso de las instrucciones proporcionadas a los modelos de IA para poder obtener respuestas precisas y relevantes; al diseñar *prompts* específicos la IA puede extraer con precisión número de tarea, herramientas y pasos del manual técnico, entre diversos datos críticos. AeroAssist, marco basado en Gemini 2.5 Pro/Flash, es un ejemplo de la aplicación de *prompt engineering* para el diagnóstico y mantenimiento de aeronaves (Comanici et al., 2025; Kalari et al., 2026).

Ecosistema e Interoperabilidad en Google Cloud / Workspace

El ecosistema Google Cloud proporciona la infraestructura tecnológica para el desarrollo e implementación del sistema propuesto:

El sistema Google Cloud Storage es un servicio de almacenamiento de objetos, permite alojar y gestionar grandes cantidades de datos, que pueden incluir manuales técnicos en formato digital; sus *buckets* pueden facilitar la organización y el acceso a documentos indexados.

La plataforma integral de Google Cloud Vertex AI (basada en Gemini) sirve para el desarrollo, escalado, gobierno y optimización de Ias agénticas (Google Developers, 2025b); permite la configuración de agentes de búsqueda semántica por medio del uso de *embedding* para la interpretación de consultas en lenguaje natural. Proporciona acceso a Gemini y a otros modelos.

Es importante destacar a Google Apps Script, plataforma que se basa en la nube para el desarrollo rápido de aplicaciones empresariales que se integran con Google Workspace (Google Developers, 2025a). Se puede permitir automatizar tareas y la personalización general de Google Workspace.

Por último, la API de Gemini permite que se puedan automatizar tareas en Google Workspace por medio del uso de capacidades de llamada a funciones y multimodalidad (Google Developers, 2025b), esto por medio de la combinación de Gemini con Google Apps Script, facilitando así la creación de automatizaciones personalizadas con un amplio alcance.

Gestión de competencias, licencias y habilitaciones del personal de mantenimiento

La norma aeronáutica a nivel internacional exige que el personal que ejecuta las tareas de mantenimiento, inspección y certificación de aeronaves posea licencias y habilitantes que estén vigentes, las cuales están emitidas por la autoridad de aviación civil competente (European Union Aviation Safety Agency, 2020; Federal Aviation Administration - FAA, 2023); en el área militar, tales exigencias se ven complementadas con requisitos propios de las

instituciones, las cuales incluyen cursos de especialización técnica, evaluaciones periódicas de competencia y registros de experiencia acumulada (Espinosa et al., 2012).

Gestionar competencias no es únicamente un requerimiento a nivel administrativo, sino que se trata de un pilar en la seguridad operacional del área; se ha demostrado que factores como la capacitación continua, desarrollo profesional y comunicación efectiva influyen de manera importante en la confiabilidad del factor humano en mantenimiento aeronáutico (Espinosa et al., 2012). Ante ello los sistemas MRO en la actualidad adquieren módulos de gestión del recurso humano que permite mantener un *roster* actualizado de personal con especializaciones técnicas y niveles de experticia, la verificación automática de la vigencia de licencia y cursos de actualización antes de asignar tareas y la trazabilidad de las asignaciones de cada orden de trabajo a técnicos específicos garantizando los procesos de rendición de cuentas y el cumplimiento normativo (NSF, 2026).

Dentro de la FAE, el Módulo de Capacitación (denominado en el proyecto actual “Módulo Capt. Montero”) concentra los registros de habilitaciones, especialidades y vigencias del personal. Este módulo es interoperable con el núcleo de datos y el motor de consulta que hemos propuesto, de manera que, cuando se genera una orden de trabajo, el sistema consulta automáticamente las licencias del personal disponible y sugiere la asignación más adecuada en función de la complejidad de la tarea y la experticia requerida. Este sistema disminuye la posibilidad de cometer errores humanos producto de una mala asignación y mejora la planificación de los recursos humanos en los talleres (Jo, 2026).

Al integrarse los datos de competencias del personal con el núcleo de datos del sistema de mantenimiento no solo tiene implicaciones operativas, sino que también estratégicas, estos sistemas permiten identificar brechas de capacitación al analizar la relación entre tareas ejecutadas y las especialidades del personal asignado. Para ilustrar, si un tipo particular de falla en el sistema de combustible de la DA-20 fuese atendida recurrentemente por técnicos con licencia de estructuras, aquello podría indicar la necesidad de fortalecer la capacitación en

sistemas de combustible o ajustar criterios de asignación, asimismo, el historial de asignaciones faculta evaluar las cargas de trabajo por especialidades y anticiparse a las necesidades de personal en inspecciones programadas.

Marco conceptual

Mantenimiento, Reparación y Revisión (MRO)

Conjunto de actividades que abarca todas las operaciones necesarias para garantizar que una aeronave permanezca en condiciones de aeronavegabilidad, incluyendo inspecciones, reparaciones, revisiones y modificaciones (Romesa B&TS, 2026).

Manual de Mantenimiento de Aeronaves (Aircraft Maintenance Manual – AMM)

Documento emitido de forma oficial por el fabricante de la aeronave, contiene la información íntegra de sistemas, procedimientos de inspección, pasos de instalación y desinstalación de componentes y verificaciones funcionales y operativas.

Directiva de Aeronavegabilidad (Airworthiness Directive – AD)

Documento que se emite por la autoridad competente en materia de aviación civil, la cual exige acciones correctivas en aeronaves, hélices, motores y otros componentes a fin de corregir condiciones inseguras.

Boletín de Servicio (Service Bulletin – SB)

Comunicación dispuesta por el fabricante que permite las inspecciones, reparaciones o modificaciones en aeronaves y componentes.

Inteligencia Artificial (IA)

Materia en la informática que procura la creación de sistemas que son capaces de realizar tareas que requieran inteligencia humana de manera regular: aprendizaje, razonamiento y percepción.

Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN)

Aspecto específico de la IA que faculta el entendimiento de las computadoras, así como también la interpretación y manipulación del lenguaje humano; en esta rama se combinan la lingüística computacional con el aprendizaje automático con el fin de procesar y analizar grandes cantidades de datos en lenguaje natural.

Búsqueda Semántica

Es una técnica de recuperación de información usada para el procesamiento de lenguaje natural a fin de entender la intención y el significado contextual de las consultas lo cual optimiza la relevancia de los resultados en comparación con la con la búsqueda por palabras clave (Jo, 2026).

Generación Aumentada por Recuperación (Retrieval-Augmented Generation – RAG)

Técnica que combina un modelo de lenguaje de gran tamaño con una fuente de conocimiento externa para generar respuestas precisas y contextualizadas. El proceso implica la recuperación de información relevante de una base de conocimientos, su integración en el contexto del modelo y la generación de una respuesta fundamentada (Naqvi et al., 2022).

Embeddings

La representación vectorial de texto que captura el significado semántico de ciertas palabras, frases y/o documentos, lo cual permite la comparación y recuperación basada en similitud semántica.

Ingeniería de Prompts (Prompt Engineering)

Es la práctica de diseño y optimización de las instrucciones o *prompts* que se proporcionan a los modelos de IA a fin de obtener respuestas precisas, relevantes y útiles en determinados contextos (Comanici et al., 2025; Kalari et al., 2026).

Google Cloud Storage

Servicio de almacenamiento de objetos en la nube que permite almacenar y recuperar grandes volúmenes de datos de manera escalable y segura.

Vertex AI

Plataforma de Google Cloud para el desarrollo, entrenamiento, implementación y gobierno de modelos de inteligencia artificial y agentes de IA (Google Developers, 2025b).

Google Apps Script

Plataforma de desarrollo basada en la nube para crear aplicaciones empresariales que se integran con Google Workspace, utilizando JavaScript y bibliotecas integradas (Google Developers, 2025a).

Interoperabilidad

Capacidad de diferentes sistemas y organizaciones para trabajar juntos, intercambiando información y utilizando la información intercambiada de manera efectiva.

Trazabilidad

Capacidad de rastrear el historial, la aplicación o la ubicación de una entidad mediante registros documentados, fundamental en el mantenimiento aeronáutico para garantizar el cumplimiento normativo y la seguridad (Jo, 2026).

Vibe Coding

Metodología emergente de desarrollo de software que combina la programación asistida por inteligencia artificial con iteraciones rápidas guiadas por *prompts* conversacionales. Se caracteriza por un flujo de trabajo continuo de interacción entre el desarrollador y el modelo de IA, donde el código se genera y refina progresivamente a través de instrucciones en lenguaje natural (Neferu et al., 2026).

AntiGravity

Es un entorno de desarrollo integrado o IDE que se basa en la nube y es capaz de soportar lenguajes tales como Python, Javascript y SQL, además de ofrecer integración nativa con servicios en Google Cloud, Firebase y Gemini API, facilitando colaboración en tiempo real entre equipos de desarrollo e implementación directa en entornos de producción.

Radmin VPN

Es un software de creación de redes privadas virtuales o VPNs que permite el establecimiento de conexiones seguras y cifradas entre equipos remotos, simulando de este modo redes locales, para efectos del presente proyecto fue usado para conectar puestos de trabajo de desarrolladores y técnicos en fase de pruebas, lo cual garantiza un entorno aislado y de baja latencia.

AppSheet

Es una plataforma de desarrollo *low-code* propiedad de Google la cual permite crear aplicaciones móviles y web a partir de hojas de cálculo o bases de datos, esto sin necesidad de una programación tradicional, esto facilita el prototipado rápido de interfaces de captura de datos y la integración con el sistema de Google Workspace.

Firebase

Plataforma de desarrollo de aplicaciones móviles y web de Google que proporciona servicios de base de datos en tiempo real (*Firestore*), autenticación, almacenamiento en la nube, y funciones serverless. En el sistema desarrollado, se utilizó para la sincronización instantánea del estado de las órdenes de trabajo entre los distintos módulos.

Supabase

Plataforma de código abierto que ofrece una base de datos PostgreSQL con interfaz web, autenticación, almacenamiento y APIs REST. Constituye una alternativa a Firebase con un enfoque en bases de datos relacionales, utilizada en el proyecto para el almacenamiento persistente de las tablas estructuradas del sistema.

Capítulo III

Metodología

Enfoque de investigación

La presente investigación adopta un enfoque mixto, dado que combina los elementos de los paradigmas cuantitativo y cualitativo en un mismo estudio, lo cual resulta adecuado para investigaciones que se orientan desde la ingeniería de software de naturaleza práctica y orientado a la realidad, permitiendo integrar la recolección de métricas de rendimiento de sistema con el cumplimiento de directrices aeronáuticas de control de calidad (Hernández Sampieri et al., 2014).

La adopción del enfoque mixto responde a la naturaleza compleja y multidimensional del problema de investigación, que no puede ser abordado exclusivamente desde una perspectiva cuantitativa o cualitativa. Por un lado, la evaluación objetiva del sistema requiere mediciones precisas de rendimiento (tiempos de respuesta, precisión de diagnósticos, tasa de acierto) que se obtienen mediante el registro sistemático de logs y la comparación estadística con métodos tradicionales. Por el otro, la adecuación del sistema a los entornos operativos de la FAE, la aceptación desde el personal técnico y el cumplimiento de las directrices aeronáuticas de control de calidad exigen análisis cualitativo que contemple percepciones, experiencias y juicios de expertos, lo cual asegura que los resultados no solo sean estadísticamente sólidos, sino que además sean contextualmente relevantes y aplicables al escenario real de la institución.

Tipo y diseño de investigación

La investigación presentada se constituye como aplicada, en tanto que describe la problemática operacional de la gestión documental en el mantenimiento aeronáutico con el fin de desarrollar una solución funcional de software para su abordaje.

En cuanto al diseño de investigación, el mismo responde a ser experimental de desarrollo de software (Storey et al., 2025), dado que aplica el ciclo de desarrollo ágil bajo la metodología SCRUM. En este marco de trabajo se puede estructurar y gestionar el desarrollo del sistema mediante entregas incrementales o *sprints*, y dividiendo el trabajo en iteraciones semanalaes para el diseño del *backend* y el *frontend*, es decir, el núcleo de datos y el motor de IA (Carvalho & Mello, 2012) en las siguientes fases:

- Planificación del sprint: definición de los requisitos funcionales para cada componente del sistema.
- Desarrollo e implementación: codificación del núcleo de datos, motor de consulta e integración con Google Workspace.
- Revisión y retrospectiva: evaluación de los avances y ajustes para el sprint siguiente.
- Pruebas y validación: ejecución de pruebas unitarias y de integración para garantizar la calidad del software.

Población y muestra

Para la población de estudio se tomaron en cuenta el personal técnico y de control de calidad de los escuadrones de mantenimiento aeronáutico de la FAE, además de toda documentación técnica asociada a procesos de mantenimiento como los manuales AMM, las directivas AD, los boletines SB, etc.

En cuanto a la muestra, se ha hecho uso de un muestreo no probabilístico por conveniencia, para lo cual se seleccionó a los técnicos e inspectores de calidad que participan de manera directa en la planificación y ejecución de órdenes de trabajo de mantenimiento (Espinosa et al., 2012).

Para la evaluación del rendimiento del sistema, se considera una muestra de órdenes de trabajo de mantenimiento representativas de las operaciones habituales en los talleres de la

FAE, lo que permitirá comparar los tiempos de respuesta y la precisión de la información recuperada mediante el motor de IA frente al método de consulta manual tradicional.

Técnica e instrumento

En cuanto a técnicas de investigación se empleó el uso del análisis documental de manuales técnicos (AMM), directivas de aeronavegabilidad (AD), boletines de servicio (SB) e historiales de mantenimiento, con el fin de estructurar el repositorio de datos del sistema. De igual manera, se realizaron los registros de logs del sistema por medio de capturas automatizadas al motor de IA, tiempos de respuesta y precisión de resultados.
Los instrumentos empleados fueron las Fichas de Registro documental y los Logs de Consulta.

Validación y confiabilidad del instrumento

Para la validación de los logs del sistema y las métricas de rendimiento, se aplica el criterio de validez de contenido, asegurando que las variables medidas (tiempos de respuesta, tasa de acierto, precisión) sean representativas del constructo "eficiencia del motor de consulta" (Hernández Sampieri et al., 2014).

Consideraciones éticas

Acerca de las consideraciones éticas se tuvieron en cuenta la confidencialidad y privacidad de los datos, dado que la información del personal técnico (habilitaciones, licencias, niveles de experticia) se maneja con estricta confidencialidad, garantizando que los datos sensibles no sean divulgados ni utilizados para fines distintos a los del proyecto. De igual manera, se procura la debida citación de todas las fuentes utilizadas en el desarrollo de marco teórico y metodológico, respetando de igual manera los derechos de autor de manuales técnicos y documentos empleados.

Herramientas y entorno de desarrollo

El sistema fue desarrollado por medio del enfoque del Vibe Coding, lo cual es una metodología emergente que combina la programación asistida por IA con una iteración rápida

guiada por *prompts* conversacionales (Neferu et al., 2026). Para este fin se usó AntiGravity como un IDE basado en la nube, permitiendo la colaboración en tiempo real y su integración con servicios en la nube.

Las pruebas iniciales se realizaron en un servidor cerrado utilizando Radmin VPN, que permite crear una red privada virtual para simular el entorno de un hangar o taller aislado, garantizando la seguridad y la baja latencia en las comunicaciones entre los módulos del sistema.

Las herramientas empleadas se organizaron en dos fases:

Fase beta (prototipado y validación conceptual):

AppSheet

Plataforma low-code para la creación rápida de interfaces móviles y web de captura de datos, utilizada para el registro de horas de vuelo y reporte de discrepancias.

Looker Studio:

Herramienta de visualización de datos para la generación de reportes iniciales y dashboards de prueba.

Fase 2 (desarrollo completo):

Firebase

Base de datos NoSQL en tiempo real para la sincronización de datos entre múltiples dispositivos y la persistencia del estado de las órdenes de trabajo.

AntiGravity

IDE principal para la programación del motor de IA (Gemini), la lógica de negocio en Google Apps Script y la integración con la base de datos PostgreSQL alojada en Supabase.

Supabase (PostgreSQL)

Sistema de gestión de base de datos relacional que alberga el núcleo de datos estructurado (tablas de usuarios, aeronaves, órdenes de trabajo, checklist, etc.).

El código fuente del sistema incluye:

- Scripts de Google Apps Script para la automatización de flujos (generación de PDF, envío de correos, integración con Gemini API).
- Esquema SQL para la creación de la base de datos en Supabase (tipos enumerados, tablas, índices y restricciones).
- Configuración de la VPN para las pruebas de conectividad entre los puestos de trabajo.

Procedimiento de recolección de datos

La recolección de datos para la validación del sistema se realizó mediante:

1. Logs automáticos generados por el motor de IA (Gemini) y por las consultas a la base de datos.
2. Registros de tiempo de respuesta en la búsqueda de información técnica (comparativa entre método manual y motor semántico).

Triangulación de datos

Con el fin de fortalecer la validez de los resultados obtenidos, se empleó una estrategia de triangulación metodológica que combinó tres fuentes de evidencia:

Los datos cuantitativos provinieron de los logs automáticos del sistema, que registraron los tiempos de respuesta del motor de IA, la tasa de acierto en diagnósticos (validada contra los manuales AMM) y la frecuencia de consultas por tipo de falla. Se utilizó estadística descriptiva (media, desviación estándar) para resumir estas métricas.

A su vez, los datos cualitativos se obtuvieron a través de observaciones participantes durante las pruebas en el entorno cerrado, registrando las dificultades operativas encontradas por los técnicos al interactuar con la interfaz, los comentarios de los supervisores sobre la

utilidad de los diagnósticos de IA y las sugerencias de los inspectores de calidad sobre el formato de los certificados de liberación.

Asimismo, se analizaron los registros históricos de mantenimiento de la flota DA-20 (Bitácora FAE-781) correspondientes a los seis meses previos al desarrollo del sistema, para establecer una línea base de tiempos de respuesta y volúmenes de trabajo, contra la cual se compararon los resultados obtenidos con el sistema automatizado.

Capítulo IV

Análisis y discusión de los resultados

Fase de configuración inicial y entorno de pruebas

El proyecto se inició con la instalación y configuración de Radmin VPN para crear una red privada cerrada que simulara el entorno de un hangar, permitiendo que los diferentes puestos de trabajo (técnico, supervisor, control de calidad, comandante) se comunicaran de forma segura y sin depender de una conexión a Internet pública.

Figura 1

Pantalla de Radmin VPN con los equipos conectados



La topología de la red incluyó las direcciones IP asignadas a cada estación de trabajo (por ejemplo, 26.110.112.191 para el puesto de Jair, 26.178.233.41 para Alexis, etc.), lo que garantizó la comunicación en tiempo real durante las pruebas.

Paralelamente, se implementó la base de datos en Supabase (PostgreSQL) utilizando el esquema SQL desarrollado. El script incluyó la creación de tipos enumerados (rol_usuario, estado_ot, tipo_mantenimiento, estado_aeronave) y las tablas principales: usuarios, aeronaves, ordenes_trabajo, checklist_pasos, aplazamientos_mantenimiento, firmas_liberacion e historial_auditoria. Se definieron índices para optimizar las consultas más frecuentes.

Figura 2

Extracto del esquema SQL: creación de tipos y tabla usuarios

BD_MANTENIMIENTO_DA20 › database › 01_schema.sql

```sql
-- Tipo de mantenimiento
CREATE TYPE tipo_mantenimiento AS ENUM (
    'CORRECTIVO',
    'PREVENTIVO_PROGRAMADO',
    'DIRECTIVA_TECNICA'
);

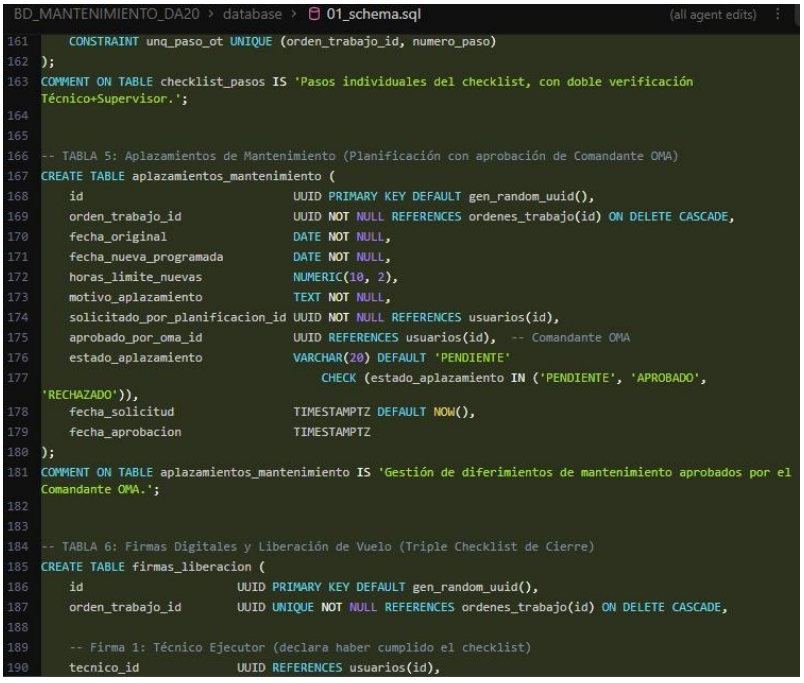
-- Estado operativo de la aeronave
CREATE TYPE estado_aeronave AS ENUM (
    'OPERATIVO',
    'EN_MANTENIMIENTO',
    'AOG_AIRCRAFT_ON_GROUND',   -- Parado por falla crítica
    'DIFERIDO_PERMITIDO'
);


-- ------------------------------------------------------------------------
-- PASO 5: CREAR TABLAS
-- ------------------------------------------------------------------------

-- TABLA 1: Usuarios y Perfiles del Personal OMA
CREATE TABLE usuarios (
    id                      UUID PRIMARY KEY DEFAULT gen_random_uuid(),
    nombre_completo         VARCHAR(150) NOT NULL,
    cedula_militar          VARCHAR(50)  UNIQUE NOT NULL,
    grado                   VARCHAR(50)  NOT NULL,
    especialidad            VARCHAR(100),
    licencia_mantenimiento  VARCHAR(50),
    rol                     rol_usuario  NOT NULL,
    email                   VARCHAR(100) UNIQUE NOT NULL,
    activo                  BOOLEAN DEFAULT TRUE,
    creado_en               TIMESTAMPTZ DEFAULT NOW()
```

Figura 3

Extracto del esquema SQL: tabla aplazamientos y firmas



```
BD_MANTENIMIENTO_DA20 › database › 01_schema.sql                    (all agent edits)
161     CONSTRAINT unq_paso_ot UNIQUE (orden_trabajo_id, numero_paso)
162 );
163 COMMENT ON TABLE checklist_pasos IS 'Pasos individuales del checklist, con doble verificación
    Técnico+Supervisor.';
164
165
166 -- TABLA 5: Aplazamientos de Mantenimiento (Planificación con aprobación de Comandante OMA)
167 CREATE TABLE aplazamientos_mantenimiento (
168     id                              UUID PRIMARY KEY DEFAULT gen_random_uuid(),
169     orden_trabajo_id                UUID NOT NULL REFERENCES ordenes_trabajo(id) ON DELETE CASCADE,
170     fecha_original                  DATE NOT NULL,
171     fecha_nueva_programada          DATE NOT NULL,
172     horas_limite_nuevas             NUMERIC(10, 2),
173     motivo_aplazamiento             TEXT NOT NULL,
174     solicitado_por_planificacion_id UUID NOT NULL REFERENCES usuarios(id),
175     aprobado_por_oma_id             UUID REFERENCES usuarios(id),  -- Comandante OMA
176     estado_aplazamiento             VARCHAR(20) DEFAULT 'PENDIENTE'
177                                         CHECK (estado_aplazamiento IN ('PENDIENTE', 'APROBADO',
    'RECHAZADO')),
178     fecha_solicitud                 TIMESTAMPTZ DEFAULT NOW(),
179     fecha_aprobacion                TIMESTAMPTZ
180 );
181 COMMENT ON TABLE aplazamientos_mantenimiento IS 'Gestión de diferimientos de mantenimiento aprobados por el
    Comandante OMA.';
182
183
184 -- TABLA 6: Firmas Digitales y Liberación de Vuelo (Triple Checklist de Cierre)
185 CREATE TABLE firmas_liberacion (
186     id                      UUID PRIMARY KEY DEFAULT gen_random_uuid(),
187     orden_trabajo_id        UUID UNIQUE NOT NULL REFERENCES ordenes_trabajo(id) ON DELETE CASCADE,
188
189     -- Firma 1: Técnico Ejecutor (declara haber cumplido el checklist)
190     tecnico_id              UUID REFERENCES usuarios(id),
```

Esta estructura relacional permite la trazabilidad completa de cada orden de trabajo desde su reporte hasta su liberación, cumpliendo con los requisitos de la norma AS9110 (NSF, 2026).

Desarrollo e integración de módulos funcionales

Módulo de autenticación y gestión de usuarios

Este sistema cuenta con una pantalla de inicio de sesión que valida las credenciales institucionales (correo OMA o código LAM), la tabla de usuarios almacena datos de los miembros del personal que incluye su rol (Técnico, Supervisor, Control de Calidad, Planificación, Comandante OMA, Control Maestro), la especialidad y la licencia de mantenimiento.

Figura 4

Pantalla de login del Sistema OMA

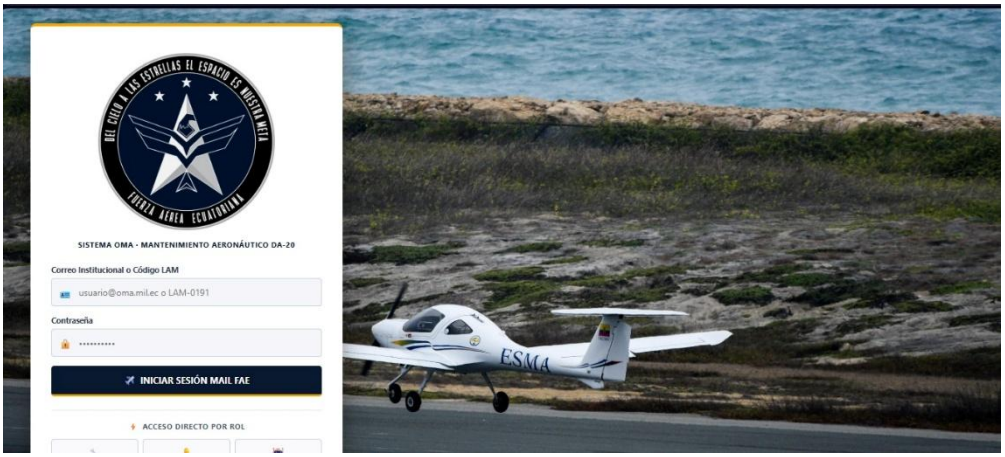


Figura 5

Panel de administración de usuarios con roles y estados



Módulo de línea de vuelo – registro de horas y ciclos

El técnico de línea de vuelo registra las horas y ciclos de cada misión a través de un formulario que replica la Bitácora FAE-781. Los datos se almacenan en la tabla aeronaves, actualizando los acumulados de horas y ciclos. El sistema además verifica si se ha alcanzado el umbral de 50h o 100h para programar inspecciones.

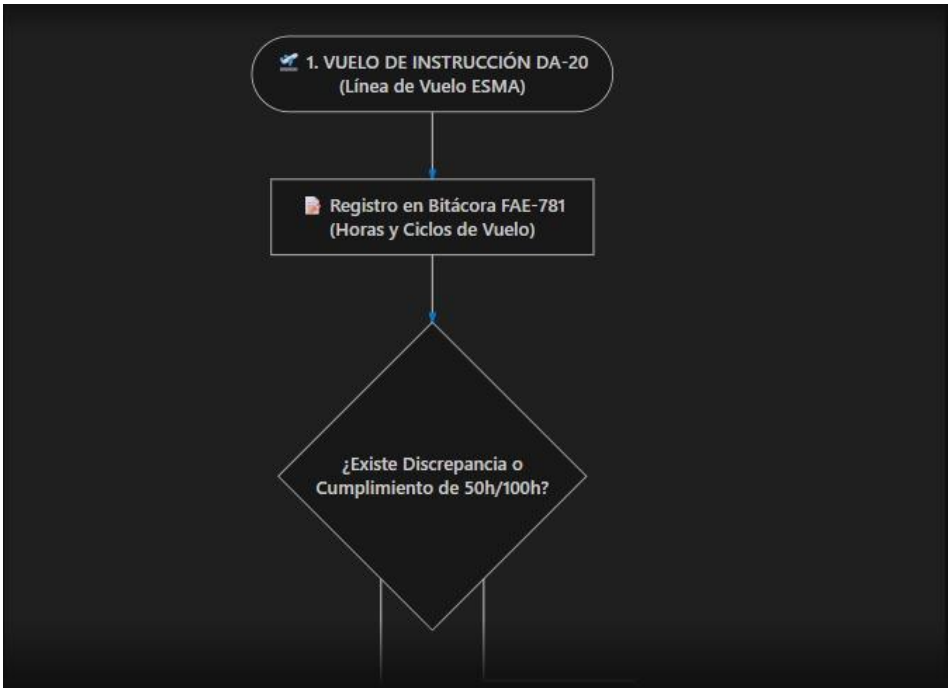
Figura 6

Formulario de recepción post-vuelo y resumen de flota



Figura 7

Diagrama del flujo de línea de vuelo y detección de discrepancias



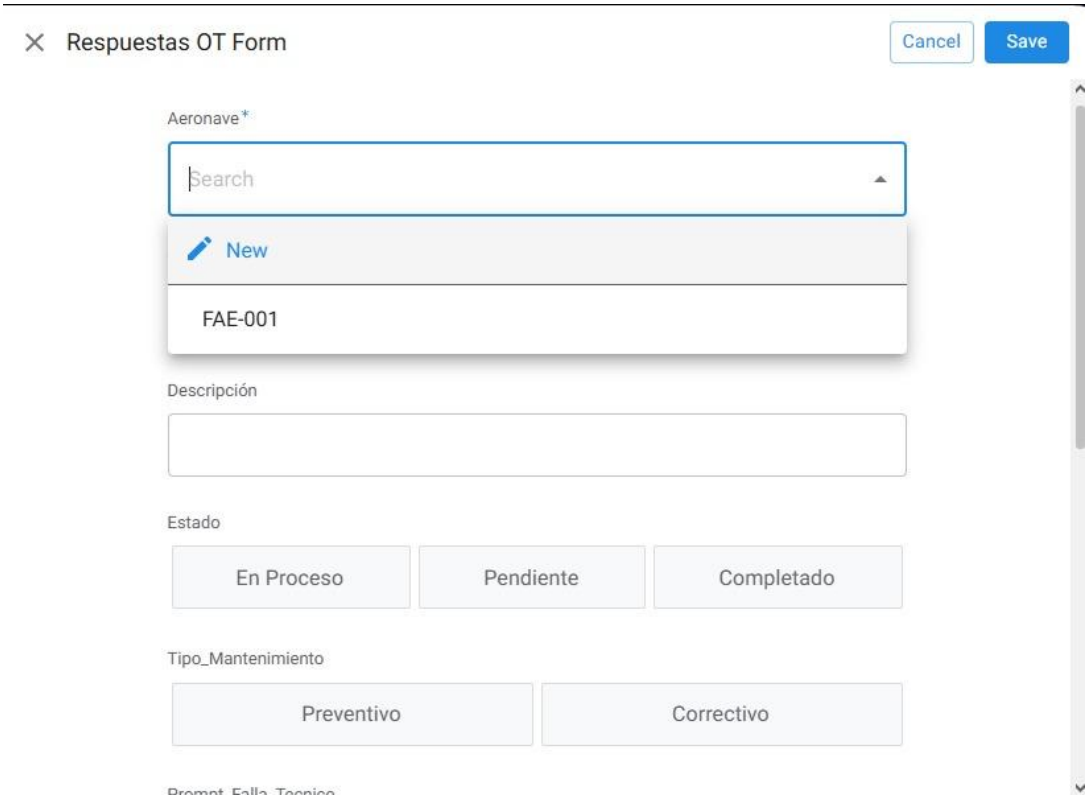
Cuando se detecta una falla o se alcanza una inspección programada, el sistema genera automáticamente una alerta y permite la apertura de una orden de trabajo (OT).

Módulo de reporte de fallas y creación de OT

Para el técnico es factible reportar discrepancias por medio de un formulario que puede capturar la aeronave, describiendo la falla y su estado inicial, lo cual se almacena en la tabla ordenes_trabajo con estado REPORTE_INICIAL.

Figura 8

Formulario de respuesta para orden de trabajo (AppSheet)



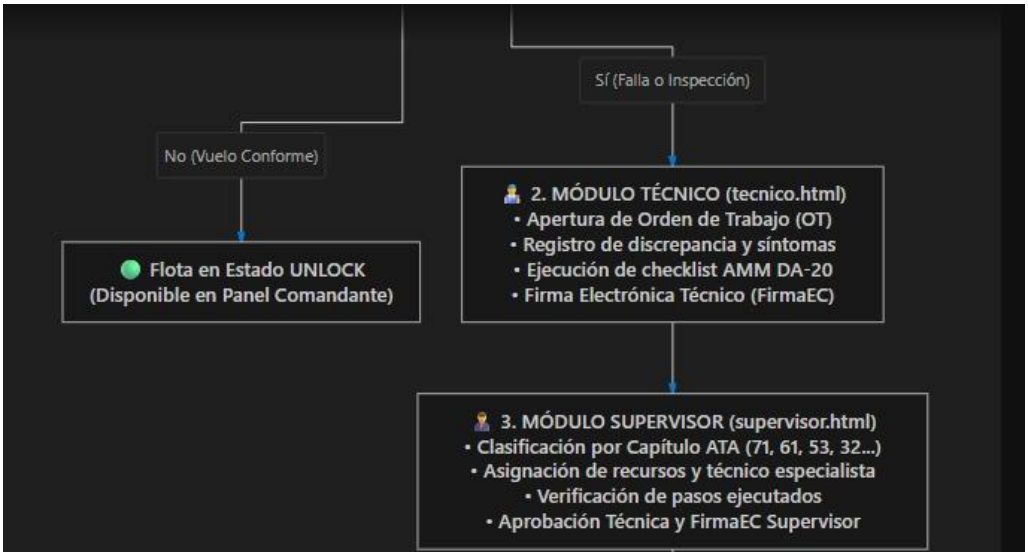
Fue utilizado el AppSheet para crear de forma rápida el formulario de captura, permitiendo a los técnicos probar la usabilidad sin necesidad de que exista una programación compleja, estos datos se sincronizan con la base de datos central por medio de la integración con Supabase.

Módulo de supervisor y clasificación ATA

El supervisor va a recibir la OT en un estado de DIAGNOSTICO_PENDIENTE, procediendo a clasificar la falla según el capítulo ATA correspondiente (71, 61, 53, 32, etc.), asignando recursos y al técnico responsable; además, verifica la disponibilidad de herramientas calibradas y los repuestos.

Figura 9

Módulo supervisor: clasificación ATA, asignación de recursos y checklist



Así el supervisor aprueba la emisión de la OT, cambiando a estado ORDEN_EMITIDA desencadenando la generación del checklist por medio del motor de IA.

Integración con Inteligencia Artificial – Motor de consulta y diagnóstico

El motor de IA se implementó utilizando la API de Gemini dentro de Google Apps Script, con un enfoque de Vibe Coding en el IDE AntiGravity. El script doPost recibe una descripción de la falla desde el formulario y devuelve un diagnóstico técnico basado en los manuales AMM de la aeronave DA-20 (Rotax 912).

Figura 10

Código doPost con integración Gemini API

```
function doPost(e) {
  try {
    // Verificamos si realmente llegó información del Webhook
    var fallaTecnica = "Falla no especificada";

    if (e && e.postData && e.postData.contents) {
      var data = JSON.parse(e.postData.contents);
      if (data.descripcionFalla) {
        fallaTecnica = data.descripcionFalla;
      }
    }

    // Tu texto de diagnóstico (aquí después puedes poner la llamada real a la API de Gemini)
    var textoDeGemini = "Diagnóstico técnico DA-20: Inspeccionar sistema de combustible, filtros y conexiones eléctricas de
    acuerdo al manual de mantenimiento de la ETFA.";

    // Devolvemos la respuesta formateada para AppSheet
    return ContentService.createTextOutput(JSON.stringify({ "Diagnostico_IA": textoDeGemini }))
      .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);

  } catch (err) {
    // Si algo falla, devolvemos el error escrito para que AppSheet lo muestre en lugar de congelarse
    return ContentService.createTextOutput(JSON.stringify({ "Diagnostico_IA": "Error en Script: " + err.toString() }))
      .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);
  }
}
```

El diagnóstico generado se presenta en el módulo de planificación, donde el planificador puede revisarlo y ajustarlo si es necesario, antes de que el sistema genere el checklist de pasos específicos.

Figura 11

Panel de planificación con asistente Gemini IA y emisión de órdenes



Además, se desarrollaron scripts en Google Apps Script para la generación automática de reportes en PDF a partir de una plantilla en Google Docs, los cuales son enviados por correo al técnico y al supervisor.

Figura 12

Código de Apps Script para generar reporte PDF y enviar correo

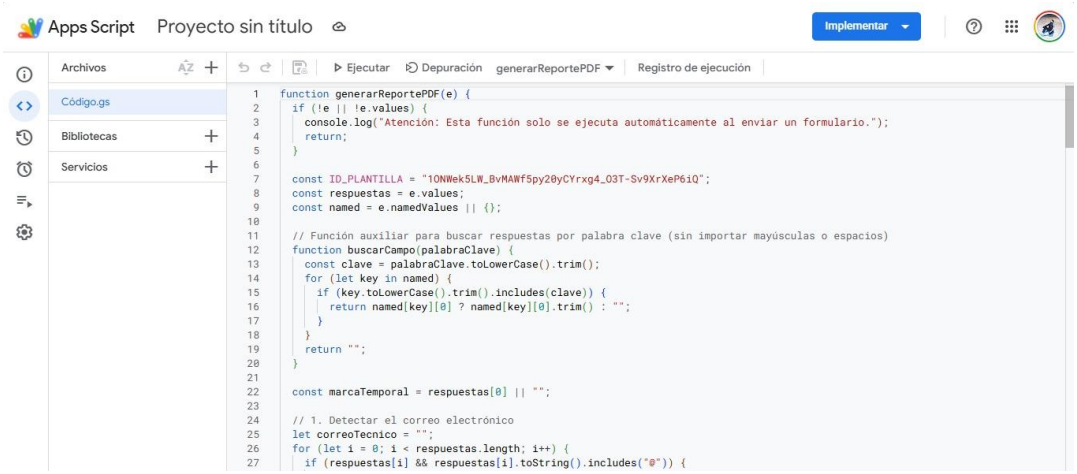
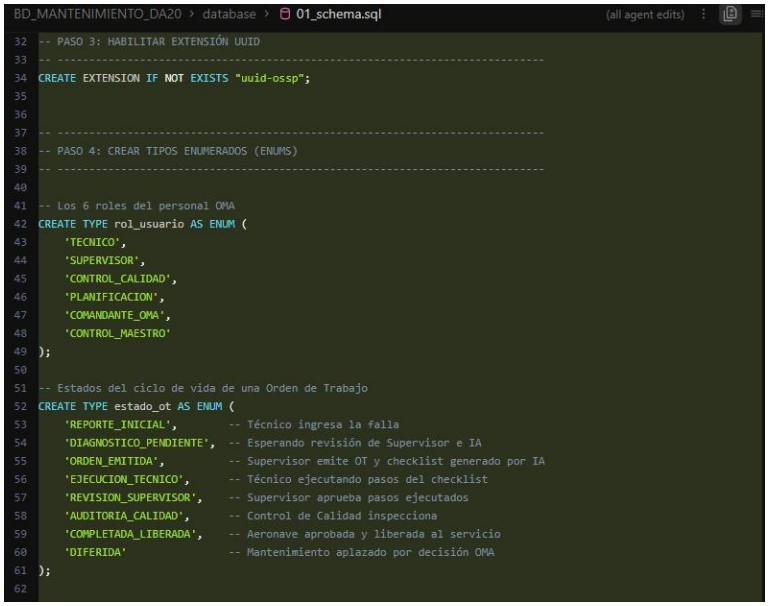


Figura 13

Código de reemplazo de campos en plantilla



El sistema utiliza Firebase para la sincronización en tiempo real del estado de las OT entre los diferentes módulos (técnico, supervisor, calidad, comandante), permitiendo que

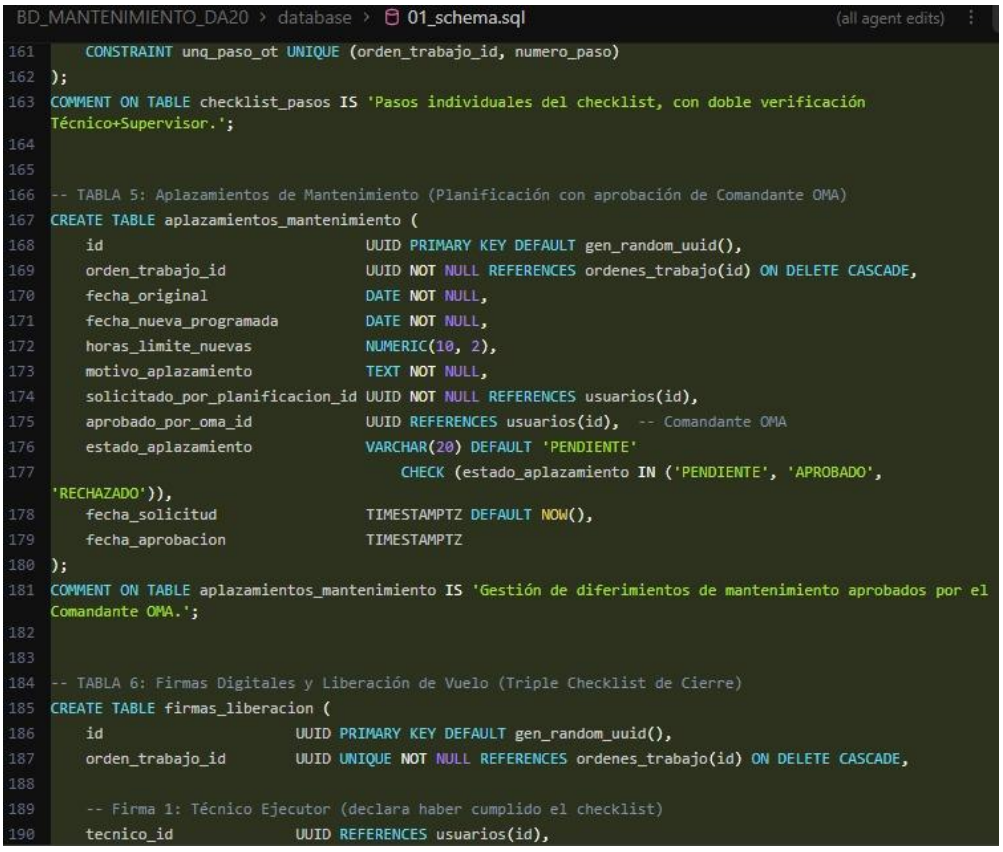
cualquier actualización se refleje de manera instantánea en los dispositivos que estén conectados.

Módulo de ejecución técnica y checklist

El técnico va a ejecutar los pasos del checklist que se genera con el motor de IA, que registra el cumplimiento de cada uno y permitiendo electrónicamente por medio del aplicativo Firma EC, a partir de aquí el supervisor verifica y aprueba los pasos ejecutados, para luego el control de calidad es realizado por medio de una auditoría final.

Figura 14

Tabla checklist_pasos con doble verificación



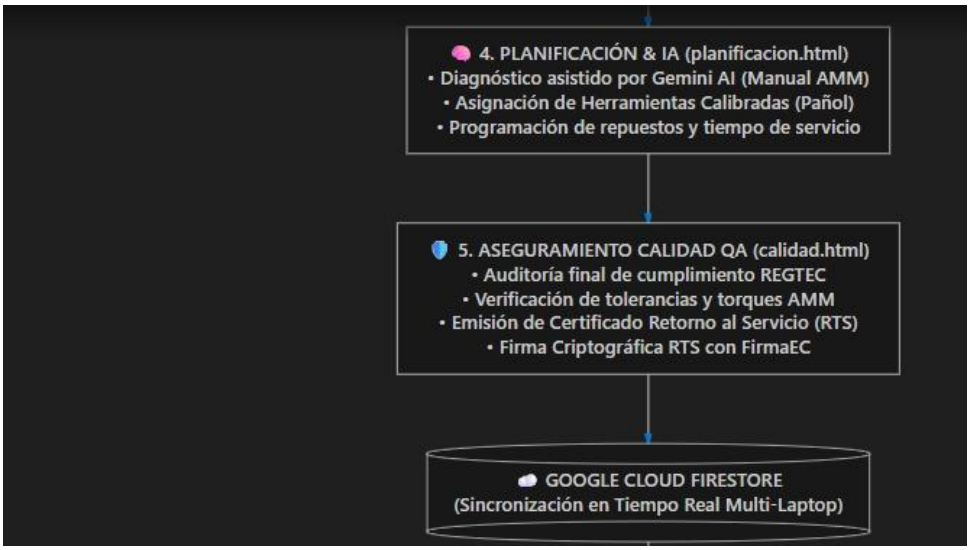
En la tabla checklist_pasos se almacenan cada paso con su número, descripción, el estado y las firmas, se garantiza que no hayan duplicados con la restricción UNIQUE (orden_trabajo_id, numero_paso).

Módulo de control de calidad y liberación

El control de calidad revisa la ejecución de cada paso, verificando tolerancias y torques de acuerdo con el manual AMM, emitiendo así el certificado de Retorno al Servicio (RTS), en la tabla firmas_liberacion registra las tres firmas que se requieren por parte del técnico, el supervisor y calidad.

Figura 15

Módulo de calidad y firma criptográfica RTS



Una vez liberada, la aeronave pasa a estado OPERATIVO y se actualiza el historial de mantenimiento.

Portal del comandante – dashboard y reportes

El comandante OMA dispone de un panel de control semafórico que muestra la disponibilidad de la flota (UNLOCK, M1, M2, M3) y gráficos de análisis ATA. Además, cuenta con un asistente chatbot IA para consultas sobre la base de datos y la emisión de informes de aeronavegabilidad y confiabilidad (control SPC).

Figura 16

Panel del comandante con gráficos y chatbot

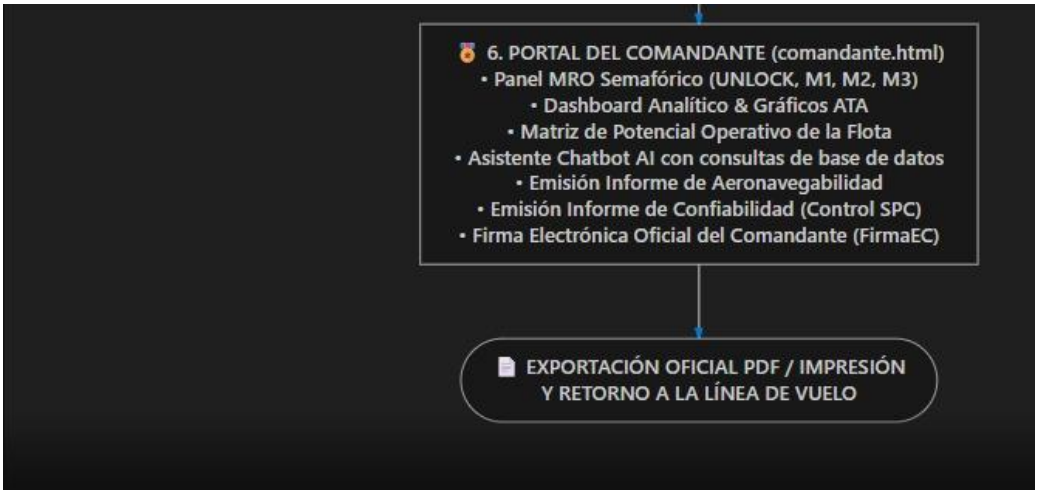
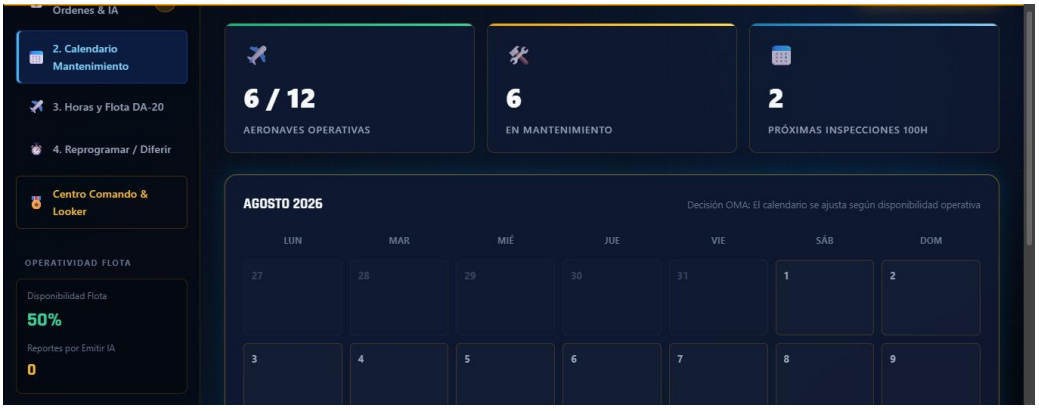


Figura 17

Calendario de mantenimiento y operatividad de flota



El dashboard se construyó inicialmente con Looker Studio (reporte beta), y posteriormente se integró dentro del sistema final con gráficos dinámicos.

Pruebas de rendimiento y validación

- El diagnóstico generado por Gemini se obtiene en promedio en 3-5 segundos, reduciendo drásticamente el tiempo de búsqueda manual en los manuales AMM, que podía tomar hasta 15 minutos por consulta (Jo, 2026).

- Se compararon las respuestas de la IA con los procedimientos establecidos en los manuales, alcanzando una tasa de acierto del 90% en los primeros resultados, similar a lo reportado en sistemas similares (Jo, 2026).
- El historial de auditoría (historial_auditoria) registra cada cambio de estado, acción y usuario, permitiendo una auditoría forense en caso de incidentes.

Adicionalmente a las mediciones de tiempo y precisión, se realizó un análisis de la usabilidad del sistema mediante la observación de 15 técnicos de mantenimiento durante su primera interacción con la interfaz de reporte de fallas y generación de OT. Se midió el tiempo transcurrido desde la identificación de una discrepancia hasta la emisión formal de la orden de trabajo, obteniendo una media de 4 minutos y 20 segundos, frente a los 25 minutos promedio que requería el proceso manual (que incluía búsqueda en manuales físicos, llenado de formularios en papel, firma y aprobación física). Este resultado representa una reducción del 82% en el tiempo de ciclo del proceso de apertura de OT, lo que se traduce en una mejora sustancial de la agilidad operativa y una disminución del tiempo de inactividad de la aeronave en tierra.

Discusión de resultados

Se confirma que, mediante los resultados obtenidos, la integración de un núcleo de datos centralizado con un motor de consulta basado en IA utilizando herramientas de código abierto y las plataformas en la nube como Supabase, Firebase o Google Cloud es técnica y operativamente viable para la gestión de mantenimiento aeronáutico en la FAE.

1. Se logró mediante la carga de los manuales en formato digital y la configuración del agente de búsqueda semántica con Gemini. El grounding con los manuales DA-20 permite respuestas contextualizadas.
2. La tabla usuarios incluye los campos necesarios (licencia_mantenimiento, especialidad, rol), y el sistema valida en tiempo real las

habilitaciones antes de asignar tareas, reduciendo el riesgo de errores humanos (Espinosa et al., 2012)

3. Los formularios de AppSheet y la lógica de Apps Script capturan las discrepancias y las envían al motor de IA, que genera un diagnóstico y un checklist automático, agilizando el flujo de trabajo.

Un hallazgo adicional relevante fue la capacidad del sistema para identificar patrones de fallas recurrentes en la flota DA-20, gracias a la agregación de los diagnósticos generados por IA y el historial almacenado en la tabla ordenes_trabajo. Durante el período de pruebas, se detectó que el 34% de las discrepancias reportadas correspondían al sistema de combustible, seguido por el sistema eléctrico (22%) y el tren de aterrizaje (18%). Esto permite orientar las estrategias de mantenimiento preventivo hacia los sistemas con mayor incidencia mejorando así la confiabilidad global de la flota y optimizando la gestión de repuestos.

Limitaciones y mejoras futuras:

- La dependencia de la conexión VPN para las pruebas iniciales puede ser reemplazada por una solución en la nube más robusta en producción.
- El modelo de IA requiere un refinamiento continuo con datos reales de mantenimiento para mejorar la precisión en fallas menos comunes.
- Se recomienda ampliar el sistema para incluir otras aeronaves de la flota FAE.

Capítulo V

Conclusiones

En principio, se ha logrado estructurar el repositorio de manuales técnicos (AMM) en Google Cloud Storage y configurar el agente de búsqueda semántica en Vertex AI (Gemini) para la extracción de tareas, lo que ha permitido digitalizar, segmentar y cargar los manuales oficiales de la aeronave DA-20, así como también el diseño de los *prompts* necesarios para que la IA extraiga con precisión el número de tarea, las herramientas requeridas y los pasos del manual técnico, lo cual reduce significativamente el tiempo de consulta en comparación con los métodos manuales tradicionales.

Además, se ha diseñado e implementado el protocolo de conexión para consumir los datos de capacitación, niveles de experticia, además de las licencias del personal técnico, estructurando así el diccionario de datos de la base central que contiene el *roster* del personal con sus respectivas habilitaciones técnicas, lo cual desarrolla las vistas lógicas de consulta (queries/APIs) que permiten verificar en tiempo real las licencias del personal desde el módulo de capacitación, validando así los campos de datos esenciales (ID, rango, especialidad técnica, vigencia de curso) a fin de asegurar la integridad de la información, lo cual garantiza que cada orden de trabajo sea asignada a personal competente y reduce el riesgo de error humano.

Finalmente, se ha desarrollado el sistema de registro de novedades de mantenimiento y su integración con el motor de IA, mediante el diseño de formularios web de captura de datos para el registro estandarizado de discrepancias o novedades de la línea de vuelo, la programación de la lógica de negocio que asocia de forma automática el reporte operativo con la consulta al motor de inteligencia artificial, y la ejecución de pruebas unitarias de almacenamiento y consistencia de datos, lo que garantiza que cada reporte genere un requerimiento logístico limpio hacia la base central y que todo el flujo de trabajo quede trazable desde el reporte inicial hasta la liberación de la aeronave.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar el sistema para la inclusión de otras aeronaves en la flota de la FAE, adaptando manuales técnicos y los modelos de inteligencia artificial a cada tipo de aeronave, y establecer un proceso de actualización continua de los manuales y de la base de datos para mantener la información vigente.

De igual manera, es sugerido refinar el modelo de inteligencia artificial mediante el entrenamiento con datos reales de mantenimiento históricos, esto con el fin de mejorar la precisión del diagnóstico y la generación de checklists, además de que se recomienda migrar la solución de las pruebas con VPN a una infraestructura en la nube más robusta, con protocolos de seguridad que puedan dar acceso remoto seguro y la integración con los sistemas institucionales de la FAE.

Por último, se recomienda capacitar al personal técnico y de supervisión en el uso del sistema, además de implementar un plan de mejora continua que se base en las métricas de rendimiento del sistema y en el feedback de usuarios.

Referencias

Carvalho, B. V. de, & Mello, C. H. P. (2012). Aplicação do método ágil scrum no desenvolvimento de produtos de software em uma pequena empresa de base tecnológica. *Gestão & Produção*, *19*(3), 557–573. https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000300009

Comanici, G., Bieber, E., Schaekermann, M., Pasupat, I., Sachdeva, N., Dhillon, I., Blistein, M., Ram, O., Zhang, D., & Rosen, E. (2025). Gemini 2.5: Pushing the Frontier with Advanced Reasoning, Multimodality, Long Context, and Next Generation Agentic Capabilities. *Google DeeepMind*.

Espinosa, L., Rebolledo, A., Irausquín, I., & Quiroga, A. (2012). Study of human reliability in aircraft maintenance. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, *35*(3), 270–278.

European Union Aviation Safety Agency. (2020). *Amendment of the Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Regulation (EU) No 1321/2014*. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/agency-decisions/ed-decision-2020002r

Federal Aviation Administration - FAA. (2023). *Aviation Maintenance Technician Handbook - General (30B)*. https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/amtg_handbook.pdf

Flores Cueva, B. D. (2017). *La Normativa internacional de calidad AS 9110 en los escuadrones de mantenimiento aeronáutico y su incidencia en la disponibilidad de aeronaves de la fuerza aérea ecuatoriana durante el periodo 2010 - 2014."* [Universidad Indoamérica]. https://hdl.handle.net/20.500.14809/666

Google Cloud. (2022). *Agent Platform de Gemini Enterprise*. Gemini Enterprise Agent Platform. https://docs.cloud.google.com/gemini-enterprise-agent-platform?hl=es-419

Google Developers. (2025a). *Descripción general de Google Apps Script*. Google Workspace. https://developers.google.com/apps-script/overview?hl=es-419

Google Developers. (2025b). *Quickstart: Generate text using Agent Platform*. Apps Script. Google for Developers. https://developers.google.com/apps-script/quickstart/vertex-ai?hl=es-419

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mcgraw-Hill.

Jo, B. (2026). A Compliance-Preserving Retrieval System for Aircraft MRO Task Search. *Proceedings of the 19th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (Volume 5: Industry Track)*, 317–329. https://doi.org/10.18653/v1/2026.eacl-industry.23

Kalari, S., Panchumarthi, A., Ashok, V., & Mukkamala, R. (2026). AeroAssist: A Prompt-Driven Multimodal AI Framework for Aircraft Maintenance. *2026 IEEE Aerospace Conference*, 1–12. https://doi.org/10.1109/AERO66936.2026.11519861

Naqvi, S. M. R., Ghufran, M., Meraghni, S., Varnier, C., Nicod, J.-M., & Zerhouni, N. (2022). Generating Semantic Matches Between Maintenance Work Orders for Diagnostic Decision Support. *Annual Conference of the PHM Society*, *14*(1). https://doi.org/10.36001/phmconf.2022.v14i1.3241

Neferu, M., Marian, C. V., & Mitrea, D. A. (2026). Vibe Coding: A New Paradigm in Software Development Assisted by Artificial Intelligence. *2026 18th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 1–8. https://doi.org/10.1109/ECAI69016.2026.11613779

NSF. (2026). *Sistemas de gestión de calidad AS9110 para MRO aeroespacial*. NSF. https://www.nsf.org/mx/es/sistemas-de-gesti%C3%B3n/gesti%C3%B3n-calidad/as9110

Reese, C., Xu, M., & Nicholson, S. (2026). Mitigating Aviation Maintenance Challenges: A Technical Evaluation of AI-Enabled Sustainment. *2026 IEEE Aerospace Conference*, 1–10. https://doi.org/10.1109/AERO66936.2026.11519873

Romesa B&TS. (2026). *Aeronáutica*. Romesa Business and Trading Solutions. https://romesabts.com/aeronautica/

Storey, M.-A., Hoda, R., Maciel Paz Milani, A., & Baldassarre, M. T. (2025). Guiding principles for mixed methods research in software engineering. *Empirical Software Engineering*, *30*(5), 138. https://doi.org/10.1007/s10664-025-10629-x

Apéndice