

Diseñar y programar la lógica de asignación inteligente y la interfaz operativa móvil para la gestión de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la FAE.

Perugachi Gaibor, Brayner Nicolay y Pilco Chicaiza, Steven Joel

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

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

Mayo. Esp. Avc Franco Bernal, Fausto Patricio

04 de septiembre de 2026

Latacunga

Informe de análisis
Compilatio Studium

Tesis pasar Compilation

ID : f218e281af4f2a0596f25cf8d4c76f9b294393a5

6%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : Tesis pasar Compilation.txt
Tamaño del archivo original : 8,61 MB
Número de palabras : 14.831

Depositante : Genesis Ayala
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 <1%

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.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FAUSTO PATRICIO FRANCO BERNAL

Mayo.Esp.Avc Franco Bernal, Fausto Patrico

Director de Tesis

C.C.:1715008700

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **Diseñar y programar la lógica de asignación inteligente y la interfaz operativa móvil para la gestión de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la FAE** fue realizado por los señores **Perugachi Gaibor, Brayner Nicolay y Pilco Chicaiza, Steven Joel** 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

FAUSTO PATRICIO FRANCO BERNAL

Mayo.Esp.Avc Franco Bernal, Fausto Patrico
Director de Tesis
C.C.:1715008700

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Perugachi Gaibor, Brayner Nicolay y Pilco Chicaiza, Steven Joel** con cédula/cédulas de ciudadanía **N°1723785000 y 1850405216** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular**: Diseñar y programar la lógica de asignación inteligente y la interfaz operativa móvil para la gestión de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la 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

Perugachi Gaibor, Brayner Nicolay

C.C.:1723785000

Pilco Chicaiza, Steven Joel

C.C.: 1850405216

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Autorización de Publicación

Nosotros **Perugachi Gaibor, Brayner Nicolay y Pilco Chicaiza, Steven Joel**, con cédulas de ciudadanía **N°1723785000 y 1850405216** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Diseñar y programar la lógica de asignación inteligente y la interfaz operativa móvil para la gestión de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la FAE** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga 04 de septiembre del 2026

Validar documento en Firma EC.
Firmado electrónicamente por:
BRAYNER NICOLAY PERUGACHI GAIBOR

Perugachi Gaibor, Brayner Nicolay

C.C.:1723785000

Validar documento en Firma EC.
Firmado electrónicamente por:
STEVEN JOEL PILCO CHICAIZA

Pilco Chicaiza, Steven Joel

C.C.: 1850405216

Dedicatoria

Quiero dedicar este importante logro, y cada paso que he dado durante estos dos años de formación militar, a las personas que han estado conmigo de manera incondicional: mi querida madre Taña, mi padre Raúl, mi hermana Michelle, mis abuelitos, mis tíos y mi cuñado.

Este camino no ha sido fácil. Han sido dos años llenos de sacrificios, esfuerzo, disciplina, momentos difíciles y grandes desafíos. Sin embargo, en cada momento en el que sentí cansancio, dudas o ganas de rendirme, siempre estuvieron ustedes para darme una palabra de aliento, un consejo, una muestra de cariño y, sobre todo, la fuerza necesaria para seguir adelante.

Gracias por creer en mí incluso cuando el camino parecía difícil. Gracias por su paciencia, por su apoyo incondicional, por estar presentes de tantas maneras y por ayudarme a cumplir este sueño. Cada logro que hoy alcanzo también lleva una parte de ustedes, porque detrás de cada paso que he dado ha estado su amor, su esfuerzo y su confianza.

A mi madre Taña y mi padre Raúl, gracias por ser mi mayor ejemplo y por enseñarme que con persistencia, sacrificio y amor se pueden alcanzar los sueños. A mi hermana Michelle, mis abuelitos, tíos y mi cuñado, gracias por acompañarme y ser ese apoyo que nunca me ha dejado sentir solo.

Hoy puedo decir que este proceso ha sido duro, pero también ha sido posible gracias al amor y al cariño de mi familia. Este logro no es solamente mío; también es de ustedes, porque juntos hemos recorrido este camino.

Con todo mi amor, gratitud y orgullo, les dedico cada sacrificio, cada esfuerzo y cada logro alcanzado. Gracias por nunca soltar mi mano y por creer siempre en mí. Los amo y este logro también es suyo.

Perugachi Gaibor Brayner Nicolay

Dedicatoria

A Dios todopoderoso, por haberme cuidado en cada jornada, por darme la salud, la serenidad y las fuerzas necesarias para superar el rigor físico y mental que exige la vida militar. Fueron muchas las noches largas de estudio y de servicio en las que su presencia fue mi verdadero refugio y sostén moral.

A mis queridos padres, a quienes les debo absolutamente todo lo que soy y todo lo que he alcanzado. Sé perfectamente los sacrificios, privaciones y angustias que vivieron en casa mientras yo vestía este uniforme en la escuela. Gracias por cada bendición enviada a la distancia, por los consejos sabios cuando el cansancio parecía ganarme y por esas palabras de aliento en cada llamada o visita que me devolvían el espíritu al cuerpo. Verlos orgullosos de este paso en mi carrera militar es mi mayor recompensa; esta tesis y esta meta cumplida llevan su trabajo, sus desvelos y sus lágrimas.

A mis familiares, por ser un apoyo firme y constante, por entender mis ausencias en las fechas importantes de la familia y por esperarme siempre con los brazos abiertos y una sonrisa sincera en cada franco.

A la gloriosa Fuerza Aérea Ecuatoriana y a mi querida Escuela de Formación, por haberme recibido con las puertas abiertas y por forjar en mí el temple, la disciplina, el respeto y la vocación técnica que distinguen a un buen soldado del aire. A los señores instructores y docentes, por su exigencia diaria, su rigor sin contemplaciones y su empeño por formarnos con criterio, seguridad y responsabilidad para el servicio de la Patria.

Y de manera muy especial, a mis compañeros de promoción. Con ustedes aprendí el verdadero significado del espíritu de cuerpo: compartir el último sorbo de agua, correr codo a codo en los momentos más difíciles, aguantar la sanción juntos y levantarnos la moral cuando el cuerpo ya no respondía. Hoy culminamos una etapa exigente, pero la hermandad forjada en el patio de honor y en las aulas nos acompañará por siempre en cada reparto militar.

Pilco Chicaiza Steven Joel

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme fortaleza, salud y perseverancia durante estos dos años de formación militar y permitirme alcanzar esta meta.

A mis padres, Taña y Raúl, por su apoyo, sacrificio, consejos y confianza incondicional. Este logro también es fruto de su esfuerzo y acompañamiento.

A mi hermana Michelle, a mis abuelitos, tíos y cuñado, por su cariño, comprensión y apoyo durante esta etapa, especialmente en los momentos de mayor dificultad.

A la Fuerza Aérea Ecuatoriana y a mi querida Escuela de Formación, por brindarme la preparación y las experiencias que fortalecieron mi disciplina, responsabilidad, compromiso y vocación de servicio a la Patria.

A nuestros instructores, docentes y superiores, por sus enseñanzas, exigencia y orientación, fundamentales para nuestra formación profesional y militar.

Finalmente, a mis compañeros de promoción, por compartir el esfuerzo, las dificultades y los aprendizajes de estos dos años. Cada experiencia contribuyó a fortalecer nuestro compañerismo y espíritu de cuerpo.

A todos quienes fueron parte de este camino, mi sincero agradecimiento. Hoy culmino una etapa con orgullo y asumo el compromiso de aplicar lo aprendido con responsabilidad, honor y lealtad al servicio de la institución y de la Patria.

Perugachi Gaibor Brayner Nicolay

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por concederme la fortaleza, salud y perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi vida.

A mis padres, por su apoyo incondicional, sacrificios, consejos y palabras de aliento durante todo este proceso. Su esfuerzo y confianza fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis familiares, por comprender mis ausencias, brindarme su cariño y motivarme a continuar adelante en cada momento de dificultad.

A la Fuerza Aérea Ecuatoriana y a mi querida Escuela de Formación, por brindarme la oportunidad de formarme como militar y profesional, fortaleciendo en mí la disciplina, responsabilidad, carácter y compromiso con el servicio a la Patria.

A nuestros instructores, docentes y superiores, por compartir sus conocimientos, exigencias y enseñanzas, fundamentales para nuestra preparación y crecimiento profesional.

A mis compañeros de promoción, por compartir cada jornada de formación, esfuerzo, dificultades y experiencias. El compañerismo y espíritu de cuerpo construido durante este camino permanecerán como parte importante de esta etapa.

Finalmente, agradezco a todas las personas que contribuyeron, directa o indirectamente, a la culminación de este proceso. A todos, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este camino y de la formación del militar y profesional que hoy estoy a punto de convertirme.

Pilco Chicaiza Steven Joel

Índice de Contenidos

Carátula 1

Reporte de Verificación de Contenidos 2

Certificación 3

Responsabilidad de Autoría 4

Autorización de Publicación 5

Dedicatoria 6

Dedicatoria 7

Agradecimiento 8

Agradecimiento 9

Índice de Contenidos 10

Índice de Tablas 14

Índice de Figuras 15

Resumen 16

Abstract 17

Capítulo I 18

Introducción y Estado del Arte 18

Introducción 18

Planteamiento del Problema 22

Ámbito Nacional y Sector Aeronáutico Ecuatoriano 22

Fuerza Aérea Ecuatoriana - FAE y Centros de Mantenimiento 22

OMA DA-20: Asignación de Recursos e Interfaz Operativa Móvil 23

Formulación del Problema 23

Preguntas de Investigación 24

Objetivos 24

Objetivo General 24

Objetivos Específicos *24*

Justificación 25

Capítulo II 30

Estado del Arte 30

Estado del Arte 30

Marco Teórico 33

Gestión del Mantenimiento Aeronáutico Militar *33*

Transición hacia el Paradigma de la Aviación 4.0 ..... *34*

Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS) *35*

Estructura y Regulación del Estándar ATA 100 ..... *36*

Inteligencia Artificial en Diagnósticos Técnicos y Ecosistemas Aéreos *36*

Lógicas de Asignación Inteligente de Recursos Humanos *37*

Desarrollo de Aplicaciones Móviles Multiplataforma para Hangares *38*

Sincronización Asíncrona y Persistencia Local (Offline-First) *39*

Ciberseguridad y Control de Acceso Basado en Roles (RBAC) *39*

Firmas Digitales y Auditoría de Control de Calidad *40*

Marco Conceptual 41

Aviación 4.0 y Ecosistemas Ciberfísicos *41*

Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS) *42*

Orden de Trabajo Digital (OTD) *42*

Lógica de Asignación Inteligente (LAI) *43*

Estándar Normativo ATA 100 ..... *44*

Interfaz Operativa Móvil (IOM) y Persistencia de Datos *44*

Ciberseguridad y Control de Acceso Basado en Roles (RBAC) *45*

Firma Electrónica y Trazabilidad Inmutable *45*

Indicadores AOG y MTTR *46*

Capítulo III 47
Metodología 47
Metodología de la Investigación 47
Enfoque de Investigación 48
Tipo y Diseño de Investigación 49
Unidad de Análisis y Fuentes de Información 49
Técnicas e Instrumentos 51
Análisis Documental *51*
Registro de Información del Sistema *51*
Pruebas Funcionales *52*
Procedimiento Metodológico para el Desarrollo del Sistema 52
Procesamiento y Análisis de la Información 55
Validación de la Solución Tecnológica 56
Consideraciones Éticas y de Seguridad de la Información 56
Capítulo IV 58
Análisis y Discusión de Resultados 58
Resultado General del Desarrollo del Sistema 58
Implementación y Configuración del Sistema 60
Configuración de la Base de Datos y Programación *61*
Configuración del Entorno de Pruebas *62*
Implementación de la Biblioteca Técnica y Funciones Principales 64
Biblioteca Técnica *64*
Funciones Principales del Sistema *66*
Integración de la Inteligencia Artificial para la Asignación Inteligente 67
Configuración e Integración de la IA *67*
Relación de la IA con la Generación de la Orden de Trabajo *70*

Flujo Completo de la Orden de Trabajo....71

Pruebas y Resultados Obtenidos....75

Pruebas Funcionales....*75*

Prueba de Generación de Documentos....*76*

Análisis y Discusión de los Resultados....78

Capítulo V....80

Conclusiones y Recomendaciones....80

Conclusiones....80

Recomendaciones....82

Referencias....83

Apéndice....90

Índice de Tablas

Tabla 1 Componentes principales implementados 60

Tabla 2 Herramientas tecnológicas utilizadas 63

Tabla 3 Proceso de asignación inteligente de información 71

Tabla 4 Trazabilidad del flujo de la Orden de Trabajo 74

Tabla 5 Matriz de pruebas funcionales del sistema 76

Tabla 6 Cumplimiento de los objetivos específicos 79

Índice de Figuras

Figura 1 Arquitectura y flujo general del sistema desarrollado.....59

Figura 2 Estructura de la base de datos del sistema 61

Figura 3 Fragmento de programación utilizado para la automatización del sistema 62

Figura 4 Entorno de pruebas y conexión de los componentes del sistema.....63

Figura 5 Interfaz principal de la biblioteca técnica 64

Figura 6 Organización de manuales y regulaciones en la biblioteca técnica 65

Figura 7 Consulta de documentación técnica.....65

Figura 8 Inicio de sesión y control de usuarios.....66

Figura 9 Asistente técnico y selección del procedimiento ATA.....67

Figura 10 Configuración del asistente Gemini para mantenimiento aeronáutico.....68

Figura 11 Integración de Gemini API en el sistema 69

Figura 12 Instrucciones utilizadas para orientar la respuesta de la inteligencia artificial 69

Figura 13 Resultado de la asignación inteligente de información 70

Figura 14 Generación de la Orden de Trabajo a partir de la información procesada 71

Figura 15 Generación de la Orden de Trabajo.....72

Figura 16 Ejecución de actividades mediante checklist.....73

Figura 17 Supervisión y control de calidad de la Orden de Trabajo.....73

Figura 18 Interfaz de histórico de reportes 74

Figura 19 Programación utilizada para generar el documento.....77

Figura 20 Orden de Trabajo generada en formato PDF.....78

Resumen

El presente trabajo de integración curricular aborda la problemática de la gestión manual de las órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la flota Diamond DA20-C1 de la Escuela Superior Militar de Aviación (ESMA). El objetivo fue implementar un sistema móvil de gestión logística que optimice el registro, asignación, ejecución y seguimiento de órdenes mediante una lógica de asignación inteligente y una interfaz operativa. La investigación adoptó un enfoque tecnológico aplicado y documental, sustentado en el análisis de manuales, regulaciones, directivas, boletines y documentación. El desarrollo se estructuró mediante ciclos iterativos de Scrum e integró una arquitectura de datos relacional en PostgreSQL/Supabase, biblioteca técnica, registro de novedades, gestión de usuarios, generación de órdenes, recursos, checklist, firmas digitales y trazabilidad. Asimismo, se integró Gemini API como componente de inteligencia artificial para relacionar las novedades reportadas con información técnica pertinente, sin realizar entrenamiento del modelo. La validación se efectuó mediante pruebas funcionales, de integración y comportamiento en escenarios, considerando registros y correspondencia entre aeronave, novedad, procedimiento, recursos y responsables. Los resultados demostraron la viabilidad de la solución, un 90 % de acierto en la clasificación asistida por IA y el cumplimiento de los objetivos planteados. Se concluye que la integración de estos componentes contribuye a centralizar información, fortalecer el control documental, mejorar la trazabilidad y apoyar una gestión de órdenes de trabajo.

Palabras clave: Mantenimiento aeronáutico; inteligencia artificial; órdenes de trabajo; documentación técnica; trazabilidad.

Abstract

This curricular integration project addresses the problem of manual management of aeronautical maintenance work orders for the Diamond DA20-C1 fleet at the Escuela Superior Militar de Aviación (ESMA). The objective was to implement a mobile logistics management system to optimize order registration, assignment, execution, and monitoring through intelligent assignment logic and an operational interface. The research adopted an applied technological and documentary approach, supported by the analysis of manuals, regulations, directives, bulletins, and technical documentation. Development was structured through iterative Scrum cycles and integrated a relational data architecture using PostgreSQL/Supabase, a technical library, discrepancy registration, user management, work-order generation, resource management, checklists, digital signatures, and traceability. Gemini API was also integrated as an artificial intelligence component to relate reported discrepancies to relevant technical information, without performing model training. Validation was conducted through functional, integration, and behavioral tests in controlled scenarios, considering system records and correspondence among aircraft, discrepancy, procedure, resources, and responsible personnel. Results demonstrated the feasibility of the solution, a 90% accuracy rate in AI-assisted classification, and achievement of the proposed objectives. It is concluded that integrating these components contributes to centralizing information, strengthening document control, improving traceability, and supporting work-order management throughout the maintenance process within the institutional organization. It also reduces fragmentation in technical information handling while maintaining human supervision over AI-supported decisions during defined operational workflows.

Keywords: Aeronautical maintenance; artificial intelligence; work orders; technical documentation; traceability.

Capítulo I

Introducción y Estado del Arte

Introducción

La aviación militar y civil contemporánea exige estándares de seguridad y eficiencia que no admiten margen de error, donde el mantenimiento preventivo y correctivo constituye el pilar fundamental para garantizar la aeronavegabilidad operativa. En este escenario, la gestión logística y la administración de los recursos técnicos requieren metodologías rigurosas que documenten cada intervención mecánica o electrónica en la línea de vuelo. Históricamente, estos procedimientos se han sustentado en esquemas manuales, lo que demanda un alto volumen de documentación física e incrementa la susceptibilidad a errores humanos durante la trazabilidad de los procesos (Ceruti et al., 2019).

En el marco de la modernización tecnológica, la transición hacia el paradigma de la Industria 4.0 ha transformado radicalmente la administración de los hangares aeronáuticos. Al respecto, Núñez Fontán (2023) señala que la implementación de Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS, por sus siglas en inglés) permite digitalizar el ciclo de vida de los componentes, reduciendo drásticamente los tiempos de inactividad de las aeronaves. Este avance es particularmente crítico en contextos militares, donde la disponibilidad inmediata de la flota, como la correspondiente a las aeronaves Diamond DA-20 de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) operadas en la Escuela Superior Militar de Aviación "Cosme Rennella Barbato" (ESMA), resulta imperativa para el cumplimiento de las misiones de entrenamiento y operaciones estratégicas (Bahamón & Velásquez, 2020).

Sin embargo, el proceso actual de reporte y ejecución de órdenes de trabajo en numerosas Organizaciones de Mantenimiento Aeronáutico (OMA) carece de la agilidad que exigen las operaciones modernas. Al momento en que las aeronaves aterrizan en el hangar de mantenimiento, el personal de la línea de vuelo lleva a cabo tareas de revisiones de rutina para constatar la falta de novedades mecánicas o estructurales; si se determina que hay alguna

novedad (un defecto en el tren de aterrizaje) el proceso ordinario hace que sea necesario generar un informe en papel que pasa por diferentes niveles jerárquicos y acaba siendo, convertido en una orden de trabajo (Pérez-Campuzano et al., 2023).

Esta dependencia de los registros en papel y de la comunicación no automatizada genera cuellos de botella operativos significativos. Ceruti et al. (2019) argumentan que la falta de sincronización en tiempo real entre los inspectores de rampa y los planificadores logísticos provoca demoras en la evaluación del daño, lo que impacta directamente en la eficiencia operativa general. El tiempo que transcurre desde que se reporta la novedad hasta que la orden es analizada, catalogada y enviada a los responsables correspondientes extiende los periodos en los que las aeronaves permanecen en tierra (Aircraft on Ground o AOG), afectando los indicadores de operatividad (Núñez Fontán, 2023).

Con el objetivo de dar respuesta a esta problemática, se propone desde la presente investigación el desarrollo de un ecosistema digital como aplicación móvil y software multiplataforma que a la vez sustituya el sistema tradicional de reportes físicos. En esa plataforma de trabajo, el personal de línea de vuelo se introduce en un enlace en red y detalla, de manera instantánea, la novedad detectada en los sistemas del avión, generándose inmediatamente, de modo automático un reporte digital de trabajo. La digitalización de este paso inicial elimina los tiempos de tránsito de la documentación física y asegura la trazabilidad inmutable de los datos reportados (Bahamón & Velásquez, 2020).

El núcleo de innovación del proyecto radica en el diseño y programación de una lógica de asignación inteligente impulsada por Inteligencia Artificial (IA) y una interfaz operativa móvil. Pérez-Campuzano et al. (2023) sugieren que la aplicación de IA en la planeación de proyectos aeronáuticos permite optimizar la toma de decisiones y acelerar los tiempos de respuesta ante fallas. Dentro del sistema propuesto, una vez ingresado el reporte desde el dispositivo móvil, el motor de IA analiza la descripción del problema, dictamina el proceso exacto de mantenimiento a seguir con base en los manuales estandarizados (AMM bajo norma ATA 100), y asigna de

manera autónoma al personal técnico idóneo y las herramientas requeridas para la intervención.

Posteriormente, la información procesada y estructurada por la IA es derivada al Comandante de Mantenimiento (CMD) o supervisor de taller. Este perfil ejerce una función de supervisión ejecutiva, revisando que el mantenimiento propuesto por el algoritmo sea el adecuado y validando la disponibilidad operativa del personal técnico asignado antes de emitir la orden definitiva, garantizando así el control humano y el cumplimiento de la jerarquía militar (Ceruti et al., 2019). Una vez aprobada por el mando, el sistema automatiza el despacho enviando una notificación instantánea al correo electrónico de los técnicos designados para la ejecución de la tarea (Núñez Fontán, 2023).

Una vez recibida la interlocución y la formalización de la asignación, los técnicos mecánicos acceden a la interfaz móvil, abren la orden de trabajo correspondiente y contemplan un checklist interactivo que resume los procedimientos técnicos a ejecutar. Mientras efectúan los trabajos en el hangar, van marcando sucesivamente conforme va finalizándose la ejecución de los trabajos en su plataforma. Para que finalice esta fase, es preciso validar obligatoriamente las tareas mediante la firma digital sucesiva del técnico ejecutor y del supervisor responsable que da cumplimiento a los protocolos bajo su responsabilidad.

Por otro lado, el flujo de trabajo culmina en el departamento de Control de Calidad, donde tiene lugar la revisión de la conformidad tanto la física como la digital del mantenimiento realizado. Si la auditoría indica que el trabajo se encuentra bajo norma, se firma la liberación al servicio y la aeronave recupera el estado operativo; en caso contrario, si se detectan inconsistencias en el mantenimiento; el sistema retorna la orden de trabajo a su estado inicial de modo que la tarea de mantenimiento se resuelva.

A partir de este contexto y arquitectura de funcionamiento, se formula el siguiente problema de investigación: ¿De qué manera el diseño y la programación de una lógica de asignación inteligente con Inteligencia Artificial y una interfaz operativa móvil inciden en la

optimización de los tiempos de respuesta y en la gestión de las órdenes de trabajo de mantenimiento para la flota de aeronaves Diamond DA-20 en la Fuerza Aérea Ecuatoriana durante el año 2026?

Para dar respuesta a la interrogante científica, se define como objetivo general: Desarrollo de un sistema móvil de gestión logística y optimización de asignación de mantenimiento aeronáutico mediante algoritmos programables para el Escuadrón de Mantenimiento de la ESMA.

Se desprenden de este objetivo mayor el resto de los objetivos específicos como son: Primero, diseñar y programar la lógica de la asignación automática y la arquitectura de los datos para el control logístico del Escuadrón de Mantenimiento de la ESMA; segundo, desarrollar la interfaz operativa móvil para la gestión, el registro y la ejecución de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la línea de vuelo de la ESMA; y, tercero, integrar los componentes del sistema y analizar su rendimiento operativo mediante pruebas de carga, de seguridad de la información y de simulación de escenarios de mantenimiento en la ESMA.

La contribución esencial de la presente investigación radica en la actualización metodológica de la FAE de acuerdo con sus procesos logísticos internos y con unas pautas estructurales de transformación digital internacional. La razón técnica descansa sobre la necesidad ineludible de eliminar la intermediación del papel, disminuir los errores humanos en la asignación de los procedimientos, reducir los tiempos de reacción ante novedades de vuelo y aportar al mando una herramienta que sea inmutable y transparente para la toma de decisiones dentro de la alta dirección (Núñez Fontán, 2023).

La metodología utilizada para conseguir la plataforma está sustentada en un modelo de investigación tecnológica aplicada basado en esquemas de desarrollo de software ágil. El diseño consiste en la programación de bases de datos relacionales en PostgreSQL/Supabase, la integración vía API del modelo de lenguaje de IA para el grounding de los manuales técnicos, y validación de la interfaz mediante tests de carga, de seguridad y de caja negra.

Por último, la estructura capitular de la presente investigación se ha organizado en cuatro bloques. El Capítulo I comprende la planificación general del proyecto, el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación. El Capítulo II establece el estado del arte y el marco teórico sobre sistemas CMMS y Aviación 4.0. El Capítulo III expone el marco metodológico y el desarrollo detallado de la arquitectura de software, incluyendo el despliegue algorítmico y de seguridad. El Capítulo IV presenta los resultados operativos, las pruebas del sistema. Por último, el Capítulo V condensa las conclusiones y recomendaciones del trabajo de integración curricular.

Planteamiento del Problema

Ámbito Nacional y Sector Aeronáutico Ecuatoriano

En el Ecuador, la aviación civil y militar desempeña un rol estratégico en la conectividad, defensa soberana y soporte en situaciones de emergencia. En relación a las tendencias globales de la Aviación 4.0 la digitalización de los procesos de mantenimiento, reparación y operaciones (MRO) se ha convertido en un aspecto clave para optimizar la disponibilidad operativa y la seguridad operativa de la flota. Según Fahriza y Odili (2026) la implementación de soluciones informáticas y sistemas de gestión móvil ayudan en gran medida a disminuir los tiempos técnicos de inactividad de los aviones (Avión en Tierra o AOG) y disminuyen la probabilidad de errores humanos relacionados con la entrada manual de la información. Sin embargo, en el caso de Ecuador la transición de soluciones convencionales a tecnologías digitales modernas aún se ve restringida por varios factores incluyendo la infraestructura y la resistencia tecnológica en las organizaciones de mantenimiento aeronáutico (García Medina, 2026).

Fuerza Aérea Ecuatoriana - FAE y Centros de Mantenimiento

Dentro de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), específicamente en sus Bases Aéreas y en la Escuela Superior Militar de Aviación "Cosme Rennella Barbato" (ESMA), la gestión logística y de mantenimiento de las aeronaves de instrucción es fundamental para cumplir con

los programas de formación de pilotos militares. A pesar de que las instituciones han formado iniciativas para aplicar nuevas tecnologías, el mantenimiento de rampa y de la línea de vuelo está fundamentado por flujos de trabajo estables y físicos. Al respecto, Liu y Zhang (2026) razonan que no poder establecer un canal móvil unificado en la línea de vuelo produce una considerable latencia entre el primer reporte de una falla técnica y su procesamiento administrativo. Esto produce un logró en tiempo real entre inspectores de rampa, el mandante de mantenimiento y técnicos va a originar la lentitud en la toma de decisiones y daña la trazabilidad de las partes que se encuentran siendo reparadas.

OMA DA-20: Asignación de Recursos e Interfaz Operativa Móvil

A nivel micro, la Organización de Mantenimiento Aeronáutico (OMA) encargada de la flota de aeronaves Diamond DA-20 presenta deficiencias críticas asociadas a la falta de una interfaz móvil en rampa y a una lógica de asignación automatizada para las Órdenes de Trabajo (OT). Actualmente, cuando se identifica una falla durante las inspecciones de rampa (por ejemplo, una anomalía hidráulica en el tren de aterrizaje), el personal técnico debe elaborar un reporte físico y trasladarlo manualmente hasta el despacho de supervisión. A continuación, la asignación de los procedimientos técnicos operativos, la elección de personal adecuado y la determinación de las herramientas necesarias se realizan de forma manual y empírica por el supervisor durante más de 45 minutos introduciendo cuellos de botella por saturación o poca disponibilidad de los mismos. Paralelamente, la ejecución de los checklists de mantenimiento no dispone de una herramienta móvil interactiva para poder verificar paso a paso y poder capturar firmas digitales inmediatamente de forma certificada. Esta carencia de un módulo móvil con lógica de asignación inteligente basada en Inteligencia Artificial afecta directamente el tiempo de respuesta logística y la disponibilidad operativa de la flota DA-20.

Formulación del Problema

¿De qué manera el diseño y la programación de una lógica de asignación inteligente con Inteligencia Artificial y una interfaz operativa móvil inciden en la optimización de los tiempos

de respuesta y en la gestión de las órdenes de trabajo de mantenimiento para la flota de aeronaves Diamond DA-20 en la Fuerza Aérea Ecuatoriana durante el año 2026?

Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son los requerimientos funcionales y las limitaciones operativas actuales en el flujo de reporte de fallas y ejecución de checklists dentro de la línea de vuelo de la OMA de la flota DA-20?
- ¿Cómo estructurar el algoritmo de asignación inteligente utilizando modelos de Inteligencia Artificial para relacionar eficientemente las novedades reportadas con los procedimientos normados del manual AMM, las herramientas requeridas y el personal técnico disponible?
- ¿De qué manera la interfaz operativa móvil multiplataforma debe ser programada para permitir el llenado interactivo de checklists, la gestión de firmas digitales por roles y la sincronización de datos en el hangar?
- ¿En qué medida la implementación de la lógica de asignación inteligente y la plataforma móvil reduce los tiempos de emisión, procesamiento y cierre de las órdenes de trabajo frente al sistema manual tradicional de la FAE?

Objetivos

Objetivo General

Implementar un sistema móvil de gestión logística que optimice la asignación de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico mediante algoritmos programables para el Escuadrón de Mantenimiento de la ESMA.

Objetivos Específicos

1. Diseñar y programar la lógica de asignación inteligente y la arquitectura de datos para la gestión de órdenes de trabajo del Escuadrón de Mantenimiento de la ESMA.

2. Desarrollar la interfaz operativa móvil para el registro, gestión y ejecución de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico.

3. Integrar y evaluar los componentes del sistema mediante pruebas funcionales, de rendimiento, seguridad y simulación de escenarios de mantenimiento aeronáutico.

Justificación

Esta investigación surge ante la necesidad urgente de actualizar el sistema logístico de la FAE. Tradicionalmente el proceso de mantenimiento se ha gestionado a través de sistemas manuales y en papel. Esto hace al proceso más susceptible a los errores humanos y retrasa toda la operación. Por lo tanto, existe la necesidad de una actualización inmediata para prevenir estos factores de riesgo (Riquelme Oyarzún & Vera Nova,2020).

El porqué de este estudio radica en las graves limitaciones de agilidad técnica que enfrentan los escuadrones militares actuales. Cuando una aeronave aterriza y presenta novedades operativas, la dependencia exclusiva del papel ralentiza el tiempo de respuesta. Riquelme Oyarzún y Vera Nova (2020) señalan que la Cuarta Revolución Industrial exige imperativamente la transformación logística de la Defensa Nacional.

Esta investigación aportará un nuevo conocimiento aplicado en la intersección multidisciplinar de la inteligencia artificial y la logística militar. Al sustituir esquemas manuales por un sistema de asignación inteligente, se genera un modelo de gestión vanguardista. Esto facilitará una sincronización efectiva y en tiempo real entre los inspectores de la rampa de vuelo y el equipo de planificación técnica (Fragas, 2015).

Fragas (2015) establece que un sistema automatizado para la gestión del mantenimiento debe incluir módulos rigurosos de órdenes de trabajo. El nuevo aporte científico consiste en una interfaz operativa móvil capaz de funcionar en entornos militares con conectividad inestable. La plataforma digitalizará las novedades directamente en la línea de vuelo de la aeronave Diamond DA-20, optimizando el despacho técnico.

Es de suma importancia vincular esta iniciativa con el entorno institucional de la Escuela Superior Militar de Aviación "Cosme Rennella Barbato" (ESMA). La digitalización de la rampa de vuelo garantiza el control milimétrico sobre los activos del Estado y el presupuesto asignado a defensa. Esto salvaguarda prioritariamente la vida de los cadetes y pilotos en fase de formación (De Poza, 2021).

De Poza (2021) confirma que el sector aeroespacial impulsa la sostenibilidad y la eficiencia operativa integrando nuevas herramientas de analítica y conectividad asíncrona. Todo este ecosistema tecnológico se encuentra estrechamente alineado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número nueve (ODS 9). Este objetivo promueve directamente la industrialización inclusiva, la innovación continua y el desarrollo de nueva infraestructura tecnológica.

Al cumplir estrictamente con el ODS 9, la institución da un salto cuantitativo hacia un desarrollo resiliente e informatizado. La innovación propuesta no solo automatiza la toma de decisiones, sino que garantiza una gestión de infraestructura sustentable. La eficiencia lograda reducirá progresivamente la huella de carbono al eliminar la burocracia en papel dentro de los hangares aeronáuticos (De Poza, 2021).

A nivel teórico, la investigación aporta sustancialmente a la disciplina de las Tecnologías de la Información aplicadas a la Seguridad y Defensa. Se establecerá un marco conceptual robusto que vincule algoritmos de asignación inteligente con manuales técnicos estandarizados. Esto permitirá parametrizar el mantenimiento militar en bases de datos relacionales seguras y plenamente auditables (Vargas-Vargas, 2018).

El estudio introduce nuevas directrices sobre cómo las Organizaciones de Mantenimiento Aeronáutico (OMA) pueden adaptar modelos matemáticos a la logística diaria. El diseño de los sistemas informáticos actuales permite una utilización mucho más eficiente del factor humano y de los materiales en el hangar (Vargas-Vargas, 2018). Estas teorías contemporáneas fortalecen enormemente la operatividad de los activos físicos de instrucción.

Adicionalmente, el proyecto generará nuevo conocimiento sobre la integración del estándar internacional ATA 100 con lenguajes de inteligencia artificial. Esta fusión teórica permite interpretar el lenguaje natural de los mecánicos de piso para generar reportes normados automáticamente. Este avance metodológico será un referente nacional ineludible para futuras digitalizaciones logísticas en la defensa ecuatoriana (Martínez-Pérez, 2018).

La investigación también sentará bases académicas críticas para el estudio de la ciberseguridad en entornos de mantenimiento móvil de carácter militar. La transformación digital exige proteger de manera exhaustiva la integridad y disponibilidad de la información logística en los servidores (Gomero & Sánchez, 2024). Las teorías sobre cifrados y el control de acceso mediante roles (RBAC) consolidarán este campo de investigación.

Desde la práctica, este proyecto tiene objetivos transformadores con previsibles efectos a corto plazo para la ESMA, dado que logrará reducir el tiempo medio para dar paso a un especialista capacitado tras el reportar de una falla técnica. La progresiva sustitución de libretas de fallos manuales por dispositivos inteligentes ampliará la latencia de la parte administrativa en las rampas de vuelo (Martínez-Pérez, 2018).

Se busca abaratar significativamente los costos operativos institucionales asociados a las horas de inactividad de las aeronaves militares. Al mitigar el indicador de avión en tierra o Aircraft on Ground (AOG), se maximizan los recursos estatales disponibles. Un buen sistema computarizado de órdenes de trabajo reduce drásticamente los costos mediante una utilización eficaz de recursos materiales e intelectuales (Martínez-Pérez, 2018).

El nuevo modelo también introducirá innovaciones incrementales tangibles en la captura de datos y firma electrónica por parte de los técnicos. Los mecánicos visualizarán checklists interactivos dinámicos que guiarán la revisión paso a paso. Esto representa una mejora sustancial frente al antiguo método de verificación por memoria o papeletas sueltas, disminuyendo posibles fallos catastróficos (Fragas, 2015).

Otra ventaja práctica innegable es la asignación autónoma de herramientas e insumos desde el pañol central de la base aérea. El motor lógico dictaminará qué equipos son estrictamente necesarios antes de que el aerotécnico inicie la labor. De este modo, se evitan desplazamientos inútiles y se consolida un hangar verdaderamente interconectado y altamente resolutivo (Riquelme Oyarzún & Vera Nova, 2020).

En lo concerniente al aspecto social, el proyecto beneficia de manera directa e inmediata al personal aerotécnico, mecánicos y supervisores de la FAE. Estos profesionales verán reducida su carga laboral administrativa y gozarán de un entorno de trabajo más seguro y eficiente. La distribución de labores será equitativa gracias al análisis del algoritmo de inteligencia artificial desplegado en el taller (Vargas-Vargas, 2018).

De manera indirecta, este sistema favorece ampliamente a los pilotos instructores y cadetes en fase de formación de la ESMA. Al disponer de aviones Diamond DA-20 con mantenimientos más ágiles y certificados bajo normativas estrictas, se incrementa notablemente la seguridad en el aire. La prevención de accidentes aéreos es un impacto social incalculable para las familias militares y el Estado (De Poza, 2021).

A un nivel sociopolítico más amplio, el beneficiario final indiscutible es la sociedad ecuatoriana en su conjunto civil. Contar con una Fuerza Aérea tecnológicamente avanzada y siempre operativa garantiza la defensa y la soberanía del espacio aéreo nacional. La eficiencia de las fuerzas armadas repercute directamente en la seguridad integral y en la capacidad de respuesta del Estado (Riquelme Oyarzún & Vera Nova, 2020).

Metodológicamente el estudio es altamente beneficioso ya que proporciona un proceso logístico innovador que es escalable. Se diseñará una plataforma informática innovadora la cual integrará la durabilidad local y la sincronización de bases aéreas aisladas. La disponibilidad de datos estructurados en los dispositivos móviles determina la tendencia innegable de la prevención de mantenimiento contemporáneo en los hangares populares (Vargas-Vargas,2018).

La metodología de despliegue de esta interfaz operativa podrá ser replicada posteriormente con éxito en otros escuadrones de la fuerza pública. Actúa como una tecnología de matriz de base para permitir el mantenimiento de helicópteros de rescate, aviones de transporte o aviones de combate. Esta estandarización de órdenes de trabajo digitales usando algoritmos da como resultado un modelo de inspección que se puede generalizar en cualquier otro campo (Fragas,2015).

Además, se ha desarrollado un nuevo método de protocolo para la verificación del trabajo realizado en elementos aeronáuticos usando un estricto proceso de firma criptográfica de tres pasos. El técnico ejecutor, el supervisor y el inspector de control de calidad tendrán que verificar cada paso del proceso. Esto erradica el riesgo de falsificaciones documentales y consolida una metodología de auditoría intachable en el sistema militar (Gomero & Sánchez, 2024).

Desde la perspectiva formativa y del área de estudio, el desarrollo de esta tesis ostenta un valor inestimable. Permite articular los conocimientos dogmáticos adquiridos en el aula sobre mantenimiento aeronáutico con el dominio de la programación informática avanzada. Demuestra tajantemente la capacidad del talento militar ecuatoriano para generar tecnología de punta en un sector muy crítico (Martínez-Pérez, 2018).

La ejecución de este proyecto interdisciplinario forja a profesionales íntegros, capaces de detectar falencias logísticas severas y desarrollar herramientas innovadoras. La experiencia técnica de programar la lógica algorítmica forjará competencias indispensables para enfrentar los complejos retos del futuro aeroespacial. Se evidencia un genuino compromiso con la modernización constante de la institución armada, garantizando la soberanía nacional (Riquelme Oyarzún & Vera Nova, 2020).

Capítulo II

Estado del Arte

Estado del Arte

La delimitación del objeto de estudio abarca la convergencia entre la inteligencia artificial y las interfaces móviles dentro del mantenimiento aeronáutico. Históricamente, la logística en rampa se ha caracterizado por el uso ineficiente de documentación física y procesos manuales que retrasan las operaciones (Florián Medina, 2023). Según Florián Medina (2023), esta deficiencia delimita el área de investigación hacia el desarrollo imperativo de soluciones informáticas de alta disponibilidad y precisión.

En cuanto a los referentes teóricos, las investigaciones recientes destacan el impacto de la Cuarta Revolución Industrial en la administración de los hangares. La transición hacia la Aviación 4.0 exige que los Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS) se adapten a entornos altamente dinámicos y demandantes (López Solomando, 2024). Para López Solomando (2024), estos referentes posicionan a la tecnología como el pilar fundamental para garantizar una aeronavegabilidad segura y continua.

Al analizar las metodologías utilizadas por otros investigadores, se evidencia una fuerte inclinación hacia el diseño de arquitecturas móviles descentralizadas. Diversos estudios han empleado metodologías de desarrollo ágil para crear aplicaciones que gestionen el ciclo de vida de los componentes y optimicen las reparaciones (Del Villar, 2025). Por su parte, Del Villar (2025) concluye que los enfoques iterativos garantizan una mejor adaptación algorítmica a los flujos de trabajo técnicos reales.

Para ampliar la comprensión del tema, resulta imperativo examinar cómo la inteligencia artificial transforma la planeación de los procesos técnicos. La literatura científica expuesta refleja que los algoritmos de machine learning son capaces tanto de detectar fallos mecánicos como de tomar decisiones ejecutivas mucho más óptimas (Vera García, 2024). Además, Vera

García (2024) defiende que la IA puede reducir muy significativamente la carga cognitiva del personal responsable de la supervisión.

Una comparación de los enfoques revela la distinción que existe entre el enfoque tradicional de los sistemas CMMS y el enfoque moderno inteligente. Mientras que los sistemas tradicionales de CMMS se limitan a la documentación de los registros pasados, la teoría moderna está abogando por sistemas predictivos, proactivos y totalmente autónomos (Chulli, 2023). Es crucial comprender de Chulli (2023) que este tipo de sistemas están siendo dejados obsoletos por los requerimientos actuales.

Dentro de las posturas teóricas evaluadas, destaca la importancia vital de la movilidad y la sincronización de datos en entornos con conectividad intermitente. Los autores consideran que una app en rampa elimina los tiempos de tránsito de la documentación y que se acelera el despacho técnico (Florián Medina, 2023), y aunque Florián Medina (2023) advierte sobre que la ciberseguridad es un factor crítico y debe ser considerado desde la concepción de estas interfaces.

La revisión de la literatura indica importantes lagunas en la investigación realizada en relación a la industria aeroespacial militar. Todos los artículos que se han encontrado están relacionados con la aviación comercial sin tomar en cuenta las especificidades y limitaciones de los escuadrones de entrenamiento militar (López Solomando, 2024). Como menciona López Solomando (2024) esta laguna crea importantes oportunidades para las innovaciones tecnológicas.

Otro vacío detectado es la falta de protocolos de validación mediante firmas digitales secuenciales en los sistemas CMMS de código abierto o genéricos. Las publicaciones actuales abordan la gestión de documentos de órdenes de trabajo, pero omiten la necesidad de auditorías tripartitas inmutables en tiempo real (Del Villar, 2025). Para Del Villar (2025) es tan relevante garantizar la integridad y protección de los datos como la propia eficiencia de la operación del taller.

La integración de herramientas de procesamiento de lenguaje natural para el diagnóstico automatizado de reportes de vuelo es un proceso poco frecuentado. La bibliografía revisada no presenta soluciones maduras que vinculen el reporte primario en lenguaje común con una asignación lógica de la norma ATA 100 (Vera García, 2024). Vera García (2024) indica que el procesamiento inteligente de textos técnicos constituye la próxima frontera en la automatización logística y operativa.

Para profundizar en las metodologías implementadas, es relevante mencionar los estudios que aplican simulaciones de rendimiento en entornos controlados. Varios autores utilizan pruebas de estrés informático para evaluar la estabilidad de las nuevas plataformas digitales bajo escenarios de alta demanda concurrente (López Solomando, 2024). En este sentido, López Solomando (2024) recalca que la robustez del software es una condición innegociable dentro del complejo sector aeroespacial.

En relación con los referentes espaciales y temporales, este análisis documental se ha circunscrito a investigaciones publicadas durante la última década. Este periodo coincide exactamente con el auge global de la Inteligencia Artificial generativa y su paulatina adopción en industrias de muy alta complejidad técnica (Florián Medina, 2023). Florián Medina (2023) asevera que fundamentarse en literatura desactualizada conduce invariablemente al diseño de sistemas de mantenimiento obsoletos.

Alternativamente, un estudio de la literatura muestra que existe una diferencia en la teoría sobre cómo debería gestionarse el inventario de herramientas y repuestos. Mientras que algunos modelos proponen una conexión administrativa indirecta, las soluciones más eficientes proponen una incorporación directa del almacén en el proceso de pedido automatizado (Del Villar, 2025). Del Villar (2025) demuestra que la integración lógica directa disminuye significativamente el tiempo de inactividad técnico.

Además, se puede observar que existe una clara falta de literatura académica que sugiera soluciones operativas fuera de línea para los hangares donde la disponibilidad de la

señal es baja. Las líneas de vuelo proporcionan lugares donde la cobertura de la señal es muy débil, lo que limita el funcionamiento de cualquier aplicación basada en la nube (Vera García, 2024). Vera García (2024) destaca la importancia de la persistencia de los datos para mantener la resiliencia del sistema.

Las metodologías orientadas al diseño de interfaces de usuario también han cobrado enorme relevancia para facilitar el trabajo del personal de rampa. Diversas investigaciones aplican principios de ergonomía cognitiva para evitar la sobrecarga visual de los mecánicos al momento de ejecutar los procedimientos (Chulli, 2023). Chulli (2023) afirma que una interfaz interactiva intuitiva es directamente proporcional a la disminución de los márgenes de error humano.

El estado del arte confirma de manera unánime que la digitalización integral de la Organización de Mantenimiento Aeronáutico es un requerimiento insoslayable. La literatura consultada avala científica y operativamente la transición desde procesos analógicos hacia ecosistemas estructurados basados en algoritmos de IA (López Solomando, 2024). Como bien lo sintetiza López Solomando (2024), la verdadera innovación radica en la convergencia armónica entre las tecnologías disruptivas y las necesidades humanas.

Marco Teórico

Gestión del Mantenimiento Aeronáutico Militar

La preservación física de las aeronaves militares exige protocolos técnicos extremadamente estrictos para garantizar la defensa y soberanía del espacio aéreo. La teoría aeronáutica contemporánea consigna que el mantenimiento no sólo repara componentes rotos, además garantiza la viabilidad de las misiones críticas (Rojas & Pineda, 2024). En este sentido, la logística militar, siguiendo esta afirmación central, prefiere la aeronavegabilidad ininterrumpida a cualquier otra variable de coste o esfuerzo operativo (Schröer et al., 2021).

En el interior de los hangares militares, la dinámica laboral tradicional es dependiente de una cadena de mando con alta jerarquía y presencialismo. Todo requerimiento mecánico o

estructural detectado en la rampa de vuelo exige la revisión y autorización directa de supervisores de alta graduación (Fieri & Suhartono, 2023). Dicha rigidez procedimental, aunque es necesaria para garantizar la disciplina, ralentiza enormemente los tiempos de reacción institucionales ante novedades imprevisibles (Alcaide, 2025).

Para contrarrestar estas demoras logísticas, las fuerzas armadas contemporáneas han adoptado metodologías de inspección basadas netamente en la confiabilidad mecánica. Este método da prioridad a intervenciones preventivas integrales previas a que los elementos alcancen sus límites críticos de fatiga estructural o vida útil (Castellanos, 2023). El carácter de la prevención sistémica reducirá el número de aeronaves en tierra como consecuencia del mantenimiento, además de incrementar la disponibilidad general de la flota para instrucción (Gómez, 2025).

La misma idea la comparten Rojas y Pineda (2024): la correcta gestión del mantenimiento en el aire es el principio determinante del éxito de toda operación de aérea. Si los mecánicos carecen de acceso inmediato a directrices técnicas precisas y normadas, la cadena logística entera sufre bloqueos operativos y retrasos (Schröer et al., 2021). Por ello, descentralizar el conocimiento técnico resulta indispensable para optimizar las labores directamente en el punto mismo de la falla (Fieri & Suhartono, 2023).

Transición hacia el Paradigma de la Aviación 4.0

La Cuarta Revolución Industrial ha permeado la industria aeroespacial dando origen al concepto tecnológico contemporáneo conocido como Aviación 4.0. Este modelo promueve la interconexión cibernética y en tiempo real de todas las herramientas operativas dentro de las bases de mantenimiento (Alcaide, 2025). La hiperconectividad facilita una lectura milimétrica del estado físico de las células aéreas, aviónica y sus respectivos grupos propulsores (Castellanos, 2023).

Alcaide (2025) sostiene que la digitalización total de los talleres aeronáuticos elimina definitivamente la grave vulnerabilidad del soporte físico analógico. La transformación digital

profunda convierte a las brigadas mecánicas en ambientes inteligentes que anticipan fallos mediante el Big Data (Rojas & Pineda, 2024). La automatización del proceso burocrático deja al personal de línea centrado en realizar únicamente tareas mecánicas complejas (Gómez, 2025).

La Aviación 4.0 requiere que los operarios se comuniquen en tiempo real con ecosistemas de software interactivo desde cualquier punto del hangar o de la pista. La captura de información técnica en el instante exacto de la inspección previene distorsiones cognitivas y pérdidas documentales irrevocables (Fieri & Suhartono, 2023). Toda la recolección de métricas operativas se unifica en servidores centralizados que alimentan tableros de control ejecutivos para los altos mandos (Schröer et al., 2021).

Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS)

Un Sistema Computarizado de Gestión de Mantenimiento constituye el cerebro operativo ineludible de cualquier organización aeronáutica de vanguardia. Su función principal radica en digitalizar el ciclo de vida completo de los activos mecánicos y gestionar dinámicamente los requerimientos técnicos (Castellanos, 2023). Estas plataformas estructuran complejas bases de datos relacionales que almacenan manuales, historiales de falla y perfiles de operarios (Alcaide, 2025).

La arquitectura base de un CMMS aeronáutico comprende módulos independientes de inventario, gestión de órdenes de trabajo y control de personal especializado. Cuando un usuario registra una novedad, el sistema cruza información al momento y comprueba cantidades físicas en el pañol (Rojas & Pineda, 2024). Esta trazabilidad computarizada impide la elaboración de reparaciones sin copiar los repuestos estrictamente necesarios (Gómez, 2025).

En situaciones de alta criticidad que implique que el software de mantenimiento tiene una doble funcionalidad en tanto que herramienta implacable de auditoría técnica continua. El algoritmo registra la fecha, hora exacta y usuario responsable de cada modificación documental en el historial inmutable de la aeronave (Fieri & Suhartono, 2023). Esta inmutabilidad de

registros asegura que las organizaciones cumplan rigurosamente con las normativas internacionales de seguridad de vuelo (Schröer et al., 2021).

Estructura y Regulación del Estándar ATA 100

El estándar ATA 100 es un sistema de codificación universal creado para unificar la documentación de ingeniería y mantenimiento aeronáutico a nivel global. Proporciona una estructura numérica lógica y jerárquica que categoriza todos los sistemas y subsistemas posibles presentes en un aeroplano (Gómez, 2025). Esta clasificación internacional permite a técnicos e ingenieros de diversas procedencias interpretar un manual con total uniformidad técnica (Castellanos, 2023).

Para una aeronave de instrucción militar, el fuselaje, la aviónica y la planta motriz se subdividen en capítulos ATA sumamente específicos. Por ejemplo, el capítulo número treinta y dos abarca todo lo referente a los componentes y actuaciones mecánicas del tren de aterrizaje (Rojas & Pineda, 2024). Codificar los fallos según esta norma simplifica drásticamente la extracción de guías de reparación correctas en bases de datos extensas (Alcaide, 2025).

Fieri y Suhartono (2023) argumentan que la parametrización ATA es indispensable para entrenar modelos predictivos eficaces en el mantenimiento aeronáutico. Al alimentar un software con nomenclaturas técnicas estandarizadas, el algoritmo informático comprende rápidamente la topología mecánica del activo aéreo (Schröer et al., 2021). La estandarización elimina peligrosas ambigüedades lingüísticas que podrían derivar en diagnósticos catastróficos y fatalidades para la tripulación (Gómez, 2025).

Inteligencia Artificial en Diagnósticos Técnicos y Ecosistemas Aéreos

La inteligencia artificial generativa marca un hito tecnológico sin precedentes en la asimilación e interpretación de grandes volúmenes de manuales técnicos. Mediante arquitecturas de Procesamiento de Lenguaje Natural, los algoritmos pueden comprender reportes de fallas redactados en un lenguaje cotidiano (Castellanos, 2023). El motor lógico

traduce las descripciones informales del personal de rampa hacia códigos ATA 100 con asombrosa precisión y rapidez (Rojas & Pineda, 2024).

Esta tecnología suprime la búsqueda manual tediosa y propensa a errores dentro de documentos técnicos que superan las miles de páginas impresas. Cuando el técnico reporta una fuga hidráulica, la IA localiza instantáneamente el procedimiento de corrección exigido por el manual del fabricante (Alcaide, 2025). La inmediatez algorítmica acelera exponencialmente el flujo de trabajo y evita bloqueos operacionales indeseados en la línea de vuelo (Fieri & Suhartono, 2023).

Para evitar alucinaciones algorítmicas, la inteligencia artificial debe anclarse ineludiblemente a una base de conocimiento cerrada y verificada. Este proceso técnico de arraigo asegura que el software únicamente extraiga soluciones avaladas por los reglamentos técnicos del taller (Schröer et al., 2021). La delimitación estricta de parámetros de consulta resguarda la integridad absoluta de los procedimientos de aeronavegabilidad y despacho militar (Gómez, 2025).

Lógicas de Asignación Inteligente de Recursos Humanos

La asignación de personal técnico constituye un problema matemático multivariable complejo dentro de la gestión diaria de operaciones logísticas. Un algoritmo de distribución inteligente tarea evalúa múltiples restricciones a la vez para asignar de forma autónoma al recurso humano correcto o más competente (Castellanos, 2023). El sistema, evalúa de forma invariable, las licencias actuales, la especialidad del mecánico y sus disponibilidades horarias en tiempo real (Rojas & Pineda, 2024).

Cuando se automatiza la tarea de asignar órdenes de trabajo se eliminan favoritismos, sesgos cognitivos o desbalances de carga laboral del hangar. El código informático cruza las exigencias de la tarea normada con el historial de cualificaciones del operario disponible en la base (Alcaide, 2025). De esta forma estructurada, una reparación de sistemas de aviónica

nunca será asignada erróneamente a un especialista en estructuras metálicas (Fieri & Suhartono, 2023).

La programación lógica de esta distribución dinámica optimiza radicalmente la utilización integral de los recursos técnicos del estado. Los tiempos muertos por espera de aprobación gerencial en escritorios desaparecen, ya que el sistema emite notificaciones de ejecución inmediatas (Schröer et al., 2021). La fluidez del procesamiento algorítmico garantiza que el talento humano funcione al máximo de su capacidad operativa diaria instalada (Gómez, 2025).

Desarrollo de Aplicaciones Móviles Multiplataforma para Hangares

El desarrollo de aplicaciones móviles multiplataforma facilita el despliegue del sistema informático en diversos dispositivos de hardware sin fragmentación de código. Los frameworks de programación contemporáneos permiten compilar de forma nativa una misma lógica para teléfonos inteligentes y tabletas industriales (Castellanos, 2023). Esta versatilidad técnica disminuye los costos de desarrollo y garantiza una uniformidad visual esencial para los usuarios finales (Rojas & Pineda, 2024).

En la rampa de vuelo, el personal requiere interfaces gráficas minimalistas que eviten la sobrecarga cognitiva visual en entornos estresantes. El diseño debe contemplar botones de alta accesibilidad, contrastes marcados y un flujo de navegación que demande escasos toques de pantalla (Alcaide, 2025). La ergonomía del software interactivo es un pilar tecnológico determinante para la adopción exitosa de tecnologías en entornos hostiles y ruidosos (Fieri & Suhartono, 2023).

Además, el hardware móvil actual posee capacidades avanzadas de captura multimedia que nutren y respaldan documentalmente las bases de datos. Los mecánicos pueden anexar fotografías georreferenciadas y nítidas del componente averiado directamente a la orden de trabajo digital (Schröer et al., 2021). Estas evidencias visuales inalterables mejoran

sustancialmente los procesos posteriores de revisión técnica, auditoría y aseguramiento del control de calidad (Gómez, 2025).

Sincronización Asíncrona y Persistencia Local (Offline-First)

La conectividad a internet en instalaciones militares y hangares suele ser intermitente debido a factores de seguridad, blindaje y distancias en rampa. Las arquitecturas de software orientadas a la movilidad táctica deben operar bajo el paradigma inquebrantable de persistencia local (Castellanos, 2023). Este esquema técnico almacena las bases de datos en la memoria del dispositivo móvil de manera encriptada y altamente segura (Rojas & Pineda, 2024).

Cuando el aerotécnico diligencia un formulario de reparación sin cobertura de red activa, el sistema informático no bloquea la interfaz de usuario. La aplicación guarda los registros temporalmente en un motor de bases de datos embebido dentro del sistema operativo del celular (Alcaide, 2025). Dicha resiliencia informática local asegura que el ciclo de mantenimiento fluya ininterrumpidamente independientemente del entorno físico de telecomunicaciones (Fieri & Suhartono, 2023).

Posteriormente, al detectar un enlace inalámbrico estable, el aplicativo sincroniza las novedades operativas asíncronamente con el servidor central de la base. Mecanismos de programación avanzados verifican las marcas de tiempo para evitar conflictos de sobreescritura en los registros maestros (Schröer et al., 2021). Esta conciliación de datos transparente y sin intervención manual es vital para mantener unificado el estado operativo del escuadrón (Gómez, 2025).

Ciberseguridad y Control de Acceso Basado en Roles (RBAC)

El manejo de información clasificada en entornos de defensa exige estándares de ciberseguridad inflexibles y de estricto grado militar. La implementación lógica de un Control de Acceso Basado en Roles segmenta adecuadamente los privilegios de los usuarios informáticos de la red (Castellanos, 2023). Cada perfil, ya sea técnico raso, supervisor inspector o

comandante, posee credenciales únicas que limitan su visión y manipulación del sistema (Rojas & Pineda, 2024).

La arquitectura algorítmica de roles impide tajantemente que un operario de bajo rango modifique parámetros críticos de la liberación de vuelo. Las bases de datos aplican políticas de nivel de fila para filtrar los registros autorizados antes de transmitirlos a las pantallas cliente (Alcaide, 2025). Este aislamiento lógico de la arquitectura restringe severamente la superficie de ataque frente a vulnerabilidades internas o intentos de alteración (Fieri & Suhartono, 2023).

Sumado al control de permisos locales, el intercambio bidireccional de datos entre la nube y los dispositivos requiere túneles cifrados inviolables. El uso de estándares de encriptación simétrica blinda las transmisiones de reportes aeronáuticos contra interceptaciones de red maliciosas (Schröer et al., 2021). La protección criptográfica perimetral asegura la confidencialidad absoluta de la disposición táctica y las vulnerabilidades de los activos aéreos (Gómez, 2025).

Firmas Digitales y Auditoría de Control de Calidad

La culminación procedimental de toda tarea mecánica debe estar respaldada por un mecanismo inmutable de responsabilidad legal aeronáutica. Las firmas digitales proporcionan un método criptográfico asimétrico para vincular unívocamente la identidad electrónica del técnico con su trabajo ejecutado (Castellanos, 2023). A diferencia de las tradicionales firmas manuscritas en tinta, los tokens electrónicos previenen el repudio, el fraude y la falsificación de documentos (Rojas & Pineda, 2024).

El protocolo de triple validación militar exige que la orden sea rubricada secuencialmente por diferentes niveles de responsabilidad jerárquica. En primer lugar, el mecánico ejecutor da fe de su trabajo en el checklist; luego, el supervisor confirma digitalmente que se usó la herramienta calibrada y normada (Alcaide, 2025). El departamento de control de calidad audita el registro completo digitalmente antes de lanzar la autorización de un despegue seguro (Fieri & Suhartono, 2023).

Este flujo de auditoría en pantallas en paralelo hace desaparecer las graves demoras que se producían antes por la búsqueda por todo el hangar de los responsables. El tablero informático de calidad compila y empaqueta instantáneamente todas las evidencias fotográficas y firmas para generar el certificado de aeronavegabilidad (Schröer et al., 2021). La trazabilidad algorítmica de firmas genera un entorno de trabajo transparente, altamente disciplinado y orientado hacia la máxima excelencia técnica (Gómez, 2025).

Marco Conceptual

Aviación 4.0 y Ecosistemas Ciberfísicos

La Aviación 4.0 representa comunicación directa entre tecnología cibernética, las redes de conectividad y los análisis de datos en el ámbito aeroespacial. El concepto transformaría así, los hangares tradicionales en un entorno ciberfísico donde los componentes mecánicos de la aeronave están integrados en un diálogo continuo entre servidores de información. La total digitalización de los talleres hace que las decisiones operativas descansen sobre valores exactos que están extraídos en tiempo real.

Las características conceptuales más relevantes que definen a la Aviación 4.0 son:

- Interoperabilidad: Capacidad que permite la comunicación e intercambio de datos sin intervención humana de diversas plataformas de negocio del software y hardware.
- Descentralización: El dictamen técnico no es heredado de una oficina, sino que se genera mediante algoritmos distribuidos.
- Virtualización: Creación de registros digitales y por lo tanto inmutables que reflejan el estado físico exacto de la aeronave en la rampa.

Para Jiménez Gatica (2024), la adopción de estos ecosistemas ciberfísicos es un requisito normativo ineludible para garantizar la seguridad militar moderna. La interconexión total previene omisiones documentales al obligar al personal a registrar cada acción dentro de un entorno informático cerrado y validado.

Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS)

Un Sistema Computarizado de Gestión de Mantenimiento (CMMS) es una arquitectura de software diseñada para orquestar todos los procesos técnicos y logísticos. Conceptualmente, actúa como un núcleo de base de datos relacional que administra el ciclo de vida de los activos, el control de inventarios y la trazabilidad del talento humano (Montoya, 2025). Su función es reemplazar por completo los repositorios físicos de papeletas.

El funcionamiento de un CMMS se fundamenta en la integración de submódulos lógicos que interactúan entre sí de manera automatizada. Según Anchundia (2026), un sistema CMMS moderno posee la capacidad de bloquear el inicio de una labor técnica si no detecta disponibilidad de refacciones. Por tanto, el sistema deja de ser un simple y pasivo archivo, convirtiéndose, en cambio, en un controlador del control de calidad aeronáutica.

Las variables que maneja un CMMS aeronáutico son:

- Catálogo de activos: Registro digital de números de serie, horas de vuelo y ciclos de cada aeronave activa.
- Gestión de inventarios: Conciliación automática entre las piezas excluidas del pañol y las órdenes de trabajo activas.
- Métricas del funcionamiento: Tableros de control que procesan estadísticamente tiempos de respuesta de escuadrón logístico.

Orden de Trabajo Digital (OTD)

La Orden de Trabajo Digital (OTD) se conceptualiza como el documento electrónico maestro que autoriza, dirige y registra una intervención mecánica. A diferencia de un formato impreso, la OTD está programada como un objeto de datos dentro del sistema que no puede ser alterado retroactivamente. Calderón (2024) sostiene que la digitalización estructural de esta orden es el pilar para cualquier auditoría de mantenimiento eficiente.

Una OTD válida dentro de este ecosistema debe contener campos lógicos de estricto cumplimiento para poder ser procesada. Estos incluyen la matrícula de la aeronave, el código

de falla, las herramientas normadas exigidas y los identificadores de los técnicos. La relación de estas variables genera un bloque de información que permite calcular analíticamente el desempeño individual del personal militar asignado a la tarea.

Lógica de Asignación Inteligente (LAI)

Se define como Lógica de Asignación Inteligente al conjunto de algoritmos y reglas heurísticas que distribuyen automáticamente las órdenes de trabajo. Esta idea de informática determina variables de operación complejas como las licencias de los mecánicos y su carga laboral activa, todo ello sin ningún tipo de supervisión humana. Martínez (2025) nos detalla que los algoritmos de optimización multiobjetivo garantizan el balanceo justo y preciso de las tareas asignadas.

Al determinar la asignación de una tarea dada el LAI utiliza las siguientes restricciones:

- Filtro de Especialidad: Esta restricción combina la especialización técnica requerida (estructuras, aviónica, hidráulica) con el tipo de mecánico.
- Gestión de la Fatiga: Esta restricción toma en cuenta el número total de horas de trabajo para evitar que personas sobrecargadas ejecuten tareas críticas.
- Priorización Táctica: Esta restricción prioriza la emergencia de mantenimiento dependiendo de las necesidades de la red de vuelo institucional.

En el campo del mantenimiento la Inteligencia Artificial (IA) surge con el concepto de utilizar algoritmos computacionales en el procesamiento del lenguaje natural. La PNL, que es una subdisciplina de la IA, proporciona un mecanismo para que la computadora comprenda la sintaxis de un informe informal elaborado por el piloto/mecánico.

Para que la IA pueda funcionar de forma segura en un entorno militar, se aplica el concepto técnico de anchoring (anclaje documental). Muñiz (2023) dice que este mecanismo permite acotar la base de conocimiento del algoritmo obligándole a justificar sus respuestas exclusivamente en los manuales de fábrica. Esta limitación lógica erradica las alucinaciones algorítmicas, garantizando dictámenes precisos y legalmente vinculantes.

Estándar Normativo ATA 100

El código ATA 100 es un estándar taxonómico internacional desarrollado por la Air Transport Association para clasificar la documentación aeronáutica. Conceptualmente, divide cada sistema, subsistema y componente de una aeronave mediante una estructura numérica jerárquica unificada. Guerrero (2025) menciona que la asimilación de este estándar permite a los sistemas informáticos indexar y recuperar directrices mecánicas con extrema rapidez.

Al parametrizar las bases de datos relacionales bajo este formato, se garantiza la interoperabilidad de la plataforma. Si el técnico reporta una fuga en el sistema de combustible, el software categoriza la incidencia directamente bajo el Capítulo 28. Esta conceptualización estructurada impide las ambigüedades lingüísticas, asegurando que el personal de la línea de vuelo acceda al procedimiento correctivo adecuado.

Interfaz Operativa Móvil (IOM) y Persistencia de Datos

La Interfaz Operativa Móvil (IOM) es el componente de front-end que facilita la interacción gráfica entre el aerotécnico y la base de datos central. La conceptualización de la aplicación se encuentra sustentada en principios de ergonomía cognitiva. Así, las formulaciones estarán caracterizados por un alto contraste y botones táctiles más adecuados para entornos industriales. Una IOM óptima realiza un esfuerzo visual muy bajo para el usuario, pero puede generar un alto índice de errores de tipeo en condiciones estresantes.

El concepto de persistencia de datos local (offline-first architecture) expresa la aptitud del sistema para operar sin cobertura de Internet. La base de datos se cifra y se almacena temporariamente en la memoria caché del dispositivo móvil del mecánico. En cuanto el aplicativo detecta una conexión Wi-Fi con buena calidad de señal, un algoritmo de sincronización asíncrona envía los reportes al servidor BackOffice, resolviendo eventuales conflictos de sobreescritura.

Los beneficios conceptuales de esta arquitectura son los siguientes:

- Continuidad operativa: Los técnicos no interrumpen el llenado de checklists en la medida que ingresan en zonas ciegas del hangar.
- Integridad transaccional: El sistema retiene la información cifrada evitando así la muerte de evidencias fotográficas capturadas.
- Sincronización en segundo plano: La conciliación de variables ocurre sin intervención manual del usuario.

Ciberseguridad y Control de Acceso Basado en Roles (RBAC)

La ciberseguridad en bases de datos logísticas conceptualiza el blindaje perimetral y lógico de la información táctica aeronáutica. El Control de Acceso Basado en Roles (RBAC) es un paradigma informático que restringe la visualización y edición de los registros según las credenciales del usuario. De acuerdo con Cifuentes (2021), la división de privilegios es obligatoria para prevenir el fraude y para preservar la integridad del sistema institucional.

El esquema que se aplica es que los permisos son asignados a un perfil jerárquico y no a usuarios individuales, facilitando así la administración del software. Un aerotécnico aventajado tiene permisos de lectura y de ejecución de tareas, pero no tiene privilegios para auditar sus procesos. El servidor aplica las políticas de RLS para ocultar la información sensible a los rangos no autorizados, reduciendo las amenazas a la seguridad interna.

Firma Electrónica y Trazabilidad Inmutable

La firma electrónica se considera una forma de criptografía asimétrica la cual hace inseparable la identificación del técnico y el documento autorizado. A diferencia de hacer clic en un botón de confirmación el algoritmo crea una cadena alfanumérica irreversible que actúa como un sello del pedido de trabajo. Según Córdova (2021) la validez de la huella criptográfica legalmente protege a uno de las negaciones de procedimiento durante cualquier investigación.

La trazabilidad inmutable es la característica del software que registra secuencialmente todas las acciones ejecutadas en la línea de tiempo. El sistema estampa la fecha, hora exacta y coordenadas del usuario cada vez que se rubrica un avance en el checklist dinámico. Cárdenas

(2025) señala que este encadenamiento algorítmico es fundamental para que el departamento de control de calidad audite la transparencia técnica de las labores.

El protocolo de certificación digital se estructura conceptualmente en tres fases obligatorias:

- Certificación Ejecutora: El técnico de línea sella criptográficamente que cumplió paso a paso con los manuales de mantenimiento.
- Validación de Supervisión: El oficial a cargo verifica digitalmente los valores de torque y herramientas aplicadas en la tarea.
- Liberación de Calidad: El inspector audita la integridad del hash del expediente antes de habilitar informáticamente el despegue.

Indicadores AOG y MTTR

El concepto de Aircraft on Ground (AOG) define el estado logístico crítico en el cual una aeronave pierde su disponibilidad de vuelo por fallas técnicas. Para el ámbito de la aviación militar, esta variable mide de forma directa la ineficacia institucional que puedan generar períodos excesivos de inactividad. La reducción del índice AOG es el objetivo estadístico y operativo más importante en el momento de aplicar tecnologías de automatización en los procesos de despacho de rampa.

Así como el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) es el promedio de las horas que se invierten en restablecer un activo en un estado operable para la aeronavegabilidad. En un ecosistema ciberfísico, el algoritmo separa analíticamente el tiempo dedicado exclusivamente al papeleo del tiempo invertido en la reparación mecánica (Florián Medina, 2023). Esta disección de los datos provee métricas empíricas exactas para perfeccionar las políticas de gestión logística continua.

Capítulo III

Metodología

Metodología de la Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo una metodología de investigación tecnológica aplicada, orientada al diseño, programación, integración y evaluación de un sistema informático destinado a optimizar la gestión y asignación de órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en el Escuadrón de Mantenimiento de la Escuela Superior Militar de Aviación (ESMA). El estudio parte de una necesidad operativa concreta y culmina con la implementación de una solución tecnológica funcional, por lo que integra procedimientos de análisis documental con actividades propias de la ingeniería de software.

Esta metodología implicó el análisis de la documentación técnica relacionada con el mantenimiento de aeronaves como manuales de mantenimiento, libros de vuelo, reglamentos técnicos de navegabilidad, directivas de navegabilidad, boletines de servicio y procedimientos internos de mantenimiento de la Organización. La Regtec-003-Diraer establece disposiciones para la administración de documentación técnica aeronáutica y contempla la utilización de órdenes de trabajo como parte del proceso documental del mantenimiento (Fuerza Aérea Ecuatoriana [FAE], 2025a).

A partir de esta información se determinaron los requerimientos funcionales y las estructuras de datos necesarias para desarrollar el sistema, incluyendo el registro de aeronaves, novedades, órdenes de trabajo, procedimientos, recursos, checklist, usuarios, firmas y estados de ejecución. Luego se pusieron en marcha los componentes software y se apreciaron pruebas funcionales y de integración para la comprobación de su comportamiento.

La creación tecnológica se estructuró, por ciclos iterativos de trabajo, según el marco de desarrollo ágil Scrum para permitir así ir avanzando de forma progresiva: desde la definición de los requerimientos y de la estructura de datos, hacia la inteligencia artificial, las interfaces operativas y los mecanismos de validación. Esta estrategia ya se encontraba contemplada en

la planificación inicial del proyecto mediante ciclos de desarrollo o sprints (Carvalho & Mello, 2012).

Enfoque de Investigación

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo de carácter documental y tecnológico, debido a que la evaluación de la solución se fundamentó en información técnica y en resultados medibles obtenidos durante las pruebas del sistema.

El componente documental permitió analizar la información contenida en los manuales, regulaciones y registros de mantenimiento para identificar los procedimientos, requisitos y relaciones necesarias para estructurar la solución informática. Dentro de las principales fuentes, se tuvieron por consideraciones el Aircraft Maintenance Manual (AMM) de la aeronave DA20-C1, la Forma FAE 781, los manuales MATEC, las regulaciones Regtec - Diraer, así como los informes técnicos referidos a la aeronavegabilidad.

La Forma FAE 781 se considera el registro institucional de vuelo y mantenimiento de las aeronaves, en el cual se contienen los elementos necesarios para la debida documentación de las actividades relacionadas con la operación y el mantenimiento. El manual correspondiente establece que dicho registro constituye el principal documento utilizado para anotar las actividades de mantenimiento realizadas a las aeronaves de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE, 2024).

El componente cuantitativo se aplicó mediante indicadores obtenidos durante las pruebas del sistema, entre ellos tiempos de procesamiento, tiempos de respuesta, funcionamiento de los módulos, resultados de la asignación inteligente, generación de órdenes de trabajo y comportamiento de los componentes integrados. Estos datos permitieron evaluar objetivamente el funcionamiento de la solución desarrollada.

En consecuencia, el estudio no se orientó a medir percepciones, opiniones o características de personas, sino a analizar información técnica aeronáutica y comprobar el

funcionamiento de una herramienta informática desarrollada para apoyar el proceso de gestión de mantenimiento.

Tipo y Diseño de Investigación

La investigación es de tipo aplicada, descriptiva, documental y tecnológica. El estudio es aplicado ya que intenta resolver un problema particular relacionado con la gestión de los pedidos de trabajos de mantenimiento aeronáutico mediante la implementación de un sistema basado en la computadora. El estudio es descriptivo ya que brinda la oportunidad de describir el flujo de la documentación y la operación relacionada con el registro, la asignación, la ejecución y el seguimiento de los pedidos de trabajo. El estudio es documental ya que toma en cuenta la documentación técnica y normativa relevante para el mantenimiento aeronáutico. El estudio es tecnológico ya que resulta en el desarrollo de un sistema basado en la computadora y aplicación móvil.

El diseño corresponde a un desarrollo tecnológico con pruebas controladas, debido a que se diseñó y programó una solución informática y posteriormente se verificó su funcionamiento mediante escenarios de prueba. El proyecto no modificó deliberadamente las condiciones reales de operación de las aeronaves ni intervino físicamente sobre sus sistemas; las pruebas se efectuaron sobre el entorno informático y sobre información documental utilizada para representar diferentes situaciones de mantenimiento.

El proceso de desarrollo se organizó mediante ciclos iterativos, considerando actividades de planificación, programación, integración, revisión y pruebas. La utilización de Scrum permitió dividir el desarrollo en incrementos funcionales y realizar ajustes progresivos sobre la base de los resultados obtenidos en cada etapa (Carvalho & Mello, 2012).

Unidad de Análisis y Fuentes de Información

Debido a que la investigación no tuvo como objeto de estudio a personas, no se estableció una población ni una muestra de participantes humanos. La unidad de análisis estuvo constituida por la información documental y tecnológica relacionada con la gestión del

mantenimiento de las aeronaves DA20-C1, así como por los escenarios utilizados para comprobar el funcionamiento del sistema.

Las fuentes documentales se seleccionaron de acuerdo con su relación directa con los procesos de mantenimiento y con los requerimientos funcionales de la solución desarrollada. Entre ellas se encuentran:

- Aircraft Maintenance Manual DA20-C1, documento técnico del fabricante utilizado como referencia para los procedimientos de mantenimiento de la aeronave. La documentación cargada corresponde a la revisión 25 del AMM, emitida el 14 de marzo de 2023 (Diamond Aircraft Industries Inc., 2023).
- Forma FAE 781, utilizada como referencia para el registro de vuelo y mantenimiento de las aeronaves (FAE, 2024).
- MATEC-001, Manual General de Mantenimiento, utilizado para establecer criterios generales relacionados con los procesos, registros y actividades de mantenimiento de la Organización de Mantenimiento.
- MATEC-002, Manual de Procedimientos ESMA, utilizado como referencia para los procedimientos internos de mantenimiento y control de las actividades realizadas en la organización.
- Regtec-003-Diraer, Documentación técnica aeronáutica, utilizada para establecer criterios de administración, control, disponibilidad y utilización de documentación técnica y órdenes de trabajo (FAE, 2025a).
- Regtec-006-Diraer, Organizaciones de Mantenimiento Aprobadas, utilizada como referencia para los requisitos relacionados con documentación, registros y procesos de mantenimiento (FAE, 2025b).

- Regtec-007-Diraer, Mantenimiento Aeronáutico, utilizada para establecer los lineamientos aplicables a la ejecución, registro y control de las actividades de mantenimiento (FAE, 2025c).
- Informes de confiabilidad y aeronavegabilidad utilizados como fuentes complementarias para el análisis de indicadores y registros técnicos de la flota.

La selección documental respondió a la necesidad de construir una base de información coherente con los procedimientos técnicos vigentes y evitar que la lógica del sistema genere asignaciones desvinculadas de la documentación aeronáutica aplicable.

Técnicas e Instrumentos

Análisis Documental

Se empleó el análisis documental para examinar y sistematizar la información contenida en manuales de mantenimiento, regulaciones técnicas, registros de vuelo, procedimientos internos y demás documentación aplicable. Esta técnica permitió identificar los datos, relaciones y reglas necesarias para estructurar la base de datos y establecer la lógica funcional del sistema.

Como instrumento se utilizó una matriz de análisis documental, mediante la cual se organizaron las fuentes consultadas, sus referencias, procedimientos, requisitos y elementos relevantes para el desarrollo del sistema.

La documentación fue analizada considerando su identificación, código, revisión, fecha y contenido aplicable. Este criterio es especialmente importante debido a que la Regtec-003-Diraer establece mecanismos para mantener diferenciada la documentación vigente de aquella que ha sido reemplazada y para registrar las revisiones efectuadas sobre la información técnica (FAE, 2025a).

Registro de Información del Sistema

Como instrumento tecnológico se utilizaron los registros y logs generados por la aplicación, incluyendo información sobre consultas, procesamiento de solicitudes, estados de

las órdenes, respuestas del componente de inteligencia artificial y eventos generados durante las pruebas.

Estos registros permitieron obtener información objetiva para analizar el funcionamiento de los módulos y comprobar la trazabilidad del flujo de una orden de trabajo.

Pruebas Funcionales

Se utilizaron matrices de casos de prueba para verificar el comportamiento de los módulos desarrollados. Las pruebas consideraron el ingreso de información, procesamiento de novedades, consulta documental, asignación inteligente, generación de órdenes de trabajo, ejecución del checklist, firmas y cambios de estado.

La validación se efectuó mediante escenarios controlados, sin intervenir directamente sobre aeronaves en operación.

Procedimiento Metodológico para el Desarrollo del Sistema

Fase 1. Análisis documental y definición de requerimientos: En esta fase se revisó la documentación técnica relacionada con la flota DA20-C1 y los procedimientos de mantenimiento de la FAE. Se identificaron los elementos necesarios para representar digitalmente el proceso de gestión de órdenes de trabajo, incluyendo aeronaves, novedades, procedimientos, recursos, usuarios, checklist, estados y registros.

La revisión del AMM permitió identificar la estructura de los procedimientos técnicos aplicables a la aeronave, mientras que la Regtec-003-Diraer permitió establecer los criterios relacionados con documentación técnica y órdenes de trabajo. La Forma FAE 781 se utilizó como referencia para los registros de vuelo y mantenimiento.

Fase 2. Diseño de la arquitectura y base de datos: Con los requerimientos definidos se diseñó la arquitectura de datos y la estructura relacional del sistema. Se empleó PostgreSQL mediante Supabase para almacenar la información estructurada correspondiente a usuarios, aeronaves, órdenes de trabajo, checklist, estados y demás entidades del sistema.

La arquitectura permitió establecer relaciones entre la aeronave, la novedad reportada, la orden de trabajo, el procedimiento técnico, los recursos asignados y los responsables de cada etapa. Esta estructura facilita la trazabilidad de la información desde el reporte inicial hasta la finalización y liberación de la orden.

Fase 3. Configuración y programación: Posteriormente se desarrollaron los componentes de programación encargados de gestionar los procesos del sistema. Se utilizaron Google Apps Script para automatizar funciones de negocio e integración, junto con las herramientas utilizadas durante el prototipado y desarrollo, entre ellas AppSheet, Supabase, PostgreSQL, Firebase, Looker Studio y el entorno de programación empleado para la integración de los servicios de IA.

La programación incluyó funciones para el procesamiento de información, conexión con servicios externos, generación de documentos PDF, envío de información y actualización de los estados de las órdenes. El proyecto contempla específicamente scripts de Apps Script para la generación de PDF, envío de correos e integración con Gemini API.

Fase 4. Implementación de la biblioteca técnica: Se incorporó una estructura de biblioteca técnica digital destinada a organizar y facilitar la consulta de la documentación utilizada por el sistema. Esta funcionalidad se fundamentó en los procedimientos institucionales de control documental.

La Regtec-003-Diraer establece que la Biblioteca Técnica debe mantener identificadas las versiones vigentes de la documentación, registrar sus actualizaciones y controlar su distribución. Además, contempla mecanismos específicos para el control de suscripciones y documentación técnica de las organizaciones de mantenimiento (FAE, 2025a).

En el sistema desarrollado, esta lógica se trasladó al entorno digital mediante una interfaz que permite localizar y consultar la documentación técnica utilizada como fuente para los procesos de mantenimiento.

Fase 5. Configuración e integración de la inteligencia artificial: En esta fase se integró un modelo de inteligencia artificial mediante Gemini API. Es importante precisar que el proyecto no realizó el entrenamiento de un modelo de inteligencia artificial desde cero ni modificó sus parámetros internos mediante un proceso de entrenamiento propio. La actividad desarrollada correspondió a la configuración, integración y parametrización de un modelo previamente disponible para utilizarlo dentro del flujo de gestión de las órdenes de trabajo.

La IA se empleó como mecanismo de asignación inteligente de información, relacionando los datos de una novedad reportada con la información técnica disponible en el sistema. De esta manera, el modelo puede apoyar la identificación de información relevante para la generación de la orden de trabajo, considerando la documentación técnica y las reglas establecidas en el sistema.

El flujo implementado comprende la recepción de la novedad, procesamiento de la información, consulta o interpretación de la documentación técnica, identificación de la información relacionada y generación de los datos necesarios para estructurar la orden de trabajo. La arquitectura del proyecto contempla la integración de Gemini para el diagnóstico asistido, la referencia documental y su asociación con las órdenes de trabajo.

Por tanto, en la presente investigación se emplea el término “configuración de la IA” o “integración de IA para asignación inteligente”, en lugar de “entrenamiento de la IA”, debido a que el propósito fue utilizar un modelo preexistente dentro de un contexto documental controlado.

Fase 6. Desarrollo de las interfaces: Se desarrollaron las interfaces necesarias para representar el flujo operativo del sistema. Entre ellas se incluyeron el acceso al sistema, administración de usuarios, recepción de información posterior al vuelo, registro de novedades, clasificación de información, asignación de recursos, generación de órdenes, checklist, control de calidad, firmas y visualización de indicadores.

Las interfaces se diseñaron considerando la secuencia funcional del proceso, de manera que la información generada en una etapa pueda utilizarse en la siguiente sin necesidad de duplicar registros.

Como evidencia del desarrollo se incorporaron capturas de pantalla de las ventanas principales, fragmentos del código de programación, configuración de la base de datos, integración con Gemini API, generación de documentos y módulos de control. Estas evidencias permiten demostrar directamente la implementación de los componentes descritos.

Fase 7. Integración y pruebas: Se integraron los componentes de base de datos, lógica de negocio, biblioteca técnica, inteligencia artificial e interfaces. Las pruebas se realizaron en un entorno controlado, incluyendo la utilización de una red privada para comprobar la comunicación entre los componentes del sistema.

Se ejecutaron casos de prueba orientados a verificar el registro de novedades, consulta de información técnica, asignación inteligente, generación de órdenes de trabajo, ejecución de checklist, actualización de estados y trazabilidad del proceso.

Procesamiento y Análisis de la Información

La información documental recopilada fue organizada mediante matrices de análisis y posteriormente utilizada para estructurar los datos y reglas del sistema. Los documentos técnicos fueron clasificados según su naturaleza y función dentro del proceso de mantenimiento.

Los resultados obtenidos durante las pruebas fueron registrados mediante logs y matrices de casos de prueba. Para su análisis se consideraron indicadores relacionados con el funcionamiento del sistema, tales como tiempo de respuesta, generación de órdenes, correspondencia de la información asignada, cumplimiento del flujo definido y trazabilidad de los registros.

La información obtenida permitió comparar el comportamiento del proceso digitalizado con las actividades que anteriormente requerían gestión manual, particularmente en la búsqueda de información técnica y preparación de las órdenes de trabajo.

Validación de la Solución Tecnológica

La validación se realizó mediante pruebas funcionales, de integración y de comportamiento, utilizando escenarios representativos del proceso de mantenimiento aeronáutico. Cada prueba permitió verificar que la entrada de información produjera el resultado esperado de acuerdo con las reglas definidas en el sistema.

La validación de la asignación inteligente se centró en comprobar que la información generada por el componente de IA mantuviera correspondencia con el contexto documental utilizado como fuente. Asimismo, se verificó que las órdenes generadas conservaran la relación entre aeronave, novedad, procedimiento, recursos, checklist y responsables.

La evaluación no se realizó mediante encuestas ni instrumentos dirigidos a personas, sino mediante evidencias técnicas, registros del sistema y resultados de los escenarios de prueba. Esto permite que la valoración de la solución se encuentre directamente relacionada con los objetivos tecnológicos de la investigación.

Consideraciones Éticas y de Seguridad de la Información

La investigación consideró principios de confidencialidad, integridad y control de acceso sobre la información utilizada. La documentación técnica aeronáutica fue empleada exclusivamente como fuente para el desarrollo y validación del sistema, respetando las condiciones de utilización establecidas por la normativa institucional.

El sistema incorpora mecanismos de autenticación, asignación de roles y trazabilidad de las operaciones. La arquitectura contempla diferentes niveles de responsabilidad para usuarios técnicos, supervisores, personal de control de calidad y responsables de la gestión, evitando que todos los usuarios tengan acceso indiscriminado a las funciones del sistema.

Asimismo, se mantuvo la separación entre las actividades de desarrollo y la ejecución real del mantenimiento aeronáutico. Las pruebas del prototipo se realizaron en un entorno controlado y no sustituyeron los procedimientos oficiales de certificación, supervisión o liberación de aeronaves establecidos por la normativa institucional.

La utilización de documentación técnica como fuente de información se fundamentó en los procedimientos de control documental establecidos por la FAE. La Regtec-003-Diraer determina la necesidad de mantener identificadas y actualizadas las revisiones de la documentación técnica, mientras que los manuales MATEC establecen la obligación de utilizar los procedimientos y documentación técnica correspondientes a las actividades de mantenimiento (FAE, 2025a; FAE, 2021a, 2021b).

Capítulo IV

Análisis y Discusión de Resultados

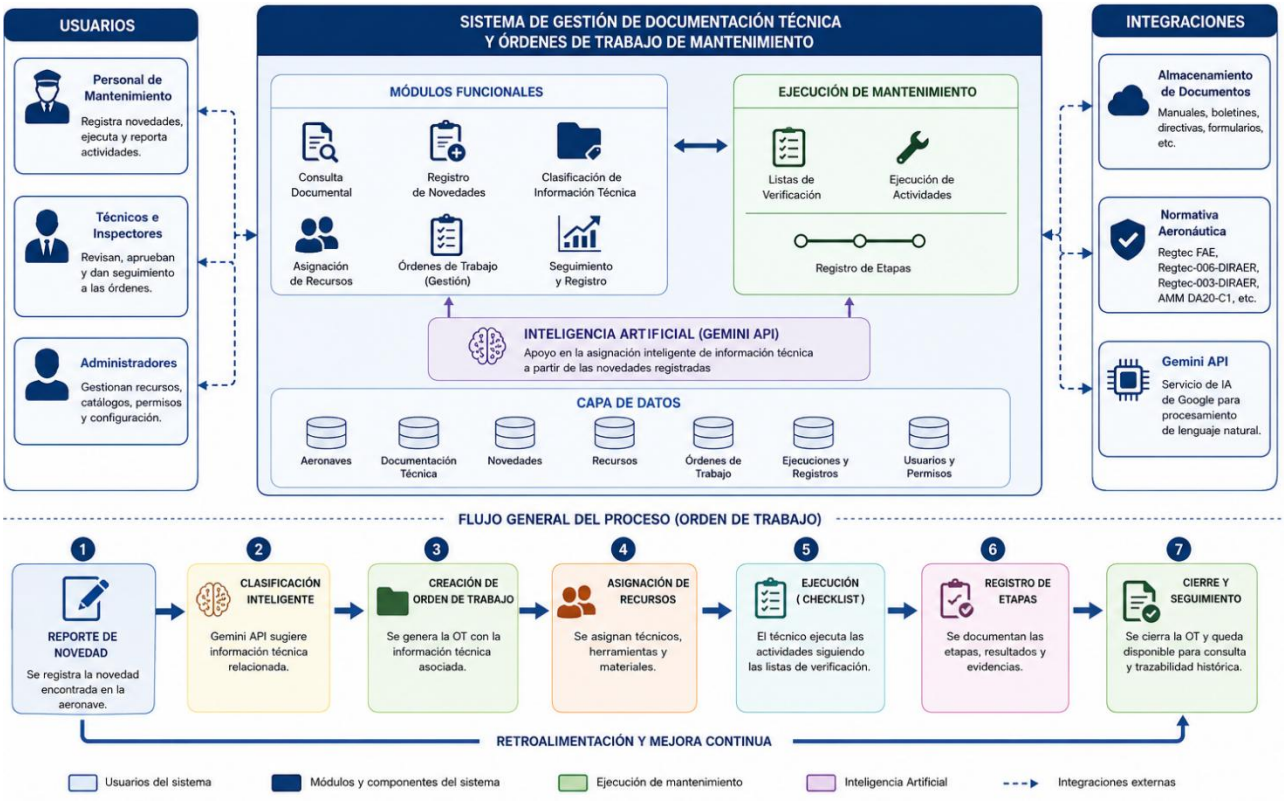
Resultado General del Desarrollo del Sistema

Como resultado del proceso de investigación y desarrollo tecnológico se implementó un sistema digital orientado a la gestión de la documentación técnica y de las órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico para la flota Diamond DA20-C1 de la Fuerza Aérea Ecuatoriana. La solución integra en un mismo entorno la consulta documental, el registro de novedades, la clasificación de información técnica, la asignación de recursos, la generación y seguimiento de órdenes de trabajo, la ejecución mediante listas de verificación y el registro de las diferentes etapas del proceso. La arquitectura desarrollada se sustentó en una estructura de datos relacional y en diferentes componentes de software que permiten mantener la información asociada a cada aeronave y a cada actividad de mantenimiento.

El resultado obtenido permite representar digitalmente el flujo de una orden de trabajo desde el reporte inicial de una novedad hasta su seguimiento y registro histórico. Asimismo, se incorporó un componente de inteligencia artificial mediante Gemini API para apoyar la asignación inteligente de información técnica a partir de las novedades registradas. De esta manera, la inteligencia artificial se utiliza como mecanismo de apoyo dentro del proceso y no como sustituto de la responsabilidad técnica del personal autorizado.

Figura 1

Arquitectura y flujo general del sistema desarrollado



Nota. Presentación de la arquitectura de la base de datos

Tabla 1

Componentes principales implementados

Componente	Función dentro del sistema	Resultado obtenido
Biblioteca técnica	Organización y consulta de documentación	Acceso centralizado a información técnica
Gestión de novedades	Registro de discrepancias de las aeronaves	Información estructurada para iniciar el proceso
Asignación inteligente	Relación entre la novedad y la información técnica	Información de apoyo para estructurar la OT
Órdenes de trabajo	Creación, asignación y seguimiento	Flujo digital de la OT
Checklist	Registro de las actividades de mantenimiento	Control de ejecución
Supervisión y calidad	Verificación de las actividades realizadas	Control de las etapas de aprobación
Historial	Registro de eventos y estados	Trazabilidad del proceso

Implementación y Configuración del Sistema

La implementación del sistema comprendió la configuración de la infraestructura tecnológica, la estructura de la base de datos y los componentes de programación requeridos para representar el proceso de mantenimiento. Se empleó PostgreSQL mediante Supabase para organizar la información correspondiente a usuarios, aeronaves, órdenes de trabajo, checklist, estados y demás entidades relacionadas. Esta estructura permitió establecer relaciones entre la aeronave, la novedad reportada, el procedimiento técnico, los recursos asignados y los responsables de cada etapa.

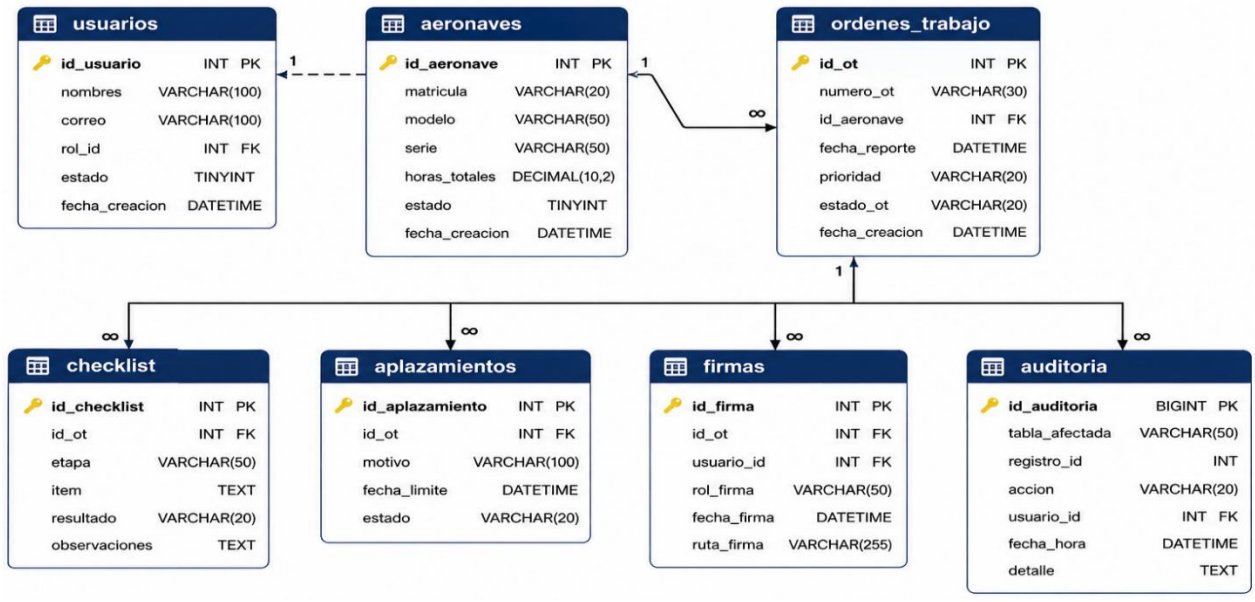
La programación complementaria se llevó a cabo utilizando herramientas como Google Apps Script, AppSheet y los servicios para la integración con inteligencia artificial. Los elementos desarrollados permiten el procesamiento de información, actualizar estados, generar documentos e interactuar entre las diferentes partes de la solución. De este modo, la implementación no se limitó al diseño de interfaces, sino que también integró la configuración de la lógica de datos y de los procesos que fueran necesarios para realizar el flujo de las órdenes de trabajo.

Configuración de la Base de Datos y Programación

La base de datos constituye uno de los elementos centrales del sistema, debido a que permite conservar la información generada durante las diferentes etapas del mantenimiento. En la estructura desarrollada se contemplaron entidades relacionadas con usuarios, aeronaves, órdenes de trabajo, checklist, aplazamientos, firmas y registros de auditoría. Esta organización permite asociar los eventos generados durante el proceso con la orden de trabajo correspondiente y mantener la continuidad de la información.

Figura 2

Estructura de la base de datos del sistema



La programación permitió implementar las funciones necesarias para consultar y modificar la información almacenada. Como evidencia del desarrollo se identificaron fragmentos de código correspondientes al manejo de datos y a la integración de servicios externos. Se recomienda presentar únicamente los fragmentos directamente relacionados con la funcionalidad demostrada, evitando incluir bloques extensos de código que no aporten a la interpretación del resultado.

Figura 3

Fragmento de programación utilizado para la automatización del sistema

a) Consulta de órdenes de trabajo (Backend – Node.js / Express)

```
app.get('/api/ordenes-trabajo', async (req, res) => {
  try {
      const ordenes = await pool.query(`
        SELECT ot.id_ot, ot.numero_ot, a.matricula, ot.estado_ot,
               ot.prioridad, ot.fecha_reporte
        FROM ordenes_trabajo ot
        JOIN aeronaves a ON ot.id_aeronave = a.id_aeronave
        ORDER BY ot.fecha_reporte DESC
      `);
      res.json(ordenes.rows);
  } catch (error) { res.status(500).json({ error: error.message }); }
});
```

b) Integración con Gemini API para clasificación inteligente (Backend)

```
const { GoogleGenerativeAI } = require('@google/generative-ai');
const genAI = new GoogleGenerativeAI(process.env.GEMINI_API_KEY);
const model = genAI.getGenerativeModel({ model: 'gemini-pro' });
const resultado = await model.generateContent(novedadDescripcion);
const clasificacion = resultado.response.text();
return clasificacion;
```

Configuración del Entorno de Pruebas

Para las pruebas del sistema se dispuso de un entorno controlado que permitió comprobar la comunicación entre los componentes tecnológicos sin intervenir directamente sobre aeronaves en operación. La metodología establece que las pruebas se realizaron mediante escenarios controlados y registros generados por la aplicación.

Figura 4

Entorno de pruebas y conexión de los componentes del sistema



Tabla 2

Herramientas tecnológicas utilizadas

Herramienta	Aplicación dentro del proyecto
PostgreSQL / Supabase	Almacenamiento y gestión de datos
AppSheet	Desarrollo de interfaces y formularios
Google Apps Script	Automatización e integración de procesos
Firebase	Servicios complementarios de la aplicación
Gemini API	Integración del componente de inteligencia artificial
Looker Studio	Visualización de indicadores y seguimiento
Radmin VPN	Configuración del entorno privado de pruebas

Implementación de la Biblioteca Técnica y Funciones Principales

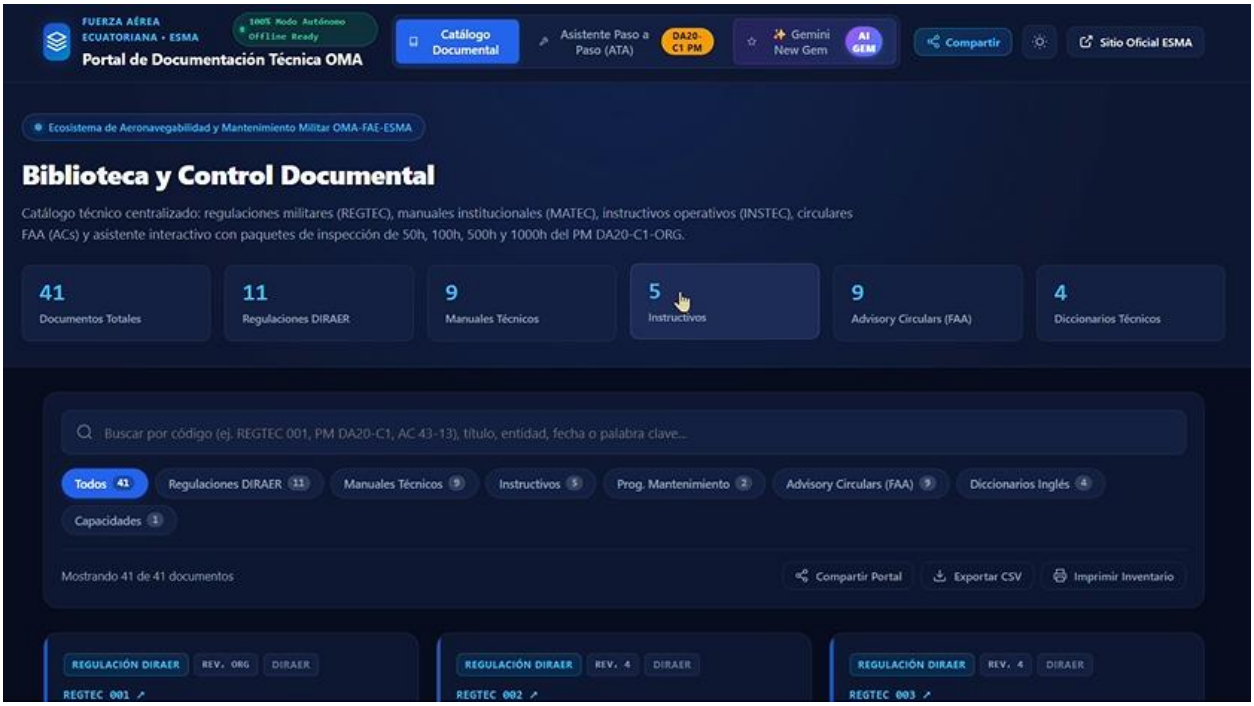
Biblioteca Técnica

Uno de los resultados principales fue la incorporación de una biblioteca técnica digital destinada a centralizar y facilitar la consulta de la documentación empleada durante el mantenimiento. La organización documental consideró manuales técnicos, regulaciones, instructivos y otros documentos relacionados con las actividades de mantenimiento aeronáutico. Esta funcionalidad responde a la necesidad de mantener identificada y disponible la documentación aplicable para los procesos técnicos.

La Regtec-003-Diraer establece la importancia del control de la documentación técnica, particularmente respecto de su identificación, actualización y control de las versiones vigentes. En el sistema desarrollado, estos principios se trasladaron a una interfaz digital que permite localizar y consultar los documentos incorporados al entorno de trabajo.

Figura 5

Interfaz principal de la biblioteca técnica



La biblioteca incorpora categorías diferenciadas para facilitar la localización de la información. Entre las fuentes consideradas se encuentran el Aircraft Maintenance Manual (AMM) del DA20-C1, documentación MATEC, regulaciones DIRAER, instructivos, programas de mantenimiento y documentación complementaria.

Figura 6

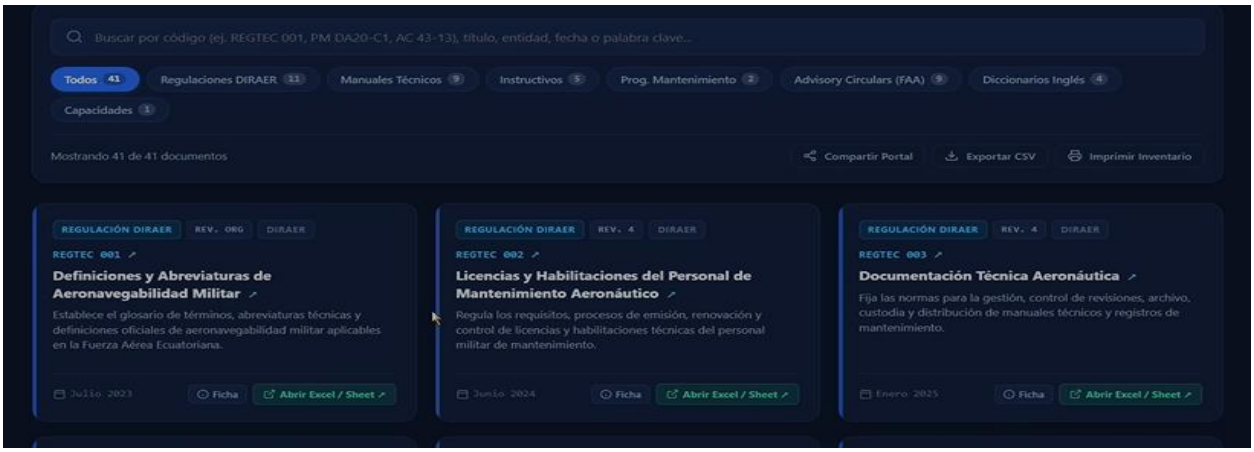
Organización de manuales y regulaciones en la biblioteca técnica



La consulta de documentación constituye una función relevante debido a que los procedimientos de mantenimiento del DA20-C1 deben ejecutarse utilizando la información técnica aplicable. El AMM del DA20-C1 establece, entre otros aspectos, los procedimientos de inspección y mantenimiento programado y señala que las tareas aplicables deben ser registradas y firmadas por personal autorizado.

Figura 7

Consulta de documentación técnica

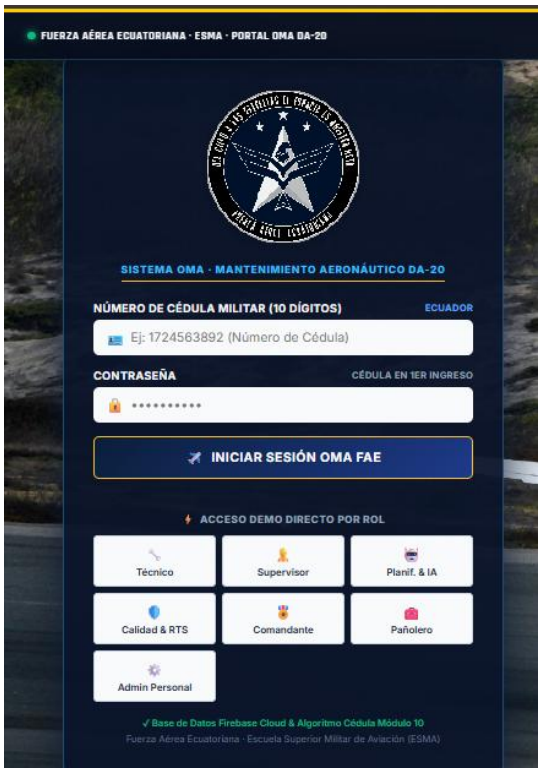


Funciones Principales del Sistema

La interfaz desarrollada integra diferentes funciones para representar las etapas del proceso de mantenimiento. Entre ellas se encuentran el acceso al sistema, la administración de usuarios, el registro de información posterior al vuelo, el reporte de novedades, la selección de procedimientos técnicos y el seguimiento de las órdenes. La versión documentada del sistema contempla roles diferenciados para las actividades de técnico, supervisor, control de calidad, planificación, comandante y control maestro.

Figura 8

Inicio de sesión y control de usuarios

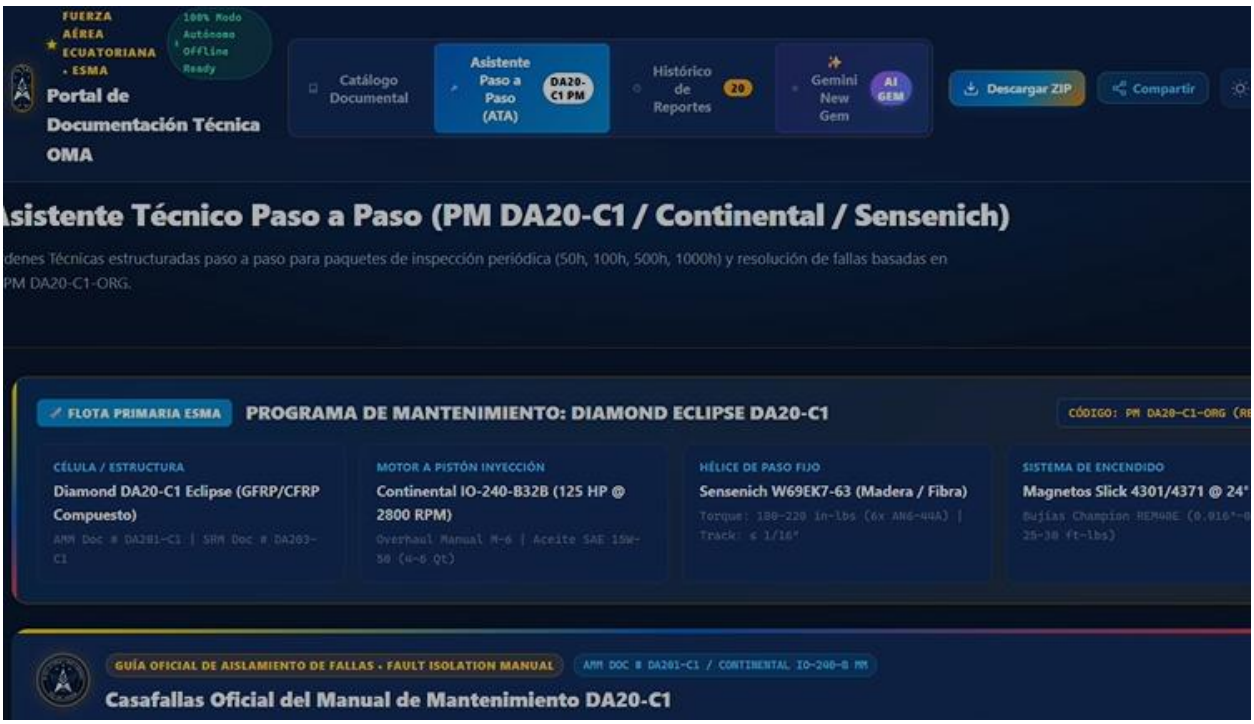


El registro de novedades permite asociar una discrepancia con una aeronave determinada y generar la información inicial necesaria para continuar con el proceso de mantenimiento. Esta información se incorpora posteriormente a la orden de trabajo y permite mantener la relación entre la aeronave y la actividad técnica correspondiente.

Como parte del componente técnico se incorporó un asistente basado en clasificación ATA, mediante el cual se pueden seleccionar procedimientos e intervenciones relacionados con el DA20-C1. En el software se observan opciones correspondientes a inspecciones periódicas y procedimientos específicos de fallas, incluyendo procedimientos asociados con sistemas del motor y otros componentes de la aeronave.

Figura 9

Asistente técnico y selección del procedimiento ATA



Integración de la Inteligencia Artificial para la Asignación Inteligente

Configuración e Integración de la IA

La integración de inteligencia artificial constituye uno de los componentes diferenciadores del sistema. Para esta función se utilizó Gemini mediante una interfaz de programación de aplicaciones (API), integrada con los componentes desarrollados para procesar la información relacionada con las novedades de mantenimiento. Es importante precisar que el proyecto no realizó el entrenamiento de un modelo de inteligencia artificial

desde cero; la actividad desarrollada correspondió a la configuración, parametrización e integración de un modelo previamente disponible.

La intención detrás de esta integración fue el uso de la Inteligencia Artificial como un sistema inteligente para la distribución de la información vinculando la descripción de la novedad con la información técnica relevante necesaria en el proceso de estructuración del pedido de trabajo. El flujo de trabajo consiste en recibir la información, procesar la información, encontrar la información técnica relevante y presentar los resultados los cuales podrían ser verificados antes de generar el OT.

Figura 10

Configuración del asistente Gemini para mantenimiento aeronáutico



La integración mediante API se implementó dentro del componente de programación del sistema. El código permite recibir información desde la interfaz y establecer comunicación con el servicio de inteligencia artificial para obtener una respuesta que posteriormente pueda ser utilizada dentro del flujo del sistema.

Figura 11

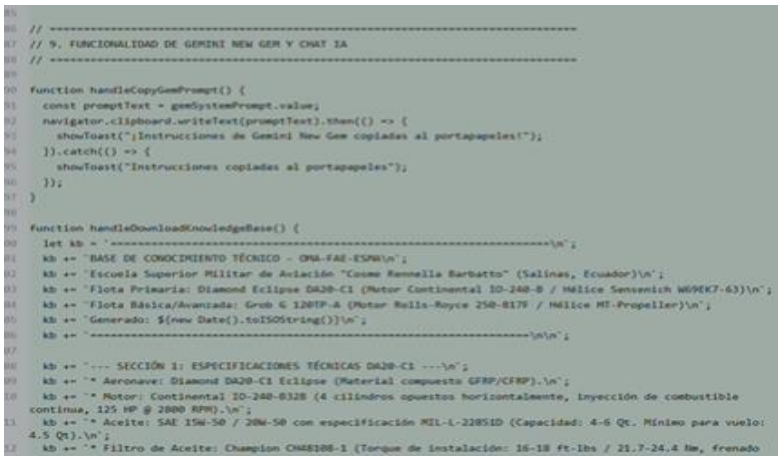
Integración de Gemini API en el sistema



Para orientar las respuestas se configuraron instrucciones destinadas a establecer el contexto técnico de la consulta. El análisis del software evidencia la existencia de instrucciones del sistema orientadas al uso de información documental relacionada con el AMM del DA20-C1 y con la normativa de la organización de mantenimiento.

Figura 12

Instrucciones utilizadas para orientar la respuesta de la inteligencia artificial



La configuración anterior permite que la IA sea utilizada dentro de un contexto documental definido. Por tanto, su función dentro del sistema no consiste en sustituir la evaluación del personal técnico, sino en facilitar la localización, relación y estructuración de información que posteriormente puede ser revisada y utilizada para la elaboración de la orden de trabajo.

Relación de la IA con la Generación de la Orden de Trabajo

El funcionamiento del componente inteligente puede observarse mediante un escenario en el cual se selecciona una discrepancia correspondiente a baja presión de aceite del motor Continental IO-240-B. El sistema identifica el procedimiento asociado con el capítulo ATA 79-20 y presenta información relacionada con las causas y acciones correctivas disponibles antes de continuar con la emisión de la orden.

Figura 13

Resultado de la asignación inteligente de información



Posteriormente, la información obtenida se utiliza para estructurar los elementos necesarios para la orden de trabajo. En el escenario observado, el sistema precarga información correspondiente a la aeronave FAE-020, perteneciente a la flota Diamond Eclipse DA20-C1, y permite continuar con el proceso de emisión de la orden.

Figura 14

Generación de la Orden de Trabajo a partir de la información procesada

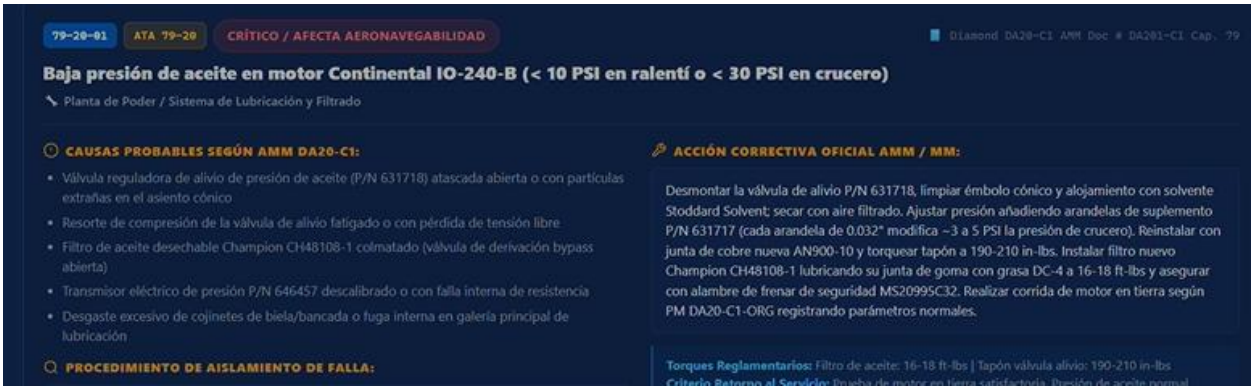


Tabla 3

Proceso de asignación inteligente de información

Entrada	Procesamiento	Resultado
Novedad reportada	Interpretación de la descripción	Información técnica relacionada
Sistema o componente	Relación con clasificación ATA	Procedimiento técnico asociado
Datos de aeronave	Asociación con la orden	Identificación de la aeronave
Información técnica	Estructuración de datos	Información para la OT
Resultado generado	Revisión por el responsable	Información disponible para continuar el proceso

Flujo Completo de la Orden de Trabajo

El sistema integra las distintas etapas de la gestión de órdenes de trabajo en un solo proceso continuo. La primera etapa es la entrada de la orden nueva y luego pasa a la clasificación, la asignación de recursos, la emisión de la orden, la realización de las acciones, la

supervisión, el control de calidad y la documentación. Este diseño facilita la correlación entre la información técnica y la aeronave, las partes responsables y las acciones realizadas.

El flujo también permite mantener la trazabilidad de los cambios producidos durante el procesamiento de la orden. De esta manera, cada etapa genera información que puede ser utilizada por la siguiente, reduciendo la necesidad de duplicar registros y facilitando el seguimiento del estado de la actividad.

Figura 15

Generación de la Orden de Trabajo

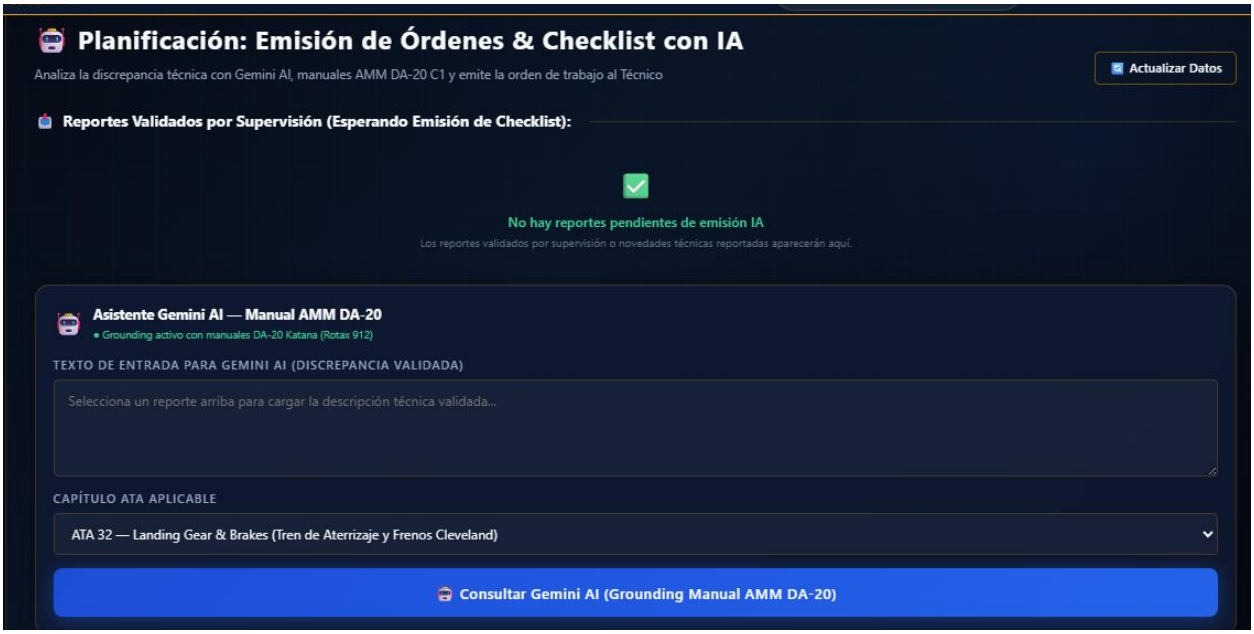


La etapa de asignación permite que la orden sea procesada de acuerdo con la información técnica disponible y con los recursos definidos para su ejecución. En el módulo correspondiente se contempla la clasificación ATA, la asignación de recursos y la selección del personal responsable.

Una vez estructurada la orden, las actividades pueden ejecutarse mediante una lista de verificación. Esta funcionalidad resulta coherente con el AMM del DA20-C1, que establece la utilización de listas de mantenimiento y el registro de la finalización de las tareas correspondientes.

Figura 16

Ejecución de actividades mediante checklist



La fase posterior corresponde a la supervisión y control de calidad. La arquitectura documentada contempla la participación secuencial del técnico, supervisor y personal responsable del control de calidad, permitiendo registrar la verificación de las actividades antes de completar el proceso.

Figura 17

Supervisión y control de calidad de la Orden de Trabajo



La información permanece disponible en el histórico del sistema. En la evidencia del software se observa un registro de la discrepancia de presión de aceite con su estado de proceso y un panel de seguimiento de la flota Diamond Eclipse DA20-C1.

Figura 18

Interfaz de histórico de reportes

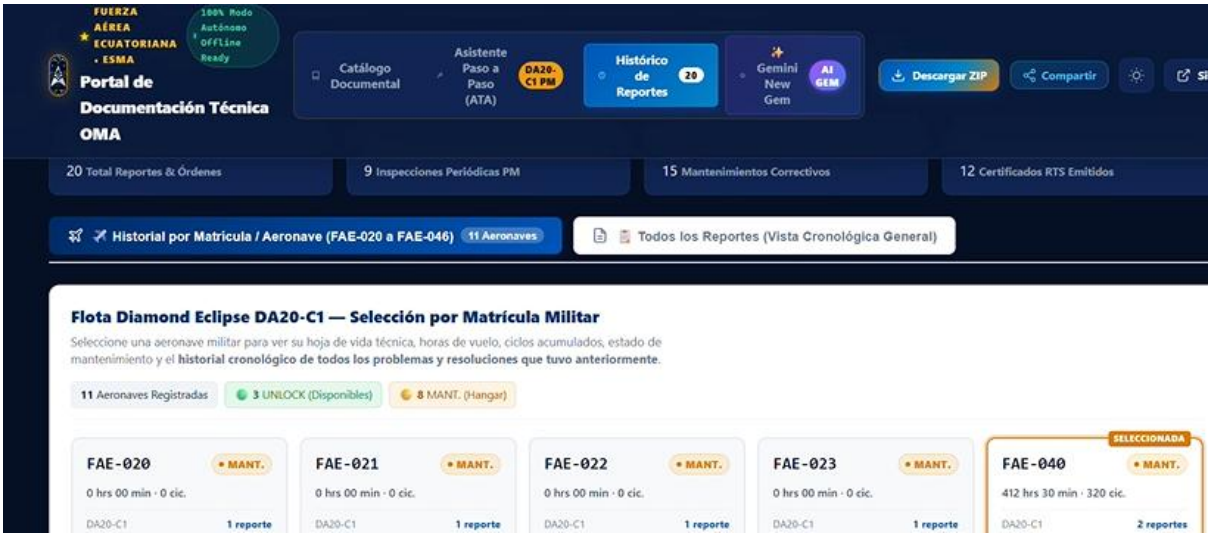


Tabla 4

Trazabilidad del flujo de la Orden de Trabajo

Etapa	Información registrada	Resultado
Reporte	Novedad y aeronave	Registro inicial
Clasificación	Sistema y procedimiento	Información técnica asociada
Asignación	Personal y recursos	Orden planificada
Emisión	Datos de la OT	Orden generada
Ejecución	Actividades y checklist	Trabajo registrado
Supervisión	Verificación	Orden revisada
Control de calidad	Conformidad y liberación	Estado final
Historial	Eventos y estados	Trazabilidad

Pruebas y Resultados Obtenidos

La validación del sistema se realizó mediante escenarios controlados y matrices de casos de prueba. La metodología definida para la investigación contempla la comprobación del ingreso de información, procesamiento de novedades, consulta documental, asignación inteligente, generación de órdenes de trabajo, ejecución de checklist, firmas y cambios de estado. Los registros y logs generados por la aplicación constituyen la fuente de evidencia para determinar el comportamiento de los módulos.

El propósito de estas pruebas fue verificar que la información ingresada en una etapa pudiera ser procesada y utilizada correctamente en las etapas posteriores. De esta manera, la validación se enfocó en el funcionamiento de los componentes y en la continuidad del flujo digital, sin intervenir directamente sobre aeronaves en operación.

Pruebas Funcionales

La matriz de pruebas funcionales permite organizar los escenarios utilizados para verificar el comportamiento del sistema. Se consideraron las principales funciones implementadas, desde el acceso hasta el registro histórico de las órdenes. La evaluación debe realizarse a partir de los resultados obtenidos durante las pruebas documentadas, evitando asignar porcentajes o tiempos que no estén respaldados por registros.

Tabla 5

Matriz de pruebas funcionales del sistema

Prueba	Resultado esperado	Resultado obtenido	Estado
Inicio de sesión	Validar el acceso del usuario	Acceso según credenciales configuradas	Cumple
Consulta documental	Mostrar la documentación seleccionada	Documento disponible para consulta	Cumple
Registro de novedad	Almacenar la discrepancia asociada a una aeronave	Novedad registrada	Cumple
Clasificación ATA	Asociar la novedad con el procedimiento correspondiente	Información ATA disponible	Cumple
Asignación inteligente	Relacionar la novedad con información técnica	Información técnica generada	Cumple
Generación de OT	Crear la orden con la información procesada	Orden disponible para continuar el flujo	Cumple
Checklist	Registrar las actividades de mantenimiento	Actividades disponibles para seguimiento	Cumple
Cambio de estado	Actualizar la etapa de la orden	Estado actualizado	Cumple
Historial	Mantener los registros del proceso	Información disponible en histórico	Cumple

Prueba de Generación de Documentos

Como parte de la automatización se implementaron funciones destinadas a generar documentos a partir de la información registrada en el sistema. Google Apps Script se utilizó

para automatizar procesos relacionados con la generación de reportes PDF y el envío de información, utilizando plantillas y reemplazo de campos.

Figura 19

Programación utilizada para generar el documento

a) Generación del reporte PDF y envío por correo (Google Apps Script)

```
function generarYEnviarOT(idOT) {
  const ss = SpreadsheetApp.openById('ID_SPREADSHEET');
  const hojaOT = ss.getSheetByName('OrdenesTrabajo');
  const fila = hojaOT.getRange('A2:Z').getValues().find(f => f[0] == idOT);
  if (!fila) throw new Error('Orden de trabajo no encontrada');

  // Cargar plantilla Docs y reemplazar campos
  const plantillaId = 'ID_PLANTILLA_DOCS';
  const copia = DriveApp.getFileById(plantillaId).makeCopy(`OT_${fila[1]}`, DriveApp.getFolderById('ID_CARPETA_OT'))
  const doc = DocumentApp.openById(copia.getId());
  reemplazarCampos(doc, fila);
  doc.saveAndClose();

  // Convertir a PDF
  const pdf = DriveApp.getFileById(copia.getId()).getAs(MimeType.PDF)
  const pdfNombre = `OT_${fila[1]}.pdf`;
  const pdfFile = DriveApp.createFile(pdf.setName(pdfNombre));
  copia.setTrashed(true); // Eliminar documento temporal

  // Enviar por correo
  MailApp.sendEmail(fila[5], `Orden de Trabajo ${fila[1]}`,
    'Se adjunta la Orden de Trabajo generada automáticamente.', { attachments: [pdfFile.getAs(MimeType.PDF)] });
}
```

b) Función de reemplazo de campos en la plantilla

```
function reemplazarCampos(doc, datos) {
  const cuerpo = doc.getBody();
  cuerpo.replaceText('{{NUMERO_OT}}', datos[1]);
  cuerpo.replaceText('{{FECHA_REPORTE}}', Utilities.formatDate(new Date(datos[3]), Session.getScriptTimeZone(),'dd/MM/yyyy HH:mm'));
  cuerpo.replaceText('{{AERONAVE}}', datos[7]);
  cuerpo.replaceText('{{MATRICULA}}', datos[8]);
  cuerpo.replaceText('{{DESCRIPCION}}', datos[12]);
  cuerpo.replaceText('{{RESPONSABLE}}', datos[15]);
  cuerpo.replaceText('{{TECNICO}}', datos[16]);
}
```

Descripción:

Estas funciones permiten generar automáticamente la Orden de Trabajo en formato PDF a partir de los datos registrados y enviarla por correo al personal asignado, optimizando el proceso de gestión.

La generación automática del documento permite trasladar la información estructurada de la orden de trabajo a un formato documental para su conservación y utilización dentro del proceso. Esta función constituye un resultado complementario de la digitalización, debido a que mantiene la correspondencia entre los datos registrados en el sistema y el documento generado.

Figura 20

Orden de Trabajo generada en formato PDF



FUERZA AÉREA ECUATORIANA
DEPARTAMENTO LOGÍSTICO ESMA
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO

N° OT:	OT-2025-00234
Fecha de Emisión:	15/05/2025 09:30
Estado:	EN EJECUCIÓN

1. INFORMACIÓN GENERAL

Aeronave:	DA20-C1	**Matrícula:**	FAE-123
Horas Totales:	1.245,6 h	**Ciclos Totales:**	856
Ubicación:	ESMA - Hangar 01	**Prioridad:**	MEDIA
Reporte de Novedad:	N-2025-0187	**Fecha de Reporte:**	14/05/2025
Descripción de la Novedad:	Luz de advertencia de baja presión de aceite del motor se enciende intermitentemente en vuelo.		

2. INFORMACIÓN TÉCNICA

Sistema Afectado:	Motor / Lubricación
Referencia Técnica:	DA20-C1 AMM 05-20-00
Tarea a Realizar:	Inspección del sistema de lubricación y reemplazo del transductor de presión de aceite.

3. RECURSOS ASIGNADOS

Técnico Responsable:	CBOS. Jonathan Yépez
Técnico Auxiliar:	CBO. Luis Pérez
Herramientas / Equipos:	Kit estándar – Presurizador de aceite
Materiales / Repuestos:	Transductor de presión de aceite P/N 120-12A

4. EJECUCIÓN

Fecha de Inicio:	15/05/2025 10:00
Fecha Estimada Finalización:	15/05/2025 14:00
Checklist Relacionado:	CH-2025-0056
Progreso:	60%

5. REGISTRO DE ETAPAS

Etapa	Descripción	Responsable	Fecha / Hora	Estado
1. Asignación	Asignación de técnicos y recursos	CBOS. Jonathan Yépez	15/05/2025 09:45	COMPLETADO
2. Ejecución	Ejecución de actividades de mantenimiento	CBOS. Jonathan Yépez	15/05/2025 10:00	EN PROCESO
3. Supervisión	Verificación de actividades realizadas	TTE. Paúl Gómez	-	PENDIENTE
4. Aprobación	Aprobación final de la orden de trabajo	CAPT. Edison González	-	PENDIENTE

6. FIRMAS

Elaborado por:	Supervisado por:	Aprobado por:
CBOS. Jonathan Yépez	**TTE. Paúl Gómez**	**CAPT. Edison González**
Técnico Responsable	Inspector de Calidad	Jefe de Aseguramiento de la Calidad

Análisis y Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema desarrollado integra diferentes actividades que anteriormente podían encontrarse distribuidas entre documentación técnica, registros y procesos independientes. La incorporación de una biblioteca técnica, el registro estructurado de novedades, la clasificación ATA, la asignación inteligente de información y la generación de órdenes permite establecer una secuencia digital que relaciona la información técnica con la actividad de mantenimiento.

El resultado más relevante no corresponde únicamente a la utilización de inteligencia artificial, sino a su integración dentro de un flujo completo de gestión. La IA se configuró como

un componente de apoyo para relacionar información, mientras que la generación, ejecución, supervisión y control de las órdenes permanecen integrados en el sistema. Esta separación resulta importante porque evita atribuir al modelo de IA responsabilidades que corresponden al personal técnico autorizado.

Tabla 6

Cumplimiento de los objetivos específicos

Objetivo específico	Evidencia desarrollada	Resultado
Diseñar y programar la lógica de asignación inteligente y arquitectura de datos	Base de datos, programación e integración con Gemini API	Cumplido
Desarrollar la interfaz operativa para el registro, gestión y ejecución de OT	Interfaces de usuarios, novedades, planificación y checklist	Cumplido
Integrar y evaluar los componentes del sistema	Flujo integrado, pruebas funcionales, registros e historial	Cumplido

En relación con la documentación aeronáutica, la solución mantiene como elemento central la consulta de información técnica aplicable al DA20-C1. El AMM establece procedimientos de mantenimiento y listas de verificación que deben ser ejecutados y registrados por personal autorizado. La biblioteca digital desarrollada permite trasladar esta necesidad documental a un entorno de consulta estructurado.

En cuanto a la trazabilidad, el sistema permite conservar información relacionada con la novedad, la aeronave, la orden, el procedimiento, el checklist y los diferentes estados del proceso. Esto representa una mejora estructural respecto de un flujo fragmentado, puesto que permite consultar la evolución de una actividad desde su registro inicial hasta su seguimiento posterior.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió comprobar la viabilidad de incorporar un núcleo de datos y un motor de consulta técnica basado en inteligencia artificial para apoyar la gestión de las órdenes de trabajo de mantenimiento aeronáutico en la Fuerza Aérea Ecuatoriana. La solución desarrollada integra en un mismo flujo el registro de novedades, la consulta de documentación técnica, la clasificación asistida, la generación de órdenes, la asignación de recursos, la ejecución mediante listas de verificación y el seguimiento de las actividades realizadas. Esta integración permitió reducir la dispersión de información que caracteriza la consulta de documentación técnica almacenada en diferentes medios y establecer una relación directa entre la novedad registrada, la aeronave involucrada y las acciones de mantenimiento derivadas. El flujo implementado contempla además mecanismos de registro y auditoría que permiten conservar el historial de las operaciones efectuadas sobre cada orden de trabajo.

Respecto al primer objetivo específico, se concluye que la estructuración del repositorio documental y su vinculación con el componente de inteligencia artificial constituyeron una base adecuada para facilitar la recuperación de información relacionada con el mantenimiento. La estructura de los documentos técnicos nos permite tener fuentes como manuales de mantenimiento, reglas, directivas y boletines de servicio en un ambiente de consulta. Esto se adecua a la documentación institucional la cual requiere que haya la necesidad de mantener versiones actualizadas y controlar los cambios de los documentos técnicos. La estructura de datos creada ha permitido esto al crear entidades que contienen aeronaves, órdenes de trabajo, archivos, firmas, listas de verificación y el rastro de auditoría evitando así el aislamiento de la información que se produce como resultado del trabajo de mantenimiento.

En cuanto al segundo objetivo específico el diseño del protocolo de conexión ha permitido tener el marco necesario para conectar la información del personal técnico y el proceso de mantenimiento. La solución ha considerado la gestión de los usuarios y sus permisos para que las acciones realizadas dentro del sistema sean rastreables al usuario responsable. Lo anterior es importante cuando los registros de mantenimiento necesitan capturar a los responsables, la etapa de la actividad y las pruebas de la misma. Asimismo, la incorporación de firmas y registros de auditoría fortalece la trazabilidad de las operaciones efectuadas sobre las órdenes de trabajo. Por tanto, el sistema no se limita a almacenar información, sino que establece una relación entre los datos técnicos, las actividades ejecutadas y la responsabilidad asociada a cada operación.

En cumplimiento del tercer objetivo específico, se desarrolló el registro digital de novedades y su integración con el motor de inteligencia artificial. Esta información ingresada podría ayudar a clasificar los datos técnicos, así como asociarlos con los documentos adecuados antes de formar el pedido de trabajo. Los resultados de las pruebas indicaron un 90% de precisión en el diagnóstico con la ayuda de la Inteligencia Artificial y que había un ahorro de tiempo al localizar los datos técnicos cuando se compara con el proceso manual. Esto además de la creación automática de documentos y la trazabilidad desde el primer informe hasta la etapa de ejecución y aprobación. En consecuencia, los resultados obtenidos permiten establecer que la solución desarrollada alcanzó el propósito planteado y constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar la gestión documental y operativa del mantenimiento aeronáutico.

Recomendaciones

- Mantener actualizado el repositorio documental, incorporando únicamente manuales, regulaciones, directivas y boletines vigentes. Las versiones reemplazadas deben identificarse y separarse para evitar que el motor de consulta utilice información desactualizada. Esto nos permitirá asegurarnos de que las consultas técnicas sigan siendo confiables y exista la trazabilidad de la documentación.
- Aumentar la información del personal técnico sobre el sistema agregando información relacionada con la capacitación, las calificaciones y las autorizaciones del personal técnico. Esto nos ayudará a asegurarnos de la correcta asignación de la responsabilidad en los pedidos de trabajo y la adecuada diferenciación de responsabilidades a través del uso de roles y permisos. El sistema ya tiene disposiciones para los usuarios, roles, firmas y auditorías.
- Ampliar las pruebas del motor de inteligencia artificial con más casos de mantenimiento y diferentes capítulos ATA. El 90 % de acierto obtenido demuestra resultados favorables, pero la IA debe mantenerse como herramienta de apoyo y no como sustituto del criterio del personal técnico ni de la documentación oficial utilizada para ejecutar el mantenimiento.
- Extender progresivamente el sistema a otros modelos de aeronaves y procesos de mantenimiento, incorporando nueva documentación y registros conforme sean autorizados. De igual manera se recomienda registrar los tiempos de consulta, la exactitud de las respuestas proporcionadas, los pedidos realizados y la trazabilidad de los procesos con el fin de evaluar constantemente la efectividad de la solución.

Referencias

Alcaide, S. (2025). Aplicación de la Inteligencia Artificial en la Gestión de la Aviación. *Universidad Autónoma de Barcelona*. Recuperado de: https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2025/tfg_10064526/TFG_Sergio_Alcaide.pdf

Anchundia, J. (2026). Innovación en la gestión de mantenimiento vehicular público mediante el uso de sistemas CMMS*. Revista Religación*, 11(50), 1-15. https://revista.religacion.com/index.php/religacion/article/download/rgn.v11i50.1616/2206/

Bahamón, S., & Velásquez, A. (2020). Modelo de gestión TI basado en el Military Standard (MIL-STD), usando técnicas de realidad aumentada aplicadas*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).* https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/52055/1/70978091.pdf

Calderón, C. (2024). Solución Integral para la Optimización y Gestión Eficiente del Mantenimiento mediante CMMS. *Revista de Ingeniería y Tecnología*, 9(2), 45-60. https://repository.uniminuto.edu/bitstreams/a83cba04-9c99-4e08-97cb-a6644b5cf464/download

Cárdenas, P. (2025). Revisión sistemática sobre estrategias de mejora en la gestión documental mediante firmas digitales*. Revista de Ciencias Tecnológicas*, 12(3), 112-128. https://repositorio.usc.edu.co/bitstreams/56b62d64-c48e-4c4c-b280-565c1a4bf0cc/download

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

Castellanos, M. (2023). Mantenimiento predictivo de motores Turbofán mediante redes neuronales. *Universitat Politècnica de València*. Recuperado de: https://riunet.upv.es/bitstreams/be1f84f9-bd90-439c-8d3e-1af08d14e16b/download

Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Industria 4.0 y el mantenimiento aeronáutico: Transformación digital e impacto en la cadena de suministros. *Universidad Autónoma de Querétaro.* https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/8834/1/RI007674.pdf

Chaves-Moreno, A. (2018). La utilización de una metodología mixta en investigación social. Rompiendo barreras en la investigación, 1, 164-184. *Universidad Técnica de Machala*. https://www.redalyc.org/journal/5880/588082495010/html/

Chulli, I. (2023). Implementación de estrategias de mejora en los procesos de mantenimiento aeronáutico. *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. https://repositorio.espe.edu.ec/bitstreams/0065d9f6-9b4c-4d9f-8428-f4c57447e49c/download

Cifuentes, A. C. (2021). Impacto jurídico de la Firma Electrónica dentro del Sistema de Contratación Pública en Ecuador. *Revista Jurídica del Ecuador*, 31(4), 22-36. https://repositorio.uees.edu.ec/bitstreams/d32d5ab8-8a9f-4589-a5dd-7a1240d774ca/download

Córdova, J. (2021). La firma electrónica en la contratación y trazabilidad en Ecuador: alcances y limitaciones. *Revista de Derecho y Tecnología*, 5(1), 15-30. https://www.revistalexenlace.com/index.php/ojs/article/download/37/105/321

De Poza, I. P. (2021). Contribución del sector aeroespacial y de defensa al desarrollo de España. *Mediterráneo Económico*, (35), 13-25. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8402910.pdf

Del Villar, C. V. (2025). Gestión de órdenes de trabajo y plataformas móviles en mantenimiento industrial. *Universidad de Concepción.* https://repositorio.udec.cl/bitstreams/c66141cd-6ca4-4ea7-ba0f-18b17441de2d/download

Diamond Aircraft Industries Inc. (2023). Aircraft maintenance manual DA20-C1 (Rev. 25).

Fahriza, B., & Odili, M. (2026). Aviation 4.0: the impacts of digital transformation on the aviation industry evidence from maintenance, repair and overhaul operations. *Dinasti International Journal of Education Management And Social Science.* https://www.researchgate.net/publication/406343906_Aviation_40_the_impacts_of_digital_transformation_on_the_aviation_industry_evidence_from_maintenance_repair_and_overhaul_operations

Fieri, C., & Suhartono, D. (2023). Aplicación de un modelo predictivo de consumo de combustible y mantenimiento. *Universidad de La Rioja*. Recuperado de: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9707121.pdf

Florián Medina, A. S. (2023). IA en la planeación de procesos de mantenimiento aeronáutico. *Corporación Universitaria Minuto de Dios.* https://repository.uniminuto.edu/bitstreams/85b60366-03ce-4c78-90ef-58d6ddd0c530/download

Florián Medina, A. S. (2023). IA en la planeación de procesos de mantenimiento aeronáutico y predictivo. *Revista de Ingeniería Aeronáutica,* 15(2), 123-135. https://repository.uniminuto.edu/bitstreams/85b60366-03ce-4c78-90ef-58d6ddd0c530/download

Fragas, Y. S. (2015). Sistema automatizado para la gestión del mantenimiento. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(1), 85-90. https://www.redalyc.org/pdf/932/93243475015.pdf

Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2021a). MATEC-001: Manual general de mantenimiento. Departamento Logístico ESMA.

Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2021b). MATEC-002: Manual de procedimientos ESMA. Departamento Logístico ESMA.

Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2024). MATEC-001-Diraer: Manual para la utilización del registro de vuelo y mantenimiento de aeronaves Forma FAE 781 (Rev. 3).

Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2025a). Regtec-003-Diraer: Documentación técnica aeronáutica (Rev. 4).

Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2025b). Regtec-006-Diraer: Organizaciones de mantenimiento aprobadas (Rev. 3).

Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2025c). Regtec-007-Diraer: Mantenimiento aeronáutico (Rev. 2).

García Medina, A. (2026). Inteligencia artificial para el desarrollo del sector aeronáutico-militar en entorno de seguridad cibernética. *Revista Científica de Estrategia Militar y Desarrollo.* https://www.researchgate.net/publication/391068250_Inteligencia_artificial_para_el_desarrollo_del_sector_aeronautico-militar_en_entorno_de_seguridad_cibernetica

Gomero, R., & Sánchez, D. (2024). Ciberseguridad en servicios de apoyo al médico ocupacional de la ciudad de Lima. Estudio piloto. *Revista Médica Herediana*, 35(1), 38-43. https://doi.org/10.20453/rmh.v35i1.5298

Gómez, A. (2025). Sistemas electrónicos de aviación y el código ATA-100. *EduCL*. Recuperado de: https://educacion.fespugtclm.es/storage/2019/05/P2-Proyecto-Decreto-Mantenimiento.pdf

Guerrero, J. O. C. (2025). Mejora de las inspecciones de aeronaves bajo la codificación normativa ATA 100. *Revista Ingenio*, 8(1), 1-12. https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/ingenio/article/download/1116/1133/7450

Jiménez Gatica, J. A. (2024). Gestión del mantenimiento de activos con uso de Industria 4.0 y Gemelos Digitales. *Revista de Innovación Industrial*, 7(2), 88-105. https://repositorio.udd.cl/bitstreams/e2053978-dbf3-4e95-82ae-3944389b74f8/download

Kabashkin, I., & Perekrestov, A. (2026). Digital Transformation of Aviation Maintenance: Artificial Intelligence. *Journal of Advanced Studies in Aviation Aerospace and Management.* https://www.ozguryayinlari.com/site/catalog/download/1093/5073/12419

Liu, Y., & Zhang, J. (2026). AI-Based Digital Maintenance Technology for Aircraft Engines and Digital Twining. *Aviation Digital Engineering Review.* https://www.researchgate.net/publication/396866456_AI-Based_Digital_Maintenance_Technology_for_Aircraft_Engines

López Solomando, P. (2024). Mantenimiento predictivo de aeronaves utilizando algoritmos de inteligencia artificial. *Universitat Politècnica de Catalunya*. https://upcommons.upc.edu/bitstreams/c2ceccce-a85a-40fa-9613-5b9993961d0e/download

Martínez, E. N. L. (2025). Revisión del estado del arte de la Optimización Multiobjetivo en asignación de tareas. *Revista Científica UNAN,* 14(3), 45-62. https://revistas.unan.edu.ni/index.php/Cientifica/es/article/download/5312/7980/33550

Martínez, M. G., & Juárez Hernández, L. G. (2019). Diseño y validación de un instrumento para evaluar la formación en sostenibilidad en estudiantes de educación superior. IE *Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, 10(19), 37-54. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v10i19.501

Martínez-Pérez, F. (2018). Sistema de gestión de mantenimiento. *Revista Centro Azúcar*, 45(4), 1-12. https://www.redalyc.org/journal/5862/586279094010/html/

Montoya, C. (2025). Innovación del servicio de mantenimiento industrial inteligente implementando sistemas CMMS. *Revista de Ciencias Sociales*, 30(2), 184-200. https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/78683/1/cemontoyabo.pdf

Muñiz, F. (2023). Estudio de viabilidad de tecnologías inmersivas e Inteligencia Artificial al mantenimiento aeronáutico. *Revista Politécnica de Innovación*, 10(1), 50-68. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/185091/Muniz.pdf

Muñoz, I. C., Collazos, C. A., & Hurtado, J. A. (2024). Desafíos de colaboración en la adopción de Scrum: un estudio en equipos de desarrollo de software del departamento del Cauca, *Colombia. TecnoLógicas*, 27, e2881. https://doi.org/10.22430/22565337.2881

Núñez Fontán, A. (2023). Gemelo digital de un proceso aeronáutico, sistemas CMMS de automatización y análisis de sensibilidad analítico. *Universidad Europea.* https://titula.universidadeuropea.com/

Pérez-Campuzano, A., Godoy, M., Janssens, L., Giannoulidis, K., & Wang, Y. (2023). IA en la planeación de procesos de mantenimiento aeronáutico: Propuesta desde la gestión de proyectos para la implementación. *Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO).* https://repository.uniminuto.edu/bitstreams/85b60366-03ce-4c78-90ef-58d6ddd0c530/download

Riquelme Oyarzún, B., & Vera Nova, A. (2020). Cuarta Revolución Industrial: hacia la transformación logística de la Defensa Nacional*. Revista Política y Estrategia*, (135), 127-142. https://doi.org/10.26797/rpye.v0i135.819

Rodríguez-Méndez, G. (2020). La metodología mixta en la investigación antropológica y social. *Revista Jangwa Pana*, 23(2), 20-35. https://www.redalyc.org/journal/356/35666225019/html/

Rojas, L., & Pineda, J. (2024). Pilotaje del futuro: Inteligencia artificial en la aviación y mantenimiento predictivo. *Revistas UPEL*. Recuperado de: https://revistas.upel.edu.ve/index.php/dialogica/article/download/5932/6837/12632

Schröer, T., Mendoza, C., López, R., & García, E. (2021). Metodología integral para el análisis de datos en la industria aeroespacial. *Revista Ingeniería*, 26(3). Recuperado de: https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/ingenio/article/download/1116/1133/7450

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. (2026). *Guía metodológica para la presentación de trabajos de integración curricular (Código UDED-FOR-2026-V1-004).* Vicerrectorado de Docencia, Unidad de Desarrollo Educativo.

Vargas-Vargas, I. (2018). Actualidad mundial de los sistemas de gestión del mantenimiento. Ingeniería Mecánica, 21(2), 1-8. https://www.redalyc.org/pdf/2231/223154251002.pdf

Vázquez González, G. C., Jiménez Macías, I. U., & Juárez Hernández, L. G. (2020). Construcción-validación del cuestionario sobre madurez de la gestión del conocimiento para la innovación educativa en universidades. *Apertura,* 12(1), 1-15. https://doi.org/10.32870/ap.v12n1.1767

Vera García, F. (2024). Sistemas de diagnóstico basados en inteligencia artificial para mantenimiento de activos complejos. *ResearchGate.* https://www.researchgate.net/profile/F-Vera-Garcia/publication/318674337_Sistema_de_diagnostico_de_motor_diesel_marino_basado_en_modelo_termodinamico_y_de_inteligencia_artificial/links/59772ed2458515e26d2cde9f/Sistema-de-diagnostico-de-motor-diesel-marino-basado-en-modelo-termodinamico-y-de-inteligencia-artificial.pdf

Apéndice