

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD A COMPONENTE CRÍTICO DE AERONAVE CONVENCIONAL

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero/a en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL.

Alumno:

Claudio Alejandro Bastias Maureira

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD A COMPONENTE CRÍTICO DE AERONAVE CONVENCIONAL.

Nombre del candidato(a): Claudio Alejandro Bastias Maureira

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento industrial, con licenciatura en ingeniería

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20/08/2025 ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/08/2025 ; **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que me han apoyado en esta fase tan importante de mi carrera.

A mi profesor guía Carlos Baldi, muchas gracias profesor por su dedicación y paciencia entregada durante toda la fase de desarrollo de mi tesis.

A todos los profesores que sin lugar a dudas nos entregaron las mejores herramientas para llegar a ser excelentes profesionales.

DEDICATORIA

A mis padres por siempre estar presente en cada momento de mi vida, por su cariño y apoyo incondicional, mis viejitos siempre en mi corazón.

A mi familia hermanos, sobrinas y sobrinos por su cariño y apoyo incondicional.

Abuelita en estos momentos no estas junto a nosotros, pero sé que desde arriba junto a dios estas contenta por este nuevo pasito, y sé que siempre estas a mi lado te quiero mucha abuelita abrazos al cielo.

RESUMEN

PALABRAS CLAVE: CONFIABILIDAD, METODOLOGÍA RCM, SISTEMA MOTOR, EFICIENCIA OPERATIVA.

El presente trabajo de título tiene como objetivo mejorar el plan de mantenimiento actual del sistema crítico de la flota de aeronaves T35-Pillan, mediante una propuesta de plan de mantenimiento basada en la metodología RCM. Se justifica su aplicación al sistema motor y a los componentes asociados, debido al alto impacto que generan en los indicadores de disponibilidad de la flota de aeronaves y en los costos de mantenimiento.

En primer lugar, se explicarán conceptos claves sobre el funcionamiento de los diferentes sistemas que forman parte integral de la aeronave T35-Pillan, además de una exposición de la problemática a través de un diagrama de Pareto para demostrar la cantidad de fallas por sistemas y cuáles son los sistemas críticos actualmente debido a su alta tasa que generan de indisponibilidad, seguido de un análisis de criticidad y jerarquización, donde se determinara el sistema critico que actualmente genera un impacto negativo en la flota de aeronaves. Dado el resultado se analizará la implementación de la metodología RCM, lo cual se enfoca en proponer una mejora al actual plan de mantenimiento.

Posteriormente, se realizará un análisis de modo de falla, efectos y criticidad (FMECA) del sistema motor para determinar los modos de falla críticos que presentan un mayor riesgo para la operatividad del motor, evaluando los costos de cada modo de falla de manera cuantitativa, con el fin de obtener una optimización de los recursos y adicionalmente establecer una estrategia de mantenimiento más preventiva para el sistema crítico, lo que permitirá determinar la estrategia más adecuada.

El objetivo de este análisis es aumentar la disponibilidad de la flota de aeronaves mediante la reducción de paros no programados de la aeronave provocado por fallas en los componentes críticos del sistema motor. Se busca incrementar la eficiencia operativa y disminuir de manera progresiva las detenciones no programadas de la flota de aeronaves, lo que permitirá planificar adecuadamente las tareas de mantenimiento, aplicando estrategias eficaces que optimicen el uso de los recursos empleados. Finalmente, en el capítulo 3 se discutirá la evaluación técnica y económica con el actual plan de mantenimiento y la implementación de un plan basado en la metodología RCM donde se demostrará, la importancia de contar con un plan estructurado basado en la metodología RCM, para la confiabilidad de la flota de aeronaves y al mismo tiempo la optimización de los costos de mantenimiento.

ÍNDICE

RESUMEN	
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVO ESPECÍFICO	2
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y ANALISIS DE CRITICIDAD Y JERARQUIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LA AERONAVE.	3
1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA	4
1.2. CERTIFICACIONES	5
1.2.1. CERTIFICADO DE APROBACIÓN CMA DAN 145	5
1.3. CONTEXTO OPERACIONAL	7
1.3.1. ORGANIGRAMA DIVISIÓN AVIONES DE INSTRUCCIÓN	8
1.3.2. ORGANIZACIÓN DE LA DIVISIÓN DE AVIONES DE INSTRUCCIÓN	8
1.3.3. PROCESO DE INSPECCIÓN DE AERONAVE EN MANTENIMIENTO	9
1.4. DESCRIPCIÓN DE LA AERONAVE T35-PILLAN	10
1.4.1. SISTEMA DE PROPULSIÓN	11
1.4.2. HÉLICE	11
1.4.3. SISTEMA DE COMBUSTIBLE	11
1.4.4. SISTEMA DE CONTROLES DE VUELO	12
1.4.4.1. PEDALES Y BASTÓN	12
1.4.4.2. COMPENSADORES	12
1.4.4.3. FLAPS	12
1.4.5. SISTEMA HIDRAULICO	13
1.4.5.1. COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO	13
1.4.5.2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE FRENOS	13
1.4.6. SISTEMA DE VENTILACIÓN	14
1.4.7. SISTEMA DE CALEFACCIÓN	14
1.4.8. SISTEMA ANTIVAHU DEL PARABRISAS	14
1.4.9. SISTEMA ELECTRICO	14
1.4.10. STEMA DE COMUNICACIONES Y NAVEGACIÓN	15
1.4.11. SISTEMA DE INSTRUMENTOS	15
1.5. TIPOS DE MANTENIMIENTO REALIZADOS POR LA DIVISIÓN DE AVIONES DE INSTRUCCIÓN	15
1.5.1. INSPECCIONES DE LA AERONAVE T-35 PILLAN	16

1.5.2.	INSPECCIONES DEL MOTOR	16
1.6.	PROBLEMÁTICA	17
1.7.	ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y MÉTODO DE JERARQUIZACIÓN	19
1.7.1.	ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE LOS SISTEMAS DE LA AERONAVE	22
1.8.	ANÁLISIS DEL SISTEMA MOTOR	23
 CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM A SISTEMA CRÍTICO.		24
2.1.	MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM	25
2.2.	TAXONOMÍA SEGÚN NORMA ISO 14224	26
2.3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO MOTOR LYCOMING IO-540-K1K5	27
2.4.	CONTEXTO OPERACIONAL	28
2.5.	FUNCIÓN DEL SISTEMA MOTOR	29
2.5.1.	FUNCIÓN PRIMARIA	29
2.5.2.	FUNCIÓN SECUNDARIA	29
2.6.	FALLAS FUNCIONALES	30
2.7.	MODOS DE FALLA	30
2.8.	ANÁLISIS DE MODO DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD	31
2.8.1.	CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO	33
2.8.2.	CUALIFICACIÓN DEL RIESGO	33
2.8.3.	ANÁLISIS DE JERARQUIZACIÓN DE SEVERIDAD DE LOS MODOS DE FALLA DEL SISTEMA MOTOR	34
2.9.	DIAGRAMA DE DECISIÓN DEL RCM PARA LA SELECCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO	36
2.9.1.	ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN DE FALLAS	37
2.9.2.	HOJA DE DECISIÓN DEL RCM	39
 CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS FRENTE AL ESQUEMA ACTUAL.		40
3.1.	PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD	41
3.2.	ELABORACIÓN DE ORDENES DE TRABAJO	43
3.2.1.	CHECKLIST	51
3.3.	COMPARACIÓN DE COSTOS	52
CONCLUSIÓN		54
RECOMENDACIONES		55
BIBLIOGRAFÍA		56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Empresa Nacional Aeronáutica de Chile (ENAER) planta El Bosque	5
Figura 1-2: Certificado de Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA).	6
Figura 1-3: División de Aviones de Instrucción T35-Pillan	7
Figura 1-4: Organigrama división de aviones de instrucción	8
Figura 1-5: Proceso de inspección de aeronave en mantenimiento	9
Figura 1-6: Avión de instrucción básica T35-Pillan	11
Figura 1-7: Diagrama Pareto, correspondiente a fallas por sistema	17
Figura 1-8: Matriz de criticidad	22
Figura 2-1: Niveles taxonómicos aplicado al caso de estudio, según Norma ISO 14224	26
Figura 2-2: Motor Lycoming IO-540-K1K5, perteneciente a la aeronave T35-Pillan	27
Figura 2-3: Diagrama SIPOC del contexto operacional	29
Figura 2-4: Árbol de decisión RCM	37
Figura 3-1: Pauta de trabajo de inspección, limpieza y ajuste de bujías	43
Figura 3-2: Pauta de trabajo de limpieza, inspección y medición de condensador de magnetos RH y LH	44
Figura 3-3: Pauta de trabajo de limpieza e inspección de boquillas de descarga	45
Figura 3-4: Pauta de trabajo de inspección, prueba de continuidad y de voltaje a arnés de encendido RH y LH.	46
Figura 3-5: Pauta de trabajo de inspección, limpieza y ajuste de platinos de magnetos rh y rh	47
Figura 3-6: Pauta de trabajo de cambio de bomba mecánica de combustible	48
Figura 3-7: Pauta de trabajo de limpieza de filtro de servo inyector de combustible	49
Figura 3-8: Pauta de trabajo de cambio de servo inyector de combustible	50
Figura 3-9: Checklist prueba de motor	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Escala de ponderación (FF).	20
Tabla 1-2: Escala de ponderación (IO).	20
Tabla 1-3: Escala de ponderación (FO).	20
Tabla 1-4: Escala de ponderación (CM).	21
Tabla 1-5: Escala de ponderación (SHA).	21
Tabla 1-6: Análisis de criticidad por cada sistema de la aeronave T35-Pillan.	22
Tabla 2-1: Análisis de modo de falla, efectos y criticidad (FMECA).	31
Tabla 2-2: Jerarquización de los modos de fallas.	34
Tabla 2-3: Hoja de decisión del RCM.	39
Tabla 3-1: Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad y costos asociados a tareas de mantenimiento.	41
Tabla 3-2: Comparación de costos.	52

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico 1-1: Diagrama Jack Nife del sistema en estudio.	23
Grafico 2-1: Jerarquización por riesgo.	35

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

RCM: mantenimiento centrado en la confiabilidad

FMECA: Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis).

ISO: Organización Internacional de Normalizacion.

SAE: Sociedad de ingenieros automotrices

BHP: Caballos de fuerza al freno (brake horsepower).

RPM: Revoluciones por minuto.

Ft: Pies

MTTR: Tiempo medio de reparacion (Mean Time to Repair).

INTRODUCCIÓN

En la industria aeronáutica el mantenimiento de las aeronaves representa un pilar fundamental para garantizar la calidad, la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones aéreas. La correcta gestión del mantenimiento se ha convertido en una herramienta clave para cumplir con estos desafíos, especialmente en aeronaves de instrucción que operan con alta frecuencia y bajo condiciones exigentes como es el caso del avión T35 Pillan, reconocido por ser un avión de instrucción primaria para pilotos en formación, el cual destaca por su robustez y versatilidad. No obstante, como cualquier aeronave, requiere de prácticas de mantenimiento sistemáticas que garanticen la calidad de los trabajos y seguridad operacional. La disponibilidad de aeronaves genera un impacto directo en la planificación de vuelos de entrenamiento y también repercute en la seguridad operativa. Bajo este contexto es de especial relevancia la implementación de la metodología RCM, como una herramienta de mejora continua que contribuye a reducir los impactos negativos que generan las fallas operativas.

A medida que aumentan las exigencias en cuanto a rendimiento, seguridad y costos operacionales, se hace necesario adoptar estrategias de mantenimiento más efectivas, especialmente aquellas que faciliten una gestión preventiva, sobre todo si es orientada a una organización de mantenimiento aeronáutico, como es la División de aviones de instrucción de ENAER, la cual se rige por la normativa y estándares de calidad vigentes. Una de las estrategias más reconocidas en este ámbito es el mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, el cual permite identificar los modos de falla más críticos, evaluar sus consecuencias y definir acciones de mantenimiento adecuadas que optimicen el uso de los recursos disponibles y aseguren la confiabilidad y disponibilidad de la flota de aeronaves. Esta estrategia entrega un marco estructurado basado en datos históricos para el desarrollo de prácticas de mantenimiento efectivas, alineadas con los requisitos técnicos y operativos del sistema que se está analizando.

La finalidad de este informe es analizar y evidenciar los beneficios de aplicar la metodología RCM al sistema crítico de la aeronave T35-Pillan, posicionándola como una herramienta clave para optimizar los planes de mantenimiento y requisitos de inspección, mejorando la confiabilidad y disponibilidad operativa de la flota, contribuyendo así no solo al desempeño de la aeronave, sino que también se busca generar un impacto positivo en la productividad y cultura de mantenimiento confiable dentro de la división de aviones de instrucción.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer una mejora al plan de mantenimiento actual, de la flota de aeronaves T35-Pillan, mediante la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad, para componente crítico que genera una indisponibilidad de la aeronave, entregando actividades de mantenimiento que consideren la seguridad, calidad y medio ambiente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar mediante datos históricos, y registros de mantenimiento, una matriz semi cuantitativa de riesgo, identificando el sistema/componente crítico de la aeronave, determinando la problemática presente en la aeronave.
- Proponer la implementación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, a componente critico que genera impacto en la actividad operacional, elaborando las tareas de mantenimiento que consideren la seguridad, calidad y medio ambiente.
- Validar técnica y económicamente las tareas propuestas, mediante diversos indicadores, entregando opciones a la organización, que les permita la toma de decisiones.

**CAPITULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y
JERARQUIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LA AERONAVE**

1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

La Empresa Nacional de Aeronáutica de Chile (ENAER), es reconocida nacional e internacionalmente por su extensa trayectoria en el rubro del mantenimiento aeronáutico. La empresa fue fundada en el año 1984 bajo la ley N° 18.297. la cual estaba centrada en el mantenimiento aeronáutico, con el pasar del tiempo expandió sus operaciones hacia la fabricación de aeronaves y montaje de aerestructuras. Uno de sus proyectos más destacados es la producción masiva del avión de entrenamiento militar básico T-35 Pillan, el cual fue desarrollado en colaboración con la empresa estadounidense Piper Aircraft y a la vez fabricado en las instalaciones de ENAER, con el fin de satisfacer las necesidades de la Fuerza aérea de Chile como aeronave de instrucción primaria.

ENAER también se dedica a prestar servicios de mantenimiento y modernización de aeronaves civiles y militares, motores y componentes aeronauticos. La empresa se enfoca en desarrollar diversos proyectos de solución y modificación aeronáutica, abarcando distintos materiales aéreos, mediante soluciones que consideran todas las etapas del proceso de ingeniería requerido.

Se destaca también por ser una empresa que presta servicios relacionados a la calibración y certificación de herramientas e instrumentos del rubro aeronáutico, siendo reconocida como laboratorio custodio de patrones nacionales en diversas magnitudes físicas. Adicionalmente se ofrecen servicios de análisis de laboratorios para productos aeronáuticos y realización de estudios e investigaciones, asesorías y asistencia técnica aplicadas al ámbito aeronáutico.

Con el objetivo de ampliar sus capacidades en sus productos y servicios, ENAER ha implementado una política de negocios enfocada en la logística, la cual permite a las diferentes compañías del rubro aeronáutico acceder a un sistema de adquisiciones eficiente, con altos estándares de calidad y rigurosos controles que garantizan el suministro de materiales para soportar el mantenimiento aeronáutico conforme a las normas de calidad nacionales e internacionales vigentes.

La Empresa Nacional Aeronáutica de Chile (ENAER), se encuentra ubicada en Gran Avenida José Miguel Carrera 11087, comuna El Bosque, región metropolitana, Santiago de Chile



Fuente: Google Maps

Figura 1-1: Empresa Nacional Aeronáutica de Chile (ENAER) Planta El Bosque

1.2. **CERTIFICACIONES**

La Empresa Nacional Aeronáutica de Chile (ENAER), cuenta con una variedad de certificaciones y acreditaciones otorgadas por fabricantes aeronáuticos y organismos nacionales e internacionales, garantizando un alto estándar de calidad y tecnología al servicio del mercado aeronáutico.

Entre sus certificaciones y habilitaciones que posee ENAER, se incluye el Certificado de Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) N° 121, el cual es otorgado por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), con el fin de respaldar su capacidad para efectuar trabajos de mantenimiento conforme a los estándares de calidad establecidos y normativa vigente.

1.2.1. **CERTIFICADO DE APROBACIÓN CMA DAN 145**

Documento mediante el cual la DGAC certifica que un CMA cumple con todos los requisitos técnicos y administrativos establecidos en la reglamentación, para efectuar mantenimiento en aeronaves matriculadas en el estado de Chile, motores, hélices o en sus componentes con las habilitaciones y limitaciones establecidas en el mismo (Norma DAN 14, ED 2 / JUN 2011, p 2).



REPÚBLICA DE CHILE

DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL

CERTIFICADO DE

CENTRO DE MANTENIMIENTO AERONÁUTICO

Nº 121

Este certificado es emitido para:

EMPRESA NACIONAL AERONAUTICA

Cuya dirección es:

AVDA. JOSE MIGUEL CARRERA Nº 11087, SANTIAGO

Por cuanto esta organización cumple con todos los requisitos establecidos por la Dirección General de Aeronáutica Civil, para efectuar trabajos técnicos aeronáuticos. Se otorga el presente certificado, en conformidad a la Normativa Aeronáutica aplicable, con las siguientes habilitaciones:

Estructura de Aeronaves	Clase 2, Clase 4	Limitado
Motores de Aeronaves	Clase 1, Clase 2, Clase 3	Limitado
Hélices	Clase 1, Clase 2	Limitado
Accesorios	Clase 1	Limitado
Servicios Especializados		Limitado

Las habilitaciones y limitaciones del presente certificado, están establecidas en la Lista de Capacidad aprobada para este CMA.

Este certificado, a menos que se renuncie a él, o que la Dirección General de Aeronáutica Civil DGAC, lo suspenda o cancele, mantendrá su vigencia hasta el :INDEFINIDA

OTORGADO EL: 09/03/2023

REV Nº: 1

JORGE T. AGUIRRE MOLTEDO

Firmado digitalmente por JORGE T. AGUIRRE MOLTEDO

Fecha: 2023.03.14 07:24:39 -03'00'

JORGE TOMÁS AGUIRRE MOLTEDO

SUBDEPTO. TRANSPORTE

PÚBLICO ENCARGADO

La presente autorización se refiere únicamente al cumplimiento de los requisitos técnico-aeronáuticos cuya fiscalización corresponde a la D.G.A.C. y por lo tanto, se confiere sin perjuicio de las autorizaciones y permisos que el interesado deba requerir ante otras autoridades u organismos competentes. Asimismo este Certificado es intransferible y cualquier cambio de las instalaciones, o de su ubicación debe ser informado a la D.G.A.C.

DGAC 08/2-4

Fuente: Enaer

Figura 1-2: Certificado de Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)

1.3. CONTEXTO OPERACIONAL

La División de Aviones de Instrucción (DAI) es una organización de mantenimiento que forma parte de la Empresa Nacional Aeronáutica de Chile ENAER. Actualmente es la encargada de ejecutar tareas de mantenimiento programado y tareas de mantenimiento correctivo a la flota de aeronaves T35-Pillan.

Tiene como misión generar la disponibilidad de aeronaves, exigida por el contrato de mantenimiento de campaña acordado entre ENAER y la Fuerza Aérea de Chile para la flota de aeronaves correspondientes a la Escuela de Aviación, logrando con lo anterior el cumplimiento de sus respectivos programas de entrenamiento y cursos de vuelo.

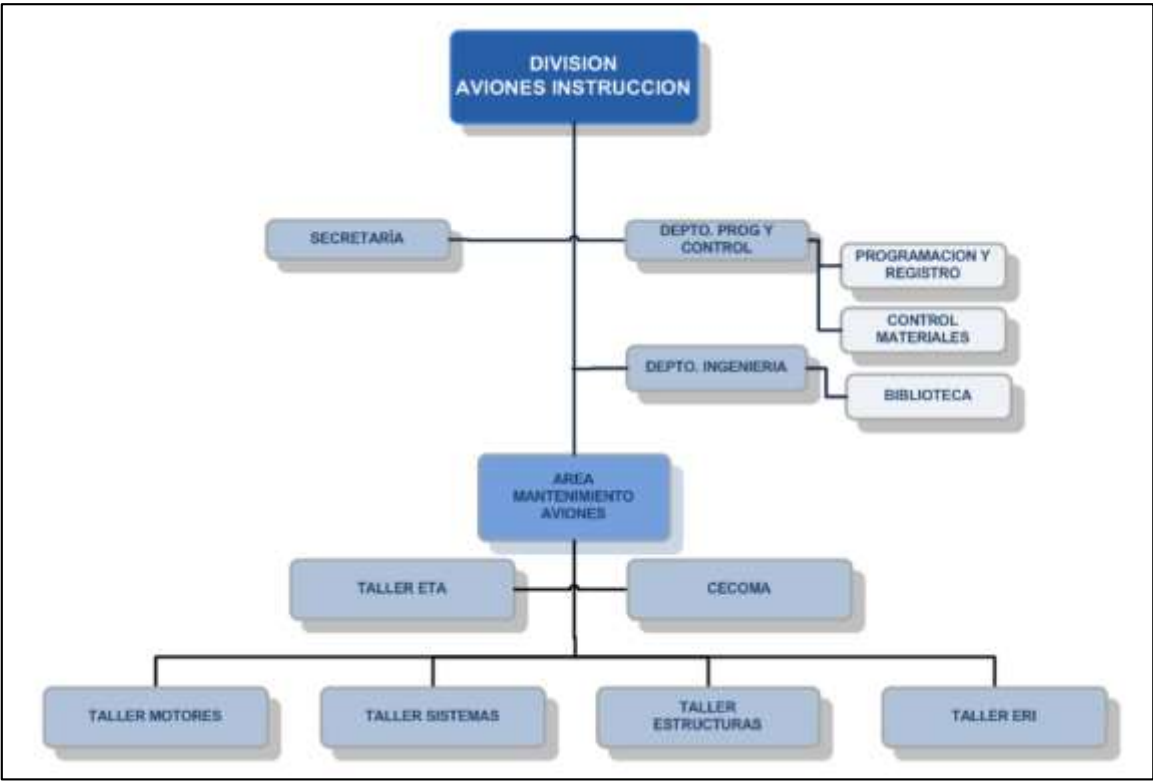


Fuente: ENAER – División de Aviones de Instrucción

Figura 1-3: División de aviones de Instrucción T35-Pillan.

1.3.1. ORGANIGRAMA DIVISI3N AVIONES DE INSTRUCCI3N

La Divisi3n de Aviones de Instrucci3n, posee una estructura organizativa bastante s3lida, lo cual le permite realizar una gesti3n eficiente en las diferentes 1reas y procesos, abarcando desde la planificaci3n y control de materiales hasta la ejecuci3n de las tareas de mantenimiento realizadas por los diferentes talleres seg3n especialidad. A continuaci3n, se presenta el organigrama de la divisi3n, donde se especifican los distintos departamentos y talleres que la conforman actualmente.



Fuente: Empresa Nacional Aeron1utica de Chile ENAER

Figura 1-4: Organigrama Divisi3n de Aviones de Instrucci3n.

1.3.2. ORGANIZACI3N DE LA DIVISI3N DE AVIONES DE INSTRUCCI3N

La Divisi3n de Aviones de Instrucci3n se compone de los siguientes Departamentos:

- Departamento de Programaci3n y Control, integrado por Sub Dpto. Programaci3n y Registro y el Sub Dpto. de Control de Materiales.
- Departamento de Ingenier1a.
- Centro Coordinador de Mantenimiento (CECOMA).
- Seguridad operacional y medio ambiente (SOMA).
- 1rea Productiva integrada por:
 - 1) Supervisores y jefes de talleres.
 - 2) Taller de Motores.

- 3) Taller de Sistemas.
- 4) Taller de Estructuras.
- 5) Taller ERI.
- 6) Taller de Equipos Terrestres de Apoyo (ETA)
- Oficina de Seguridad e Instalaciones de Hangar.
- Secretaria

1.3.3. PROCESO DE INSPECCIÓN DE AERONAVE EN MANTENIMIENTO



Fuente: D.A.I. ENAER

Figura 1-5: Proceso de inspección de aeronave en mantenimiento

Del diagrama de flujo anteriormente expuesto, se desprende el proceso de inspección de una aeronave que ingresa a mantenimiento, Como primer paso se comienza por realizar la programación de la aeronave, a través de un software especializado de mantenimiento. Este sistema genera automáticamente el aviso de inspección, lo que permite dar inicio a las siguientes etapas del procedimiento.

Posteriormente se coordina una reunión de pre inspección en la que participan todos los involucrados del área productiva. En esta reunión, participan los especialistas, el centro coordinador de mantenimiento (CECOMA), el supervisor designado, el inspector de calidad y un representante del departamento de programación y control. En esta reunión se definen los plazos, materiales y los repuestos necesarios que serán utilizados para las tareas de inspección.

El área productiva se encarga de trasladar la aeronave al hangar para dar inicio a las primeras tareas de mantenimiento, estas incluyen la descarga de combustible, el elevado del avión en gatas, entre otras actividades preparatorias.

Realizadas las tareas de inspección programada, se procede a realizar las pruebas en tierra con el fin de monitorear y certificar el correcto funcionamiento de cada sistema. Una vez completadas la ejecución de tareas finales, comienza el cierre de documentación en el programa de mantenimiento y se prepara la entrega de la aeronave para realizar el vuelo de prueba, asegurándose que cumpla con los estándares de calidad y seguridad antes de ser entregada a la línea de operaciones de vuelo.

En la etapa de recepción y registro de la documentación se deja registrado en el historial de la aeronave, el tipo de inspección realizada. Este registro es fundamental para garantizar la trazabilidad de las tareas de mantenimiento efectuadas, ya que, de este modo, se asegura un seguimiento preciso de su historial de mantenimiento, facilitando futuras intervenciones y el cumplimiento de las normativas de calidad establecidas.

1.4. DESCRIPCIÓN DE LA AERONAVE T35-PILLAN

El avión T35-Pillan, fabricado por la Empresa Nacional de Aeronáutica de Chile (ENAER), fue diseñado con el propósito de cumplir los requerimientos de instrucción primaria para pilotos alumnos. Es un monoplano de ala baja construido de metal, de construcción semi-monocoque, con tren de aterrizaje triciclo retráctil. Posee dos cabinas con asientos en tándem, lo que quiere decir, que el asiento trasero está ubicado a mayor nivel, que el asiento delantero, lo cual le permite una mejor visibilidad para la tripulación en todas sus direcciones. Ambas cabinas están equipadas con instrumental completo y controles de vuelo.



Fuente: Enaer

Figura 1-6: Avión de instrucción básica T35-Pillan

1.4.1. SISTEMA DE PROPULSIÓN

El sistema de propulsión, está compuesto por un motor LYCOMING IO-540-K1K5, de seis cilindros horizontalmente opuestos, refrigerados por aire, entrega una potencia de 300 BHP a 2.700 RPM a nivel del mar y utiliza gasolina de aviación con un índice de 100LL octanos.

El motor está equipado con un sistema de inyección directa de combustible, que establece un flujo de combustible proporcional al flujo de aire.

1.4.2. HÉLICE

La hélice HARTZELL, se compone de tres palas, de paso variable y velocidad constante, y es accionada hidráulicamente mediante un gobernador.

1.4.3. SISTEMA DE COMBUSTIBLE

El sistema de combustible del avión está formado por dos estanques de combustible integrales, situados uno en cada ala. Cuenta con una bomba reforzadora eléctrica, llamada bomba booster, la cual se encuentra ubicada en la cabina delantera y es utilizada en las partidas de motor, despegues, aterrizajes, vuelo invertido y ante una falla de la bomba mecánica de combustible accionada por el motor, una válvula selectora de combustible la cual puede ser gobernada desde ambas cabinas. Además, posee una bomba mecánica conectada directamente al motor, un sistema

de inyección de combustible y un sistema de vuelo invertido los cuales se encuentran instalados en cada estanque de combustible de la aeronave.

1.4.4. SISTEMA CONTROLES DE VUELO

Las superficies primarias de control de vuelo como los alerones, el timón de dirección y el elevador pueden ser gobernadas desde ambas cabinas a través del bastón de mando y los pedales. Estos sistemas son fundamentales para mantener la estabilidad, maniobrabilidad y seguridad durante las fases de vuelo de la aeronave. También la aeronave cuenta con superficies secundarias de vuelo como los compensadores y los flaps.

1.4.4.1. PEDALES Y BASTÓN

Los pedales permiten controlar el timón de dirección el cual se encuentra articulado al estabilizador horizontal de la aeronave. El sistema de frenos también se activa al aplicar presión en la parte superior de los pedales, lo cual permite reducir la velocidad en tierra, frenar por completo y el taxeo de la aeronave en tierra.

El bastón de mando controla el movimiento de los alerones los cuales se encuentran ubicados en las alas, así como del elevador que se encuentra ubicado en el estabilizador horizontal de la aeronave.

1.4.4.2. COMPENSADORES

La aeronave cuenta con compensadores en sus tres ejes de control, y pueden ser operados desde ambas cabinas de manera intercambiable. Están diseñados para reducir los esfuerzos sobre los controles del avión. A continuación, se mencionan los distintos compensadores que forman parte de los controles de vuelo de la aeronave.

- Compensador de profundidad
- Compensador de dirección
- Compensador de alerones

1.4.4.3. FLAPS

Los flaps se encuentran ubicados en la parte inferior trasera del ala de la aeronave, y pueden ser actuados mediante un motor eléctrico reversible de corriente continua. Estas superficies de control aerodinámicas en las alas, cumplen la función de incrementar la sustentación de la aeronave durante las distintas fases del vuelo, como el despegue y el aterrizaje.

1.4.5. SISTEMA HIDRÁULICO

El avión cuenta con dos sistemas hidráulicos que funcionan mediante fluido hidráulico: uno se encarga de operar el tren de aterrizaje y el otro está dedicado al sistema de frenos.

El mecanismo hidráulico del tren de aterrizaje utiliza la presión generada por una bomba accionada mediante un motor eléctrico. También, incorpora un sistema que indica la posición del tren de aterrizaje, es decir, si se encuentra en posición arriba o abajo, una válvula de bajada de emergencia y una bocina de alarma, con el fin de advertir al piloto en caso de realizar un aterrizaje sin que el tren de aterrizaje se encuentre en posición abajo y asegurado.

Por otro lado, el sistema de frenos opera de manera independiente, actúa a través de 4 cilindros maestros, uno para cada pedal y dispone de un depósito de fluido hidráulico, el cual se ubica delante del cortafuego del avión.

1.4.5.1 COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO

- Bomba hidráulica
- Líneas hidráulicas
- Cilindros actuadores
- Válvulas de bajada de emergencia
- Interruptor de presión
- Interruptores de posición abajo
- Interruptores de posición arriba
- Interruptor de seguridad en tierra

1.4.5.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE FRENOS

- 4 Cilindros Maestros, uno por cada pedal
- 1 Válvula de freno de estacionamiento
- 2 Conjunto de frenos
- 2 Discos de freno
- 1 Deposito de líquido hidráulico de frenos.

1.4.6. SISTEMA DE VENTILACIÓN

Para la ventilación de ambas cabinas de la aeronave, el flujo de aire es obtenido a partir de 2 tomas de aire, las cuales se encuentran ubicadas en el borde de ataque, cerca de la raíz de cada ala. Este aire es conducido por medio de cañerías rígidas y mangueras flexibles hasta las válvulas de salida, las cuales se encuentran integradas en los paneles laterales de ambas cabinas.

1.4.7. SISTEMA DE CALEFACCIÓN

El sistema de calefacción opera mediante la obtención de aire caliente a partir de una caja metálica que envuelve el múltiple de escape del lado derecho del motor. Dicha caja eleva la temperatura del aire de impacto que ingresa a través de una tobera ubicada en la parte inferior de la capota del motor. Este sistema cuenta con una válvula de control la cual se encuentra ubicada en la zona del cortafuego del motor, la cual se encarga de regular el flujo de aire, que luego es distribuido hacia las cabinas mediante ductos y difusores.

1.4.8. SISTEMA ANTIVAHOS DEL PARABRISAS

El aire necesario para el funcionamiento del sistema antivaho del parabrisas, proviene de la sección media de la caja de aire caliente. El flujo de aire es conducido hacia una válvula de control situada en la parte superior central del mamparo cortafuego. Dicha válvula es operada mediante una palanca de control ubicada en el panel lateral derecho de la cabina delantera. A partir de la válvula de control, el aire circula a través de un ducto flexible hasta un difusor, el cual lo direcciona hacia el parabrisas de la aeronave, con el fin de evitar la acumulación de vaho.

1.4.9. SISTEMA ELÉCTRICO

La aeronave dispone de dos fuentes de energía de corriente continua que alimentan sus sistemas eléctricos: Un alternador como fuente primaria y una batería como fuente secundaria. El sistema eléctrico opera a 28 volts D.C., el cual es alimentado por un alternador de 28 volts, 70 amperes. La batería de 24 volts y 15,5 amperes/hora permite el funcionamiento de los componentes eléctricos del avión, incluso cuando el alternador está fuera de servicio. Para la puesta en marcha del motor se puede realizar por medio de la batería o a través de una fuente de poder externa, llamada unidad de poder terrestre (GPU).

El sistema eléctrico también incluye barras de distribución, paneles de fusibles automáticos, luces interiores de cabina para instrumentos, consolas y mapas, luces exteriores de navegación, estroboscópicas, de aterrizaje y taxeo; así como un interruptor “MASTER”.

1.4.10. SISTEMA DE COMUNICACIONES Y NAVEGACIÓN

El sistema de comunicación y navegación, permite, entre otras funciones, la comunicación entre los miembros de la tripulación de la aeronave (piloto y copiloto) a través del sistema de interfonía. Adicionalmente, facilitan la comunicación entre el piloto y el controlador de tránsito aéreo o terrestre, conocida como comunicaciones, lo cual contribuye a una navegación segura, gracias a la información proporcionada por los equipos e indicadores de navegación.

1.4.11. SISTEMA DE INSTRUMENTOS

Los instrumentos instalados en la aeronave proporcionan a la tripulación datos esenciales para monitorear y controlar constantemente el rendimiento del avión, el funcionamiento de sus sistemas y su posición en el espacio aéreo.

Estos instrumentos se clasifican según su función ya sea instrumentos de vuelo, de navegación, de motor, de otros sistemas, etc.

1.5. TIPOS DE MANTENIMIENTO REALIZADOS POR LA DIVISIÓN DE AVIONES DE INSTRUCCIÓN

- **MANTENIMIENTO DE CAMPAÑA:** Este tipo de mantenimiento puede ser correctivo o preventivo y se realiza directamente en el lugar donde opera la aeronave, ya sea en la línea de operaciones de vuelo o en otra zona de despliegue, sin necesidad de trasladar la aeronave al hangar. Consiste en efectuar inspecciones visuales, ajustes menores y reemplazo de componentes o equipos de fácil acceso, con el objetivo de minimizar el tiempo de inactividad y garantizar la disponibilidad operativa de la aeronave.
- **MANTENIMIENTO PROGRAMADO:** Se refiere a inspecciones de mantenimiento que están definidas en los manuales y Ordenes Técnicas de la aeronave. Estas inspecciones se llevan a cabo de manera sistemática, ya sea si es cumplimiento calendario o en función de un número específico de horas de operación llamado cumplimiento horario.

1.5.1. INSPECCIONES DE LA AERONAVE T-35 PILLAN

- INSPECCIÓN DE POST VUELO HORARIA: Este tipo de inspección, establece que debe cumplirse al término de un periodo de 100 horas de vuelo después de la última inspección periódica.
- INSPECCIÓN PERIÓDICA: Este tipo de inspección, establece que se debe efectuar al término de un periodo de 200 horas de vuelo después de la inspección periódica precedente.
- Requisitos de inspección de 700 y 1400 horas

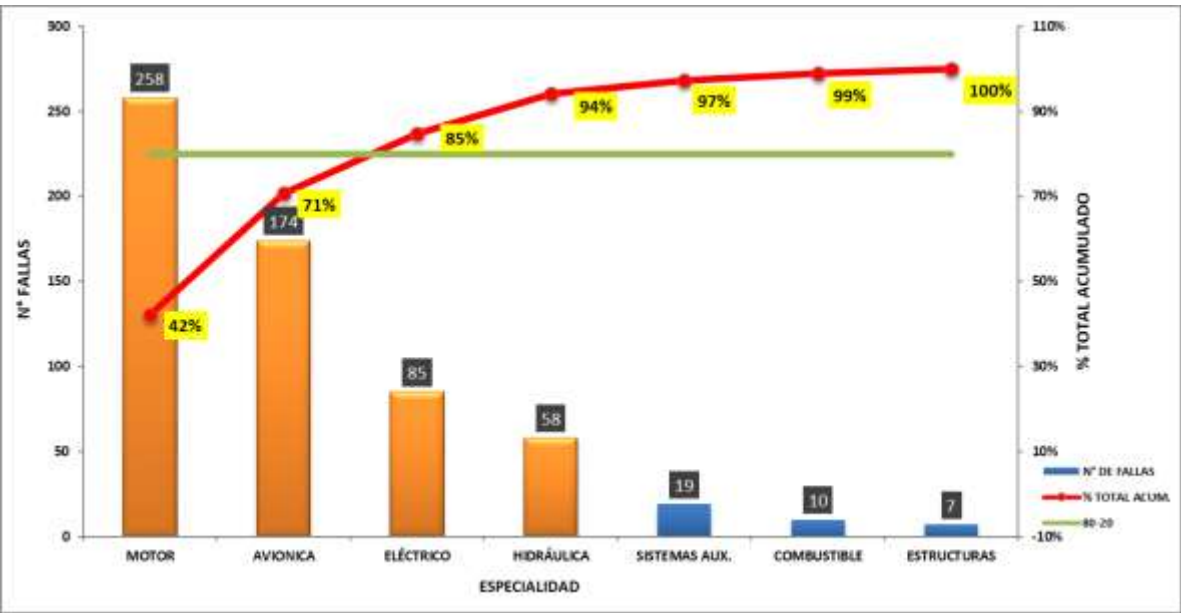
1.5.2. INSPECCIONES DEL MOTOR

- 50 Horas: Cambio de aceite y filtro de aceite
- 100 Horas
- 200 Horas
- 1400 Horas: Overhaul de motor

1.6. PROBLEMÁTICA

Actualmente la División de Aviones de Instrucción de ENAER realiza las tareas de mantenimiento programado preventivo y mantenimiento correctivo, a la flota de aeronaves T35-Pillan, pertenecientes a la Escuela de Aviación, no obstante, se ha visto afectada producto de paros no programados de aeronaves (imprevistos), provocando un impacto en la disponibilidad de aeronaves, e incumplimiento en lo estipulado según el contrato de campaña, puesto que no se cumple con la cantidad de aviones mínimos que la Escuela de Aviación requiere para sus procesos de instrucción, provocando la inconformidad y las multas de penalización por parte del cliente que es la Fuerza Aérea de Chile.

El Sistema Motor corresponde a uno de los sistemas que compone a la aeronave y es el que genera una alta cantidad de fallas por imprevistos en la flota de aeronaves T35-Pillan, la mayor tasa de averías se centra principalmente en componentes asociados al sistema motor, como es el caso del Servo Inyector, seguido de equipos de instrumentación y navegación, que forman parte del sistema de aviónica, lo que va provocando atrasos e incluso reprogramación de las tareas de mantenimiento preventivas planificadas de otras aeronaves, ya que se debe interrumpir al dique de especialistas que está a cargo de la aeronave en mantenimiento programado, para atacar el imprevisto de la aeronave que quedo fuera de vuelo, incrementando las Horas Hombre, y costos asociados.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1-7: Diagrama Pareto, correspondiente a fallas por sistema

De acuerdo con el diagrama de Pareto de la figura 1-7, se puede observar que la mayor concentración de fallas se presenta en las especialidades de motor, aviónica y eléctrico las cuales en conjunto representan el 85% del total de las fallas acumuladas en la flota de aeronaves T35-Pillan.

Como se puede apreciar, el sistema motor representa la principal fuente de fallas, acumulando un total de 258 eventos, lo que equivale al 42% del total general de fallas. Esto se debe principalmente a fallas asociadas a los accesorios que trabajan conjunto con el motor. Esta concentración de fallas lo destaca como el sistema de mayor criticidad dentro del análisis realizado, superando ampliamente a las otras especialidades como aviónica y sistemas eléctricos.

Dado su alto impacto en la confiabilidad operativa y en la disponibilidad de la flota, el sistema motor requiere intervención oportuna e inmediata, ya que representa uno de los sistemas más críticos para el funcionamiento de la aeronave. Su óptimo desempeño es esencial no solo para garantizar la operatividad de la aeronave, sino también para asegurar la seguridad y eficiencia operacional.

Dado lo anterior, surge la necesidad de modificar el actual plan de mantenimiento, orientándolo hacia la metodología basada en la confiabilidad (RCM), con el objetivo de introducir mejoras que permitan ajustar los procedimientos existentes o establecer nuevos requisitos de inspección, que logre mejorar la confiabilidad, reducir las detenciones no programadas y optimizar los recursos de mantenimiento, así como también garantizar la disponibilidad y seguridad operacional.

1.7. ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y MÉTODO DE JERARQUIZACIÓN

Woodhouse (1994) citada por Carlos Parra y Adolfo Crespo (2020) define que Las Técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan. (p. 2).

A través del análisis de criticidad y jerarquización, se busca identificar el sistema critico que represente un riesgo para la eficiencia operativa de la flota de aeronaves T35-Pillan, con el fin de proponer una estrategia de mejora continua. Para tal efecto se aplicará el modelo de criticidad semicuantitativo CTR (criticidad total por riesgo). Para este análisis de criticidad y jerarquización se consideran las siguientes expresiones:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times \text{C}$$

Dónde:

- CTR: Criticidad total por riesgo
- FF: Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado (fallos/año))
- C: Consecuencias de los eventos de fallos

Donde se supone además que el valor de las consecuencias (C), se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\text{C} = (\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}$$

Siendo:

- IO = Factor de impacto en la producción
- FO = Factor de flexibilidad operacional
- CM = Factor de costes de mantenimiento
- SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

La expresión final del modelo de priorización de CTR será la siguiente:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times ((\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA})$$

Se establece una escala de ponderación para la evaluación de cada uno de los factores, los cuales son evaluados por la expresión del riesgo

- Factor de Frecuencia de Fallos (FF)

Escala	Frecuencia de Fallos FF
4	Mayor a 150 fallas al año
3	Promedio, 50-150 fallas al año
2	Buena, 10-50 fallas al año
1	Excelente, Menos de 10 fallas

Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos, C. Parra & A. Crespo - 2020

Tabla 1-1: Escala de ponderación (FF)

- Factores de Consecuencias:

Impacto Operacional (IO)

Escala	Impacto Operacional IO
4	Pérdida Total
3	Parada del sistema o subsistema y repercute en otros sistemas
2	Impacta en niveles de inventario o calidad
1	No genera ningún efecto significativo sobre producción y operaciones

Fuente: Métodos de Análisis de criticidad y Jerarquización de Activos, C. Parra & A. Crespo - 2020

Tabla 1-2: Escala de ponderación (IO)

Impacto por Flexibilidad Operacional (FO)

Escala	Flexibilidad Operacional (FO)
2	Se requiere de mano de obra externa, para su reparación
1	Función de repuestos e insumos disponibles

Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos, C. Parra & A. Crespo - 2020

Tabla 1-3: Escala de ponderación (FO)

Impacto en costes de Mantenimiento (CM)

Escala	Costos de Mantenimiento (CM)
2	Superior o igual a 15.000 USD
1	Inferior a 15.000 USD

Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos, C. Parra & A. Crespo - 2020

Tabla 1-4: Escala de ponderación (CM)

Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)

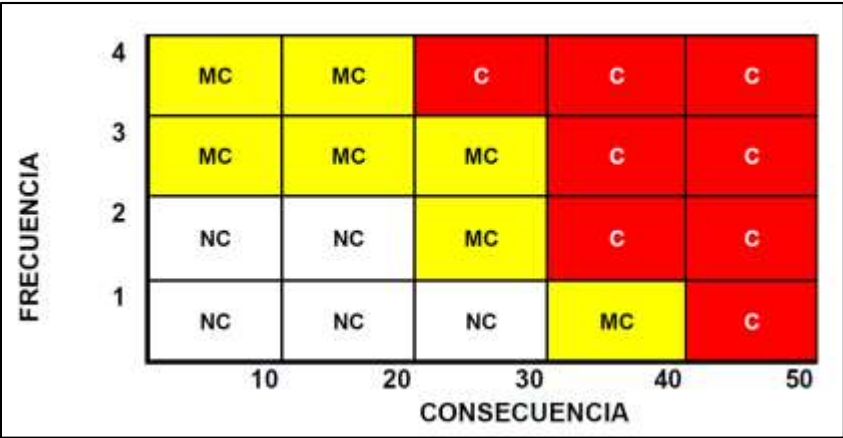
Escala	Impacto en seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)
40	Riesgo alto de perdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos
20	Riesgo medio de perdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
10	Riesgo mínimo de perdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos, C. Parra & A. Crespo - 2020

Tabla 1-5: Escala de ponderación (SHA)

La matriz de criticidad permite jerarquizar cada sistema en 3 áreas:

- Área de sistemas No Críticos (NC)
- Área de sistemas de Media Criticidad (MC)
- Área de sistemas Críticos (C)



Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos, C. Parra & A. Crespo - 2020

Figura 1-8: Matriz de Criticidad

1.7.1. ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE LOS SISTEMAS DE LA AERONAVE

Al realizar el análisis de criticidad semicuantitativo CTR, el cual se muestra en la tabla, se determina el nivel de criticidad de cada sistema asociado a la aeronave. Esto fue realizado mediante registros históricos del año 2024. Los resultados de evaluación de cada sistema, son los siguientes:

SISTEMAS	CTR	CRITICIDAD
HÉLICE	25	NO CRÍTICO
MOTOR	180	CRÍTICO
CONTROLES DE VUELO	24	NO CRÍTICO
HIDRÁULICO	72	MEDIA CRITICIDAD
COMBUSTIBLE	48	MEDIA CRITICIDAD
VENTILACIÓN, CALEFACCIÓN Y ANTIVAHO	28	NO CRÍTICO
ELÉCTRICO	42	MEDIA CRITICIDAD
COMUNICACIONES Y NAVEGACIÓN	4	MEDIA CRITICIDAD
INSTRUMENTOS	24	MEDIA CRITICIDAD

Fuente: Elaboración propia

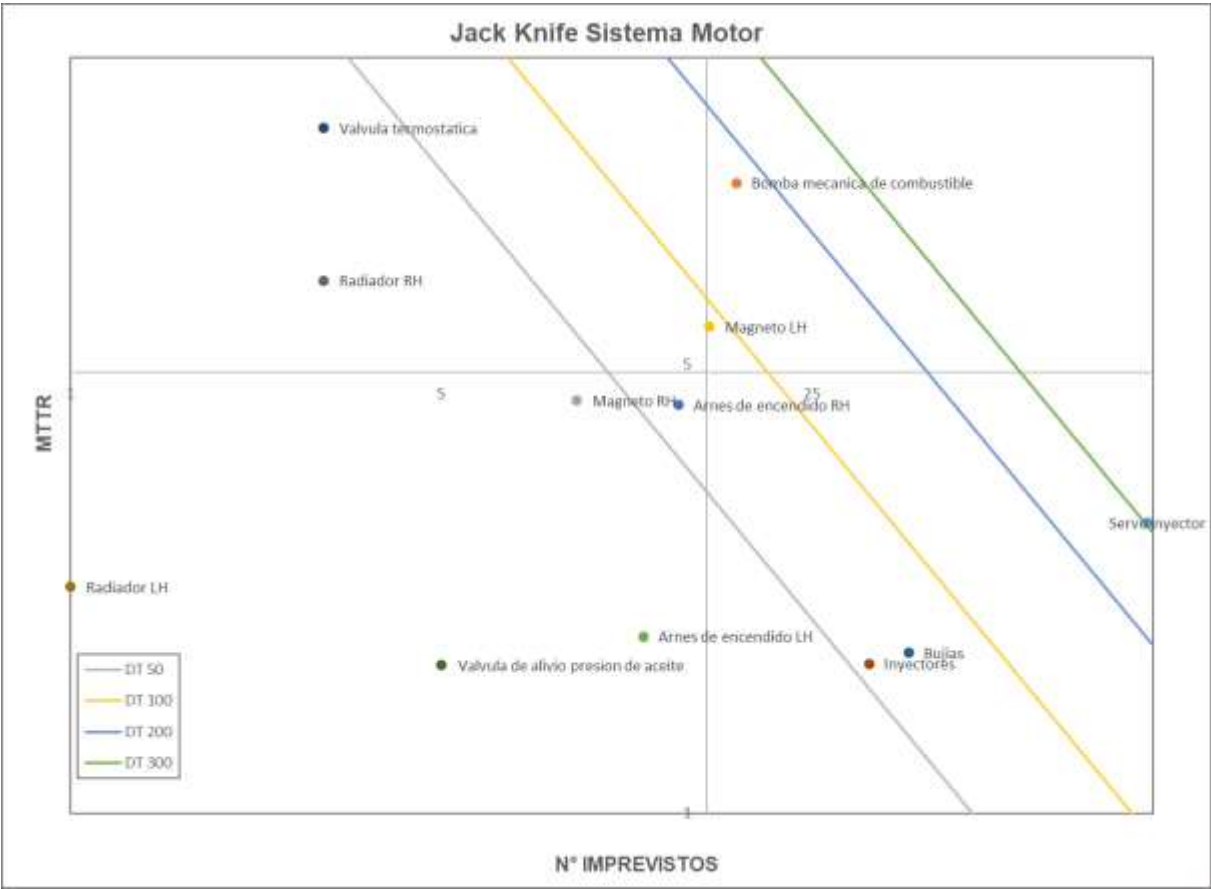
Tabla 1-6: Análisis de Criticidad por cada sistema de la aeronave T35-Pillan

Al analizar la criticidad de cada uno de los sistemas a través de la matriz de riesgos y en base a los resultados obtenidos, se concluye que el sistema crítico, de la aeronave, es el motor, por lo cual la propuesta de aplicar la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM será enfocado a este sistema.

1.8. ANÁLISIS DEL SISTEMA MOTOR

Utilizando la metodología del diagrama Jack Knife y tomando en consideración la data de detenciones imprevistas del periodo de un año, podemos visualizar los componentes críticos del sistema motor en el siguiente gráfico de dispersión.

Con esta herramienta es posible también visualizar y cuantificar el grado de indisponibilidad que cada uno de los componentes aportan a la flota.



Fuente: Elaboración propia

Grafico 1-1: Diagrama Jack Nife del sistema en estudio

El grafico 1-1, indica que el Servo inyector, es el componente más crítico del sistema motor, ya que genera la mayor cantidad de imprevistos y genera mayor indisponibilidad en términos de paros no programados de la flota de aeronaves T35-Pillan, con más de 300 horas de detenciones, durante el transcurso del año 2024. Este componente se encuentra sobre la ISO 300.

CAPITULO 2: APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD RCM A SISTEMA CRÍTICO

2.1. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM

La metodología RCM surge como una adaptación a la industria, desde el ámbito aeronáutico. Durante la década de 1960 los operadores aéreos sumaron esfuerzos para reducir los costos en mantenimiento de las flotas, pero principalmente para reducir el riesgo de accidentes que, por entonces, era mayor que el actual.

Esto motivo la creación de grupos de análisis y mejora conocidos como MSG (maintenance steering Group) integrados por personal altamente calificado (operadores, mantenedores y proveedores aeronáuticos). El resultado reveló una gran carga de mantenimiento preventivo, aunque sólo unos pocos componentes obedecían al patrón de fallas de la curva de la bañera.

Sin embargo, los primeros antecedentes filosóficos datan de un documento publicado en 1978 por el departamento de defensa de los Estados Unidos y escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap. A través de los años estas ideas innovadoras se fueron mejorando y adaptando a distintas aplicaciones hasta convertirse en lo que hoy se conoce como RCM. Los resultados fueron tan alentadores que actualmente se aplica con éxito en sectores tales como la industria nuclear, militar, petróleo, transporte, minería, manufactura, servicios, etc. (Alejandro J. Pistarelli p. 364).

John Moubray (2004) define el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad como “un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”. (pág. 7).

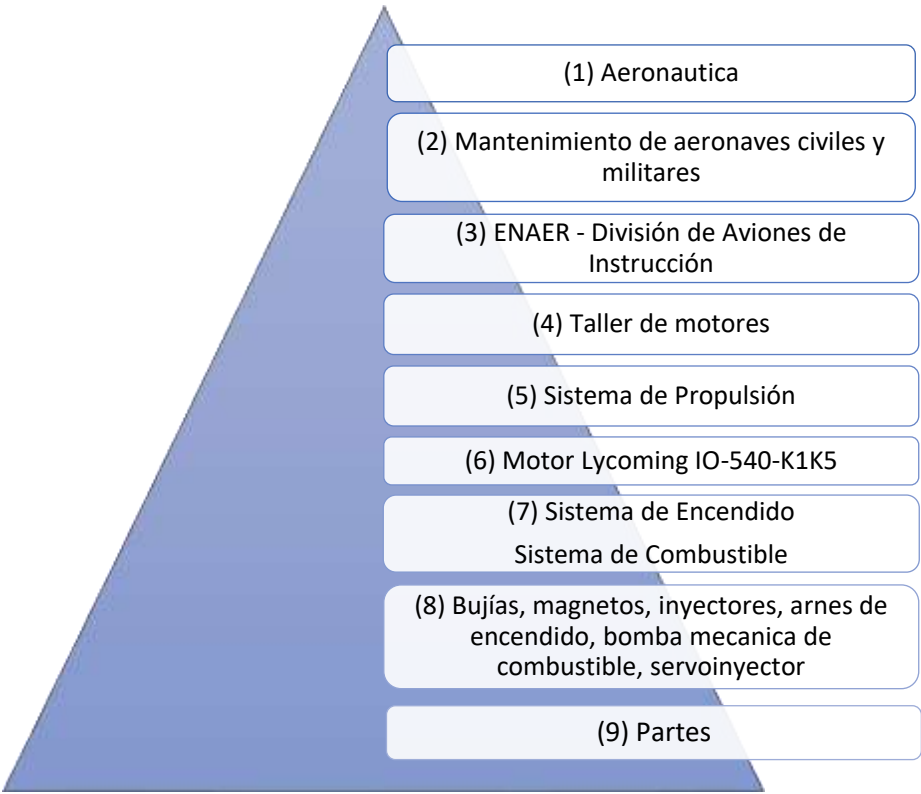
El RCM de John Moubray establece siete preguntas básicas, a analizar:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada

2.2. **TAXONOMÍA SEGÚN NORMA ISO 14224**

La norma ISO 14224, define la taxonomía como la clasificación sistemática de equipos o sistemas según características similares para organizarlos en distintos niveles. Esta clasificación facilita la identificación de los activos dentro de una organización, contribuyendo a definir sus funciones y a detectar fallas funcionales que pueden afectar la confiabilidad del sistema de estudio, tomando como base los ítems mantenibles del equipo o sistema.

Para el siguiente análisis, es importante establecer el nivel taxonómico en el cual nos enfocaremos. De acuerdo con la pirámide de jerarquización, se trabajará en el nivel 6, el cual corresponde a la unidad que es el Motor Lycoming IO-540-K1K5, el cual en el capítulo 1 se determinó mediante el método de jerarquización y matriz de criticidad, como el sistema crítico de la aeronave.



Fuente: Elaboración Propia en base a la norma ISO 14224

Figura 2-1: Niveles Taxonómicos aplicado al caso de estudio, según Norma ISO 14224

2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO MOTOR LYCOMING IO-540-K1K5

El motor fabricado por la empresa Lycoming modelo IO-540-K1K5, se compone de seis cilindros horizontalmente opuestos, enfriado por aire, con inyección de combustible, que desarrolla 300 BHP a 2700 RPM, este sistema de propulsión es una parte integral de la aeronave y la más importante ya que genera la potencia necesaria para la propulsión de la aeronave, lo cual transforma la energía química del combustible en energía mecánica, mediante el proceso de combustión en los cilindros. Esta energía mecánica se usa para mover el cigüeñal y, por ende, la hélice proporcionando el empuje necesario para el vuelo. Al mover la hélice, el motor genera empuje hacia adelante, lo cual es esencial para el despegue, ascenso, vuelo nivelado y aterrizaje de la aeronave.



Fuente: www.Lycoming.com

Figura 2-2: Motor Lycoming IO-540-K1K5, perteneciente a la aeronave T35-Pillan

2.4. CONTEXTO OPERACIONAL

“Las circunstancias bajo las cuales se espera que opere el activo físico o sistema” (Norma SAE JA101, 1999, p. 4).

El Motor Lycoming modelo IO-540-K1K5, corresponde al sistema de propulsión de la aeronave T35-Pillan, aeronave de instrucción básica para el entrenamiento de pilotos alumnos. Este motor es capaz de generar 300 BHP a 2700 RPM, proporcionando la potencia necesaria para realizar vuelos de entrenamiento.

Las operaciones de vuelo, se realizan principalmente en la ciudad de Santiago, con misiones que abarcan distintas fases de vuelo, como despegue, ascenso, crucero, maniobras de instrucción y aterrizaje.

Durante el despegue, el motor opera a su capacidad máxima (2700 RPM), mientras que en vuelo de crucero opera a un régimen de 2300-2500 RPM, dependiendo de las condiciones de altitud y carga.

El motor opera un promedio de 25 horas mensuales. El perfil de operación incluye altitudes que varían desde el nivel del mar hasta un techo máximo de altitud de 20500 ft (pies), lo que implica un ajuste constante en la mezcla de combustible-aire para mantener un rendimiento óptimo.

Las condiciones ambientales en la zona de operación presentan una temperatura que oscila entre -1°C y 33°C, con una humedad relativa entre el 36% y 55%, y vientos promedio de 10,1 km/h.

S Proveedores (Suppliers)	I Entradas (Inputs)	P Proceso (Process)	O Salidas (Outputs)	C Clientes (Customers)
Lycoming Engines Copec Aeroshell Aviation OIL Champion Repuestos Insumos	Combustible Aire Electricidad	Puesta en marcha del motor. Generar combustion. Verificación y ajuste de parametros, RPM, Temperatura de aceite, Presion de aceite, Presion de combustible, Voltaje. Chequeo de sistemas electricos. Ajuste de parámetros criticos.	Entregar una potencia de 300 BHP a 2700 RPM. Entregar una T° Minima de aceite de 94° C y Maxima 246°C. Entregar una Presion de aceite en un rango Normal de 55 a 95 PSI Entregar una presion de combustible en un rango normal de 18 a 40 PSI. Entregar un voltaje de 24 VOLTS. Impulsar Helice de paso variable y velocidad constante. Generar empuje de la aeronave.	Alumno Piloto

Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-3: Diagrama SIPOC del contexto operacional

2.5. **FUNCIÓN DEL SISTEMA MOTOR**

Considerando la información del contexto operacional expuesto en el punto 2.4 y considerando la categoría del sistema, es posible definir de manera correcta la función principal del sistema, que será de gran importancia al momento de realizar el análisis de modo de falla, efecto y criticidad.

2.5.1. **FUNCIÓN PRIMARIA**

Transmitir energía mecánica y generar 300 BHP a 2700 RPM. Entregar un régimen mínimo de 1000 RPM, para generar 24 V, tener una autonomía de vuelo con 55% de potencia de 5,6 horas con un total de 77 galones de combustible.

2.5.2. **FUNCIÓN SECUNDARIA**

Impulsar los sistemas auxiliares que componen la aeronave, como:

- Generación de energía eléctrica: A través de un alternador, el motor suministra energía eléctrica para el sistema de aviónica, luces y otros equipos.
- Sistema de Vacío: el motor acciona una bomba de vacío, que proporciona succión para instrumentos giroscópicos como el horizonte artificial y el indicador de giro.
- Calefacción y presurización: El motor contribuye a sistemas de calefacción de la cabina y en casos específicos, a sistemas de presurización.

2.6. FALLAS FUNCIONALES

“Un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado” (Norma SAE JA1011, 1999, p. 4).

Para el caso en estudio, serán considerados un total de 3 fallas funcionales, lo cual, según data histórica de fallas proporcionada por el departamento de programación y control, además de reuniones en conjunto con especialistas del taller de motores, control de calidad y el departamento de ingeniería, las más comunes en el sistema motor son las siguientes:

- Motor incapaz de encender.
- Baja potencia y funcionamiento irregular.
- Motor no mantiene el ralentí.

2.7. MODOS DE FALLA

“Un evento único, que causa una falla funcional” (Norma SAE JA1011, 1999, p. 5).

A partir de las fallas funcionales identificadas según el contexto operacional, se analizarán los modos de falla que influyan directamente en la causa de cada una de ellas:

(I) Motor incapaz de encender

- Bujías empastadas.
- Condensador de Magneto fuera de parámetros.

(II) Baja potencia y funcionamiento irregular

- Inyectores obstruidos.
- Cable de encendido deteriorado.
- Platinos de magneto desajustados.
- Bomba mecánica de combustible con presión inestable

(III) Motor no mantiene el ralentí

- Servo inyector desregulado

2.8. ANÁLISIS DE MODO DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD

Sistema/Subsistema		Descripción de la Función	Falla Funcional		Modo de Falla	Efecto Falla	FREC. FALLAS	MTTR (LOG-EJEC-P EN MARCHA)	IMP. PROD. USD/hr	COSTOS DIRECTOS POR FALLA USD/falla	IMP SEG	IMP AMB	RIESGO CUANTITATIVO USD/año	RIESGO CUALITATIVO	GRAFICO	
Motor Lycoming IO 540-K1K5	1	Transmitir energia mecanica para generar 300 BHP a 2700 RPM. Contar con una autonomia de vuelo de 5,6 horas con un total de 77 galones de combustible.	1.1	Motor incapaz de encender	1.1.1	Bujias empastadas	Evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Dificultad de arranque de motor. Acción correctiva: Inspección, limpieza y ajuste de bujías.	2	2	\$ 115	\$ 669	A	B	\$ 1.797	AB	2,00
					1.1.2	Condensador de magneto fuera de parametros	Evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Chispa debil Acción correctiva: Cambio de condensador	1	6	\$ 115	\$ 1.016	B	C	\$ 1.706	BC	1,00
			1.2	Baja potencia y funcionamiento irregular	1.2.1	Inyectores obstruidos	Evidente: Si Afecta SHA:Si Efecto operacional (síntomas): Motor no mantiene el ralenti. Acción correctiva: Limpieza de inyectores.	2	2	\$ 115	\$ 480	A	A	\$ 1.420	AA	2,00
					1.2.2	Cable de encendido deteriorado	Evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Motor con Combustion irregular. Acción correctiva: Reparación o Cambio de Arnes de encendido.	1	4	\$ 115	\$ 1.315	B	C	\$ 1.775	BC	1,00
					1.2.3	Platinos de magneto desajustados	Evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Caída anormal en RPM de motor. Acción correctiva: Limpieza y Ajuste de platinos	1	4	\$ 115	\$ 480	B	C	\$ 940	BC	1,00
					1.2.4	Bomba mecanica de combustible con presión inestable	Evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Bomba mecanica marca 12 psi al 50% de RPM. Acción correctiva: Cambio de bomba de combustible	1	9,8	\$ 115	\$ 2.768	B	B	\$ 3.889	BB	1,00
		1.3	Motor no mantiene el ralenti	1.3.1	Servo inyector desregulado	Evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Ralenti desestabilizado. Acción correctiva: Regulación o cambio de servo inyector	5	3,0	\$ 115	\$ 3.602	A	C	\$ 19.735	AC	3,00	
													\$ 31.263			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2-1: Análisis de modo de falla, efectos y criticidad (FMECA)

En la tabla anterior se expone, el análisis de modo de falla, efectos y criticidad (FMECA), correspondiente al sistema motor Lycoming IO-540-K1K5, de la aeronave convencional. En ella se presentan 3 fallas funcionales, las cuales según data histórica de mantenimiento son las más comunes por detenciones de imprevisto de la aeronave, correspondientes al sistema motor. La primera falla funcional corresponde a una falla total, es decir el sistema pierde por completo su capacidad de realizar la función para la cual fue diseñado, la segunda y tercera falla funcional corresponden a una falla parcial, lo cual quiere decir que el sistema sigue funcionando, pero con un rendimiento más reducido o limitado.

Cada falla funcional del sistema, tiene asociado distintos tipos de modos de falla, los cuales le siguen los efectos de falla, lo evidente de cada falla para los operarios, el impacto que provoca a la seguridad higiene y ambiente y los efectos operacionales que generan, así como también la acción correctiva que se ejecuta para cada modo de falla.

Posteriormente, se consideran diversos factores, dentro de la tabla, para calcular el riesgo de cada modo de fallo, tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Estos factores incluyen la frecuencia de fallas (FF), el tiempo promedio de reparación (MTTR), el impacto en la producción, es decir, la pérdida económica por cada hora en que la aeronave deja de operar, los costos directos por falla, lo cual involucra horas hombre, insumos, repuestos, etc. Todos los valores monetarios especificados en la tabla están en USD. Finalmente, a través de una matriz de criticidad se cuantifican los modos de riesgos asociados, con el fin de obtener el modo de falla con alta criticidad, al cual se le aplicara la acción correctiva en el plan de mantenimiento, no obstante, los modos de falla que se encuentren en mediana criticidad y baja criticidad, no dejan de ser importantes en el sistema ya que estamos hablando de un sistema crítico de la aeronave.

2.8.1. CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO

Riesgo cuantitativo:

$$FREC. FALLAS \times (MTTR \times IMP. PROD + COSTO DIRECTO FALLA)$$

Donde:

FREC. FALLAS: Frecuencia de fallas en un año.

MTTR: Tiempo promedio para reparar una falla.

IMP. PROD: Costo de ineficiencia por hora

COSTOS DIRECTOS POR FALLA: Costos de reparar la falla (hh, insumos, repuestos, logística, confinamiento, etc.)

2.8.2. CUALIFICACIÓN DEL RIESGO

Para determinar el impacto de cada modo de fallo en la seguridad y el medio ambiente, se procede a asignar una letra la cual representa el nivel de impacto correspondiente. Posteriormente al combinar las letras asignadas a cada tipo de impacto, se obtiene el nivel de riesgo asociado.

Se define la clasificación del impacto en:

- Clasificación A: Alto impacto en ambiente o seguridad ante la ocurrencia de este modo de fallo.
- Clasificación B: Mediano impacto en ambiente o seguridad ante la ocurrencia de este modo de fallo.
- Clasificación C: Bajo impacto en ambiente o seguridad ante la ocurrencia de este modo de fallo.

Enlazando cada clasificación de impacto, se obtendrá un riesgo asociado:

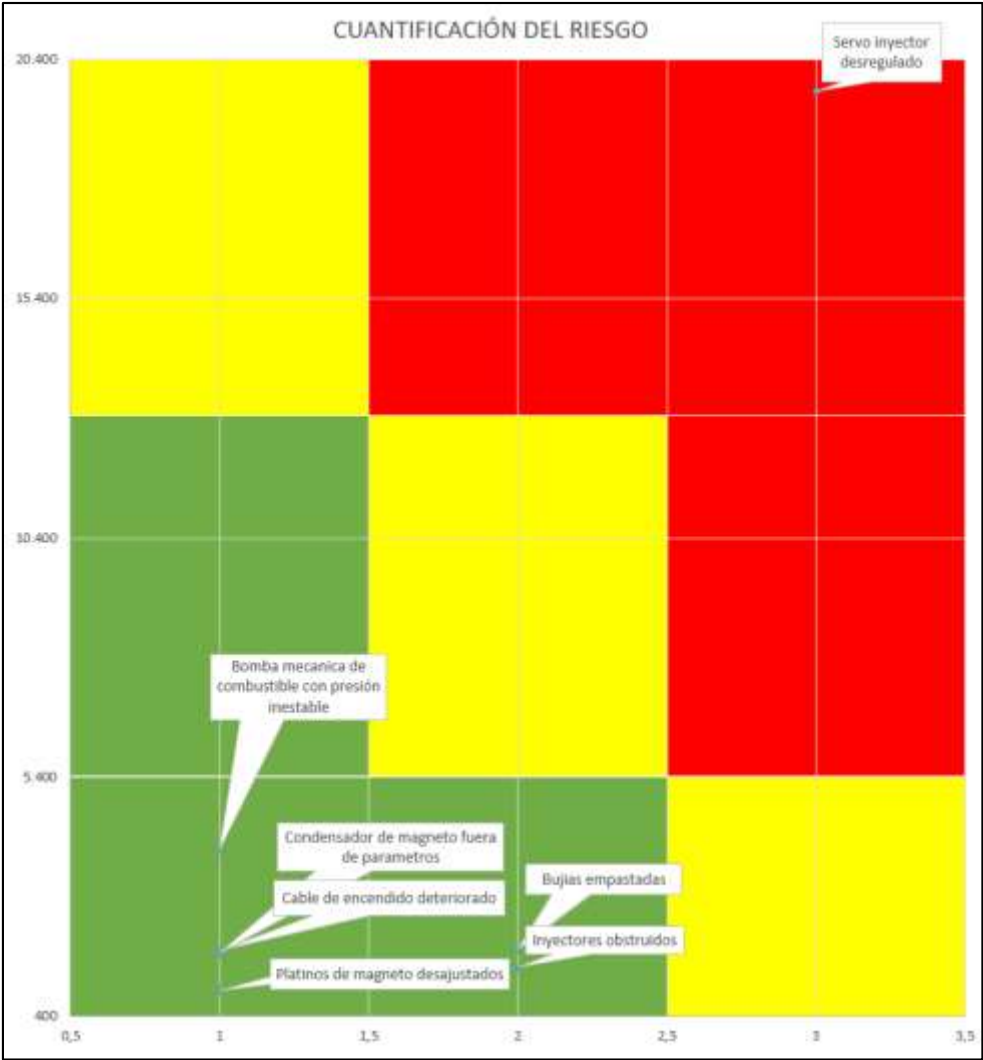
- Clasificación A-A: Representa Riesgo Máximo
- Clasificación A-C, A-B, o B-A: Representa Riesgo Medio
- Clasificación B-C o CC: Representa Riesgo Mínimo

2.8.3. ANÁLISIS DE JERARQUIZACIÓN DE SEVERIDAD DE LOS MODOS DE FALLA DEL SISTEMA MOTOR

Modo de Falla	Efecto Falla	FREC. FALLAS	MTTR (LOG-EJEC-P EN MARCHA)	IMP. PROD. USD/hr	COSTOS DIRECTOS POR FALLA USD/falla	IMP SEG	IMP AMB	RIESGO CUANTITATIVO USD/año	RIESGO CUALITATIVO	GRAFICO
Bujias empastadas	Evidente: Sí Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Dificultad de arranque de motor. Acción correctiva: Inspección, limpieza y ajuste de bujías.	2	2	\$ 115	\$ 669	A	B	\$ 1.797	AB	2,00
Motor de partida no engancha	Evidente: Sí Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): chillido en motor de partida. Acción correctiva: Cambio de motor de partida.	2	3	\$ 115		B	C	\$ 767	BC	1,00
Condensador de magneto fuera de parametros	Evidente: Sí Afecta SHA: Sí Efecto operacional (síntomas): Chispa debil Acción correctiva: Cambio de condensador	1	6	\$ 115	\$ 1.016	B	C	\$ 1.706	BC	1,00
Inyectores obstruidos	Evidente: Sí Afecta SHA: Sí Efecto operacional (síntomas): Motor no mantiene el ralenti. Acción correctiva: Limpieza de inyectores.	2	2	\$ 115	\$ 480	A	A	\$ 1.420	AA	2,00
Cable de encendido deteriorado	Evidente: Sí Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Motor con Combustion irregular. Acción correctiva: Reparación o Cambio de Arnes de encendido.	1	4	\$ 115	\$ 1.315	B	C	\$ 1.775	BC	1,00
Platinos de magneto desajustados	Evidente: Sí Afecta SHA: Sí Efecto operacional (síntomas): Caída anormal en RPM de motor. Acción correctiva: Limpieza y Ajuste de platinos	1	4	\$ 115	\$ 480	B	C	\$ 940	BC	1,00
Bomba mecanica de combustible con presión inestable	Evidente: Sí Afecta SHA: Sí Efecto operacional (síntomas): Bomba mecanica marca 12 psi al 50% de RPM. Acción correctiva: Cambio de bomba de combustible	1	9,8	\$ 115	\$ 2.768	B	B	\$ 3.889	BB	1,00
Servo inyector desregulado	Evidente: Sí Afecta SHA: Sí Efecto operacional (síntomas): Ralenti desestabilizado. Acción correctiva: Regulación o cambio de servo inyector	5	3,0	\$ 115	\$ 3.602	A	C	\$ 19.735	AC	3,00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2-2: Jerarquización de los modos de fallas



Fuente: Elaboración Propia

Grafico 2-1: Jerarquización por riesgo

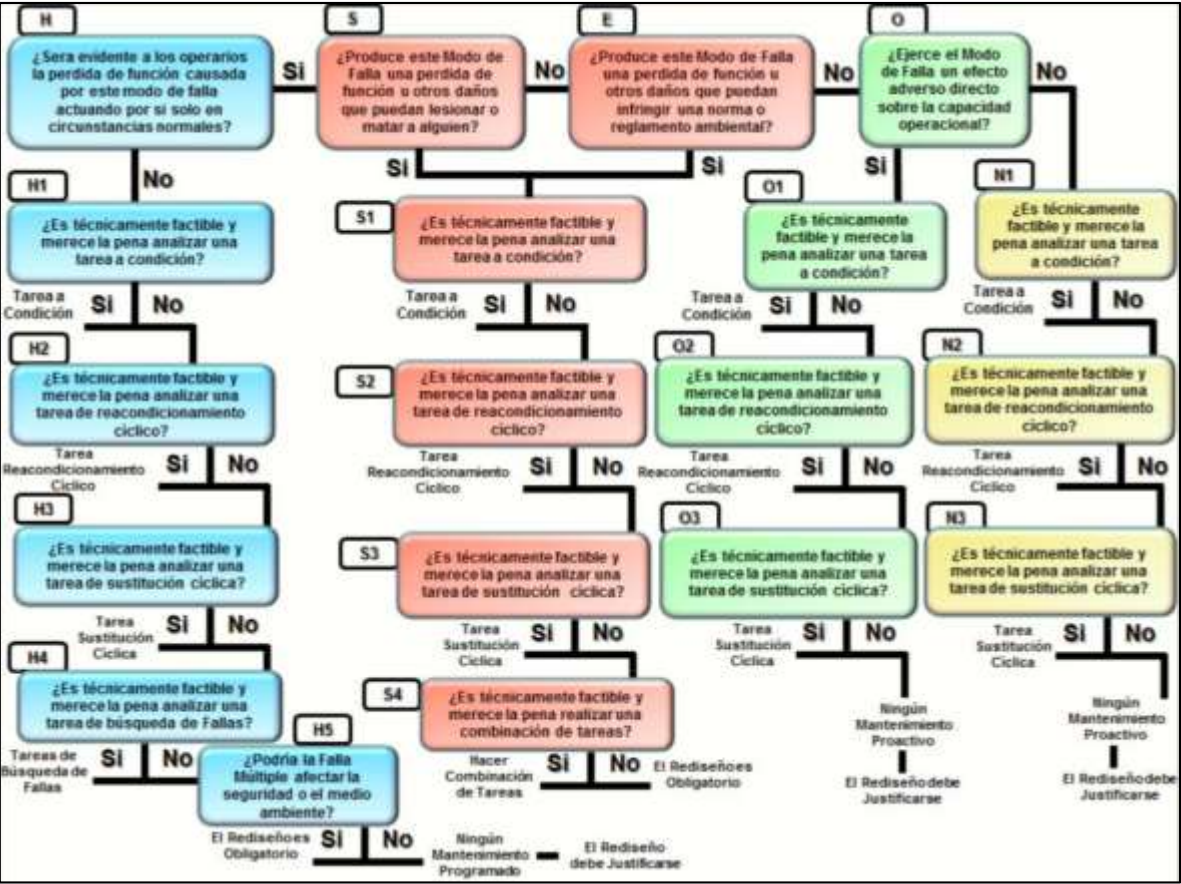
A partir de la matriz de cuantificación de riesgo del grafico 2-1, se concluye que el servo inyector desregulado es el modo de falla más crítico en comparación con los otros modos de falla que están en zona de bajo riesgo, en este caso en zona verde, debido a sus menores costos de reparación y menor frecuencia de ocurrencia. El servo inyector tiene un impacto significativo en la operatividad de la flota de aeronaves T35-Pillan, debido a que genera altos costos de reparación y tiempo de indisponibilidad de la aeronave. El desajuste del servo inyector afecta directamente el rendimiento del motor, lo cual puede provocar un ralentí inestable, pérdida de potencia o inestabilidad en el régimen del motor y en casos extremos puede llegar a provocar el apagado del motor. Esto compromete la seguridad operativa y deja la aeronave en condición fuera de vuelo, provocando un impacto en la disponibilidad, lo que explica su alta severidad.

Dado lo anterior es importante para la seguridad operacional de la flota, garantizar la confiabilidad de los componentes que integran el sistema motor, con el objetivo de mantener la disponibilidad de la aeronave, y al mismo tiempo reducir los costos asociados al mantenimiento correctivo. Para mitigar los desajustes del servo inyector de combustible, se recomienda implementar estrategias de mantenimiento preventivo. Para tal efecto, se propone evaluar la factibilidad de incrementar la periodicidad de las inspecciones del servo inyector de combustible y componentes que trabajan junto a él, con el objetivo de detectar y prevenir de manera anticipada daños o contaminación por partículas que pueden provocar daños en los espejos internos del servo inyector, minimizando así la probabilidad de fallas y aumentando la confiabilidad del componente.

2.9. DIAGRAMA DE DECISIÓN DEL RCM PARA LA SELECCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

El diagrama de decisión, es una herramienta de análisis clave dentro del proceso de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, ya que permite determinar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para cada modo de falla del sistema en estudio. Su objetivo principal es mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, manteniendo el control de los costos y cumpliendo con los estándares de seguridad operativa.

A continuación, se presentan los aspectos clave considerados en este árbol de decisión, destacando su importancia para el proceso de evaluación y planificación de estrategias de mantenimiento.



Fuente: Mantenimiento centrado en la confiabilidad – John Moubray

Figura 2-4: Árbol de decisión RCM

2.9.1. ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN DE FALLAS

A continuación, se define la lógica que justifica el orden en que se analizan los modos de fallas, considerando criterios técnicos y de confiabilidad.

Tarea a condición:

Las tareas a condición están asociadas al mantenimiento predictivo. Consiste en realizar intervenciones de mantenimiento únicamente cuando el estado operativo de un componente o sistema lo requiera, es decir, cuando se detectan desviaciones respecto a parámetros funcionales normales. Este enfoque se fundamenta en la supervisión continua o periódica del estado físico y funcional de los equipos mediante técnicas de diagnóstico, tales como análisis de vibraciones, monitoreo de temperatura, inspecciones no destructivas o análisis de lubricantes, entre otros. A diferencia del mantenimiento preventivo, que se ejecuta de forma calendarizada, el mantenimiento a condición permite anticiparse a fallas potenciales de forma más precisa, optimizando el uso de recursos técnicos y logísticos, y aumentando la disponibilidad y confiabilidad de los activos.

Tarea de reacondicionamiento cíclico:

Las tareas de reacondicionamiento cíclico están asociadas al mantenimiento preventivo. Consisten en intervenciones programadas que se realizan de forma periódica con el propósito de preservar el buen estado de funcionamiento de equipos o componentes, independientemente de que presenten fallas visibles. Estas intervenciones se efectúan en intervalos definidos, determinados por el tiempo de servicio o la cantidad de ciclos operativos, con el propósito de asegurar la continuidad operativa y mejorar la disponibilidad de los sistemas. Aplicar este tipo de mantenimiento de manera sistemática permite anticiparse a posibles fallas, optimizar los recursos destinados al mantenimiento y extender la vida útil de los equipos

Tarea de sustitución cíclica:

Las tareas de sustitución cíclica están asociadas al mantenimiento preventivo. Consiste en el reemplazo programado de ciertos componentes, sin que exista necesariamente una falla o deterioro evidente. A diferencia del reacondicionamiento cíclico, esta tarea tiene como objetivo anticiparse a posibles fallas, basándose en intervalos definidos previamente según la experiencia en operación, las recomendaciones técnicas establecidas por el fabricante o el análisis de registros de fallos anteriores. Aunque no considera el estado actual del equipo, esta estrategia es esencial para reducir paradas no programadas y asegurar el funcionamiento continuo y confiable del equipo durante toda su vida útil.

Rediseño:

En el contexto del mantenimiento, el rediseño corresponde a un proceso de mejora orientado a modificar sistemas, componentes o prácticas existentes con el objetivo de eliminar o disminuir la probabilidad y el impacto de fallas previamente identificadas. Esta metodología busca atacar las causas fundamentales de los problemas operativos, permitiendo aumentar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de los activos durante su ciclo de vida útil. Al mismo tiempo, contribuye a reducir costos innecesarios, minimizar los tiempos de detención y optimizar la rentabilidad de las operaciones. Su aplicación puede abarcar distintos sectores industriales, adaptándose a las necesidades específicas de cada organización.

2.9.2. HOJA DE DECISIÓN DEL RCM

REGISTRO DE HOJA DE DECISIÓN RCM																	
SISTEMA:			MOTOR														
SUBSISTEMA:			COMPONENTES														
REFERENCIA DE HOJA DE INFORMACIÓN			EVALUACION DE CONSECUENCIA (DIAGRAMA DE DECISION)				H1	H2	H3	ACCIÓN A FALTA DE				TAREA PROPUESTA	FRECUENCIA	A REALIZARSE POR	
							S1	S2	S3								
							O1	O2	O3								
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4					
1	1.1	1.1.1	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento cíclico: Inspección, limpieza y ajuste de bujías	50 Horas	Especialista Motores		
1	1.1	1.1.2	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento cíclico: Inspección, limpieza y medición de condensador	100 Horas	Especialista Motores		
1	1.2	1.2.1	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento cíclico: Inspección y limpieza de inyectores	50 Horas	Especialista Motores		
1	1.2	1.2.2	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento ciclico: Inspección de blindaje, prueba de continuidad y voltaje	100 Horas	Especialista Motores		
1	1.2	1.2.3	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento cíclico: Inspeccion, limpieza y ajuste de platinos	100 Horas	Especialista Motores		
1	1.2	1.2.4	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento ciclico: Realizar diagnostico, prueba en banco y regulación	150 Horas	Especialista Motores		
1	1.3	1.3.1	SI	NO	NO	SI	NO	SI					Tarea reacondicionamiento ciclico: Realizar inspección y limpieza de filtro de combustible de servo inyector	50 horas	Especialista Motores		
													Tarea de reacondicionamiento ciclico: Realizar diagnostico, prueba en banco y calibración	200 Horas	Especialista Motores		

Tabla 2-3: Hoja de decisión del RCM

Fuente: Elaboración Propia

La tabla anterior corresponde a la hoja de decisión de RCM, la cual integra la lógica del diagrama de decisión RCM que forma parte de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, con el fin de evaluar y definir alternativas de optimización y de mejora para la planificación de las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo enfocada en los modos de falla de los componentes del sistema motor de la flota de aeronaves T-35 Pillan.

La estrategia de mantenimiento presentada en la tabla 2-3 refuerza de manera significativa la capacidad de anticipar fallas potenciales en los componentes asociados al motor, proponiendo una estrategia de mantenimiento más eficiente y productiva. Este plan basado en la metodología RCM, se implementa en paralelo con inspecciones programadas del avión, lo que nos permite aprovechar de manera óptima los tiempos de detención de la aeronave, garantizando la eficiencia operativa y la disponibilidad. Además, se optimizan considerablemente los costos producto de paros no programados e indisponibilidad de la aeronave.

**CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD (RCM) Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS FRENTE AL
ESQUEMA ACTUAL**

3.1. PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

A continuación, se presenta la propuesta de plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para la flota de aeronaves T35-Pillan, incluyendo los costos asociados para la ejecución de las tareas de mantenimiento propuestas.

Modo de Falla	Actividad Mto	Acción a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Numero de personas	HH -ejecución	Tarifa Especialidad	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	PTTO ANUAL
Bujías empastadas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Inspeccionar, limpiar y ajustar bujías	6	1	1	\$ 120	\$ 68	\$ 1.128
Condensador de magneto fuera de parametros	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Inspeccionar, limpiar y medir parametros de condensador	3	1	2	\$ 120	\$ 15	\$ 765
Inyectores obstruidos	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Inspeccionar y limpiar inyectores	6	1	1,5	\$ 120	\$ -	\$ 1.080
Cable de encendido deteriorado	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Inspeccionar condicion de blindaje de arnes de encendido, realizar prueba de continuidad y de voltaje	3	1	1	\$ 120	\$ 835	\$ 2.865
Platinos de magneto desajustados	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Inspeccionar, limpiar y ajustar abertura de platinos	3	1	2	\$ 120	\$ 15	\$ 765
Bomba mecanica de combustible con presión inestable	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Realizar diagnostico, prueba en banco y regulación de bomba mecanica de combustible	2	1	2	\$ 120	\$ 1.020	\$ 2.520
Servo inyector desregulado	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Realizar limpieza de filtro de servo inyector y ajuste de mezcla y ralenti	6	1	1	\$ 120	\$ 1	\$ 726
	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Realizar diagnostico, prueba en banco y calibración	1	2	3	\$ 120	\$ 1.789	\$ 2.509
								\$ 12.358

Tabla 3-1: Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad y costos asociados a tareas de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia

Para la propuesta del plan de mantenimiento basado en la metodología RCM, el costo total anual de las actividades de mantenimiento se estima en \$ 12.358 USD. Este presupuesto considera la frecuencia con la que se llevaran a cabo las tareas de mantenimiento propuestas, la cantidad de especialistas requeridos para su ejecución, el número de horas necesarias para completar cada actividad, el costo por hora-hombre del especialista, así como los materiales y servicios necesarios para cada modo de fallo.

Esta planificación de mantenimiento centrada en la metodología RCM, está directamente relacionada al sistema motor de la aeronave, teniendo como objetivo garantizar la eficiencia operativa y aeronavegabilidad del motor, y de la misma manera contribuir a la seguridad operacional de la aeronave. A través de este análisis sistemático, se busca controlar y prevenir los

modos de fallo que generan un impacto negativo en la disponibilidad y confiabilidad de la flota de aeronaves. Con lo anterior se busca proponer modificar los requisitos de inspección asociados principalmente a componentes que forman parte integral del sistema motor, asegurando así la operatividad de la aeronave de forma confiable y continua. Al mismo tiempo, esta estrategia de mantenimiento propone considerablemente reducir las detenciones no programadas de la aeronave, lo cual es crucial para generar un impacto positivo en la disponibilidad de la flota de aeronaves y al mismo tiempo reducir los costos de mantenimiento.

3.2. ELABORACIÓN DE ORDENES DE TRABAJO

A continuación, se presentan las Ordenes de trabajo, las cuales describen de manera secuencial los procedimientos que se deben seguir, durante la ejecución de las tareas de mantenimiento. Su propósito es estandarizar las acciones del personal técnico de mantenimiento aeronáutico que opera en el hangar, garantizando el cumplimiento de los requisitos operacionales, de seguridad y calidad durante la ejecución de las tareas asignadas.

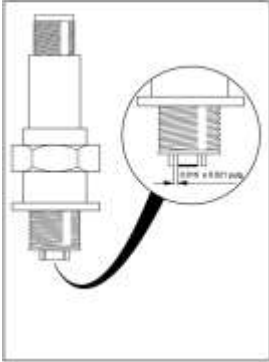
 MAINTENANCE WORK ORDER				
AVIÓN		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		INSPECCIÓN, LIMPIEZA Y AJUSTE DE BUJÍAS		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		EFECTUAR INSPECCIÓN, LIMPIEZA Y AJUSTE DE BUJÍAS		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DE LAS BUJÍAS 1. Desmante las bujías, de acuerdo acuerdo a la O.T. 1T-35-2, parrafo 5-17.14. INSPECCION Y LIMPIEZA DE BUJIAS 1. Visualmente inspeccione cada una de las bujías y desechelas si hay los siguientes daños: a. Cubierta exterior y/o hilos picados. b. Hexágono de la bujía con cantos redondeados. c. Aislación de cerámica quebrada, picada o dañada. d. Eléctrodos gastados en un 50% o más. 2. Limpie las bujías como sea requerido para sacar el carbón y depositos extraños. 3. Efectúe prueba funcional a las bujías en el probador de bujías 4. Ajuste la abertura de los electrodos de .016 a .021 milésimas de pulgadas. INSTALACION DE LAS BUJIAS 1. Engrase levemente los hilos de las bujías con el compuesto MIL-T-5544A o grasa grafitada, teniendo cuidado de no engrasar los electrodos. 2. Antes de instalar las bujías compruebe que los hilos del orificio del cilindro estén limpios y sin daños. 3. Coloque las bujías con sus empaquetaduras, en el cilindro manualmente. 4. Aplique torque a las bujías de 420 libras-pulgadas. 5. Conecte los terminales del arnés de encendido en las bujías. 6. Coloque las capotas de motor, según párrafo 5.5.2. del manual de mantenimiento 			
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-1: Pauta de trabajo de inspección, limpieza y ajuste de bujías.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

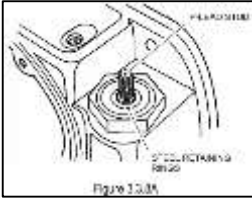
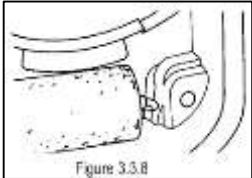
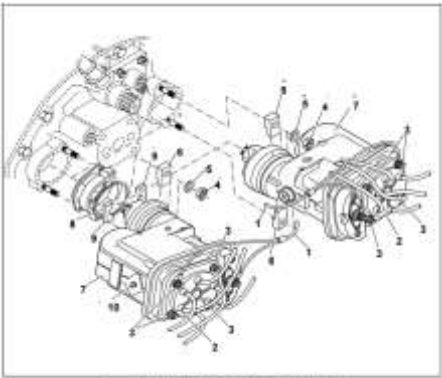
		MAINTENANCE WORK ORDER		
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		LIMPIEZA, INSPECCIÓN Y MEDICIÓN DE CONDENSADOR DE MAGNETO RH y LH		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		EFECTUAR LIMPIEZA, INSPECCIÓN Y MEDICIÓN DE CONDENSADOR DE LOS MAGNETOS RH Y LH		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DE MAGNETOS 1. Desmonte los magnetos RH y LH, de acuerdo a la O.T. 1T-35-2. parrafo 5-12.2 2. De acuerdo al manual L-1363J, parrafo 3.3.8 proceda con los siguientes pasos: A. LIMPIEZA DEL CONDENSADOR 1. Si las superficies externas del condensador están sucias, límpielo con alcohol isopropilico o limpiacontacto electronico LPS. B. INSPECCIÓN DEL CONDENSADOR 1. Inspeccione el condensador en busca de señales de corrosión. Esta condición es motivo para rechazar el componente. (ver figura 3.3.8). 2. Inspeccione el cable del condensador en busca de rozaduras, aislamiento deshilachado o cables expuestos que pudieran hacer contacto con la estructura. Inspeccione los conectores del condensador en busca de grietas o daños. Reemplace si es necesario. 3. Inspeccione el perno de conexión (P-lead stud) del condensador por señales de torsión o condición de "tirón". Use una lupa para examinar los sellos de vidrio en los extremos del capacitor, en busca de vidrio roto o separación del vidrio respecto a los anillos de retención de acero. Cualquiera de estas condiciones es motivo para rechazar el componente. (ver figura 3.3.8a). NOTA: EL DISEÑO ACTUAL DEL CONDENSADOR UTILIZA UN AISLADOR EN FORMA DE "D" PARA EVITAR DAÑOS POR APLICAR UN TORQUE EXCESIVO AL PERNO DE CONEXIÓN (P-LEAD STUD). ADVERTENCIA: EL CONDENSADOR PUEDE RETENER UNA CARGA RESIDUAL QUE PODRÍA CAUSAR UNA PEQUEÑA DESCARGA ELÉCTRICA A LA PERSONA. DESCARGUE EL CAPACITOR ANTES DE PROBARLO Y MANIPULARLO TEST DEL CONDENSADOR 1. El valor de la capacitancia debe medirse a temperatura ambiente usando un fluke 87V. El límite de servicio del condensador es de 0.315 a 0.385 microfaradios. 2. Pruebe la resistencia del aislamiento del condensador usando un medidor de aislamiento MIT410-EN. La resistencia medida entre el perno (stud) del condensador y la carcasa (shell) debe ser: * 10 megaohmios mínimo a 135 ± 5 VDC, o * 20 megaohmios mínimo a 250 ± VDC. NOTA: NO SE APRUEBAN REPARACIONES DE CAMPO DEL CONDENSADOR. BAJO NINGUNA CIRCUNSTANCIA SE DEBE RESOLDAR EL CABLE DEL CONDENSADOR AL PERNO DEL CONDENSADOR SI SE DESPRENDE. SOLDAR ESTE CABLE PUEDE RESULTAR EN UNA FALLA ELÉCTRICA INTERNA DEL CAPACITOR Y/O LA PÉRDIDA DE LA INTEGRIDAD HERMÉTICA. INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE MAGNETOS 1. Instale los magnetos de acuerdo a la O.T. 1T-35-2. parrafo 5-13.3			
				
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-2: Pauta de trabajo de limpieza, inspección y medición de condensador de magnetos RH y LH.

Fuente: Procedimiento extraído de Manual L-1363J. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

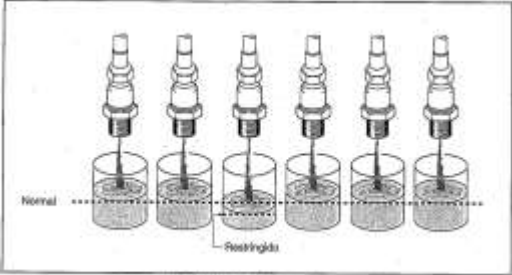
		MAINTENANCE WORK ORDER		
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		LIMPIEZA E INSPECCIÓN DE BOQUILLAS DE DESCARGA		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		EFECTUAR LIMPIEZA E INSPECCIÓN DE BOQUILLAS DE DESCARGA		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA 1. Desmonte las boquillas de descarga de acuerdo a la O.T. 1T-35-2, parrafo 5-10.15. LIMPIEZA DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA PRECAUCION: NO EMPLEE ALAMBRE O ALGÚN TIPO DE HERRAMIENTAS PARA LA LIMPIEZA DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA. 1. Sumerja las boquillas de descarga en Metil Etil Ketona o Acetona durante 30 minutos. 2. Retire las boquillas del solvente y sopletéelas con aire comprimido. 3. Inspeccione las boquillas por averías y por obstrucciones del filtro de aire y del orificio calibrado. CHEQUEO DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA (Fig. 5.14) 1. Desconecte las cañerías de combustible y remueva las boquillas de descarga desde los cilindros. 2. Conecte las boquillas de descarga a las cañerías de combustible y coloque las boquillas de descarga dentro de botellas de igual tamaño. 3. Coloque la manilla de la selectora en estanque izquierdo. 4. Mueva el acelerador todo adelante, mezcla cortada y conecte la bomba reforzadora de combustible. 5. Abra el control de mezcla a la posición "FULL RICH" por unos 15 a 30 segundos (dependiendo del tamaño de las botellas). 6. Saque las botellas desde el motor y colóquelas sobre una superficie nivelada y revise por volumen apropiado cada boquilla de descarga. Una verificación visual de los contenidos de combustible en las botellas le indicará cual boquilla de descarga esta tapada. NOTA: MIENTRAS FLUYE EL COMBUSTIBLE DENTRO DE LAS BOTELLAS, VERIFIQUE CADA BOQUILLA DE DESCARGA PARA ASEGURARSE QUE TODO EL COMBUSTIBLE SALGA DEL EXTREMO DEL DESCARGADOR DE LA BOQUILLA EN UN CHORRO CONSTANTE APROXIMADAMENTE DEL TAMAÑO DE UNA MINA DE LÁPIZ MECÁNICO Y QUE NO SALGA DESDE EL ORIFICIO DE SANGRADO DE AIRE. 7. Después de localizar la boquilla de descarga tapada, proceda a limpiarla de acuerdo a parrafo 5.10.16. (Limpieza de boquillas de descarga). Si el metodo de limpieza falla, se deberá reemplazar la boquilla de descarga INSTALACIÓN DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA 1. Ponga la boquilla de descarga en su alojamiento y apriétela con los dedos hasta sentir presión. 2. Aplique torque final de 60 libras/pulgadas. 3. conecte las cañerías de llegada de combustible a las boquillas de descarga.			
  Figura 5.14: CHEQUEO DE BOQUILLAS DE DESCARGA				
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-3: Pauta de trabajo de limpieza e inspección de boquillas de descarga.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

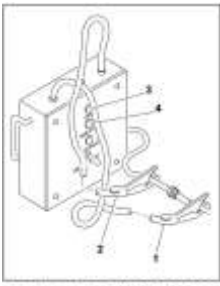
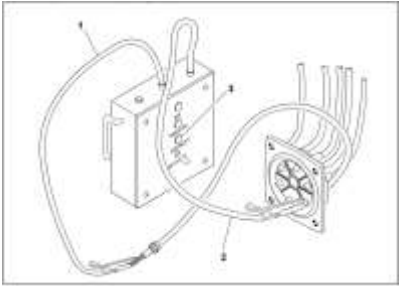
		MAINTENANCE WORK ORDER		
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		INSPECCIÓN, PRUEBA DE CONTINUIDAD Y PRUEBA DE VOLTAJE ARNES DE ENCENDIDO RH Y LH		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		EFECTUAR INSPECCIÓN, PRUEBA DE CONTINUIDAD Y PRUEBA DE VOLTAJE A ARNES RH y LH		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: INSPECCION DEL ARNES DE ENCENDIDO Revise los conjuntos de los cables por resquebrajaduras, cortes, trenzado mutilado, secciones desgastadas o cualquier otra evidencia de daño físico. Inspeccione los terminales de los cables por desgastes o rasgaduras e hilos dañados o deshilachados en las tuercas de acoplamiento. Revise el resorte de compresión para ver si está roto o deformado. Inspeccione las golillas por rasgaduras. Revise todos los soportes y abrazaderas de montaje para verificar que estén seguras y no estén resquebrajadas. PRUEBA DE CONTINUIDAD Utilizando el probador de cables de alta tension P/N11-8888-1 o equivalente. 1. Conecte el cable negro (1) al resorte de contacto y el cable rojo (2) al mismo cable del arnés en el otro extremo, en la tapa que va al magneto (Fig.5-34). 2. Observe que la ampolleta de CONTINUIDAD (3) se encienda. PRUEBA DE ALTO VOLTAJE Utilizando el probador P/N 11-8888-1 o equivalente de la siguiente forma: 1. Conecte el cable rojo (1) del probador al resorte de contacto del cable del arnés. 2. Conecte el cable negro (2) del probador al blindaje del mismo cable (Fig.5.35). 3. Presione el interruptor del botón "PRESS-TO-TEST" (presione-para-probar). 4. Observe que la ampolleta "INDICATOR" (4)(indicadora) y la ampolleta del "GAP" (3) se enciendan simultáneamente mientras el interruptor PRESS-TO-TEST se mantenga presionado. Cuando la ampolleta "INDICATOR" se encienda y la ampolleta del "GAP" no encienda, el cable sometido a prueba esta defectuoso.  Figura 5.34 PRUEBA DE CONTINUIDAD DE CABLES DEL ARNES DE ENCENDIDOFigura 5.35 PRUEBA DE ALTO VOLTAJE DE LOS CABLES DE ARNES DE ENCENDIDO			
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-4: Pauta de trabajo de inspección, prueba de continuidad y de voltaje a arnés de encendido RH y LH.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

		MAINTENANCE WORK ORDER		
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		INSPECCIÓN, LIMPIEZA Y AJUSTE DE PLATINOS DE MAGNETOS RH Y LH		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		EFECTUAR INSPECCIÓN, LIMPIEZA Y AJUSTE DE PLATINOS DE MAGNETOS RH Y LH		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DE MAGNETOS 1. Desmonte los magnetos RH y LH, de acuerdo a la O.T. 1T-35-2. parrafo 5-12.2 2. Inspeccione los Platinos por desgaste excesivo o quemados. Picaduras profundas o areas excesivamente quemadas. Si es necesario los platinos se pueden limpiar con una lima plana. 3. Si encuentra exceso de aceite limpiar con un paño limpio y seco 4. Utilice una lámpara de sincronización para ajustar los platinos de manera que comiencen a abrirse justo cuando el marco está en contacto con el calibre T-150. Esto proporcionará una separación de los platinos de 0.008 a 0.010 pulgadas. INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE MAGNETOS 1. Instale los magnetos de acuerdo a la O.T. 1T-35-2. parrafo 5-13.3  Figura 5.33 REVISION DE PLATINOS			
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-5: Pauta de trabajo de inspección, limpieza y ajuste de platinos de magnetos RH y LH.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

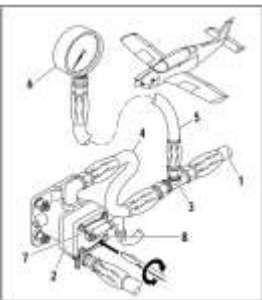
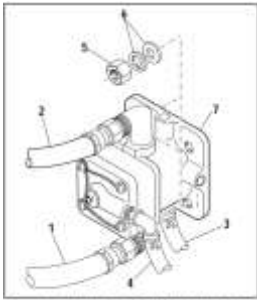
 MAINTENANCE WORK ORDER				
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		DIAGNOSTICO Y PRUEBA FUNCIONAL EN BANCO DE PRUEBAS		
FECHA		DESCRIPCION		
O/T N°		DESMONTAR BOMBA MECANICA DE COMBUSTIBLE Y ENVIAR A MANTENIMIENTO DE DEPOSITO		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DE LA BOMBA DE COMBUSTIBLE 1. Desmonte la bomba mecanica de combustible, de acuerdo a la O.T. 1T-35-2. 2. parrafo 5-10.2 PRECAUCION: Coloque tapones a las mangueras de combustible y tape el orificio del motor para evitar la entrada de partículas extrañas al sistema. INSTALACION DE LA BOMBA DE COMBUSTIBLE 1. Retire la tapa en el orificio del motor. 2. Coloque la bomba de combustible (7) en su alojamiento. 3. Instale las golillas (6) y las tuercas (5) que aseguran la bomba a la caja de accesorios del motor. 4. Conecte las mangueras de: a. Llegada de combustible (1). b. Salida de combustible (2). c. Drenaje de combustible (3). d. Presión atmosférica (4). 5. Haga funcionar el motor y verifique que la bomba funciona correctamente, sin filtraciones. 6. Instale la capota superior del motor, según párrafo 5-5.2. REGULACION DE LA BOMBA DE COMBUSTIBLE 1. Coloque el interruptor Master en posición OFF. 2. Coloque la selectora de combustible en posición OFF. 3. Retire la capota superior del motor según párrafo 5-5.1. 4. Desconecte la manguera de salida (1) de la bomba de combustible del motor (2). 5. Conecte a esta manguera una T (3) y otra manguera (4) a la salida de la bomba de combustible. 6. Conecte otra manguera (5) a la T y un manómetro (6) de prueba, con divisiones de 0 a 50 PSI, al extremo libre de la manguera. 7. ponga en marcha el motor. De acuerdo al manual de vuelo. 8. Verifique que las temperaturas del motor estén dentro de los rangos operacionales. 9 Corte la frenadura (7) del tornillo de regulación de la bomba (8). 10. Mueva el acelerador hasta obtener 40% de RPM. 11. Gire el tornillo de regulación (8) de la bomba para obtener 27 +/-0,5 PSI. En sentido horario aumenta la presión, en sentido contrario ésta disminuye. 12. Acelere el motor hasta 75% de RPM y luego vuelva hasta obtener 40% de RPM. 13. Una vez estabilizado el motor en 40% de RPM, confirme el valor de la presión de combustible. Si ha variado, vuelva a regularla. 14. Detenga el motor, de acuerdo al manual de vuelo. 15. Retire las dos mangueras y la T con el manómetro de pruebas utilizado. Reconecte la manguera (1) de salida de la bomba de combustible. 16 Frene el tornillo de regulación de bomba 17. Instale la capota superior del motor, según párrafo 5-5-2-  Figura E-10 DESMONTAJE E INSTALACION DE LA BOMBA DE COMBUSTIBLE Figura E-11 REGULACION DE LA BOMBA DE COMBUSTIBLE DEL MOTOR			
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-6: Pauta de trabajo de cambio de bomba mecánica de combustible.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

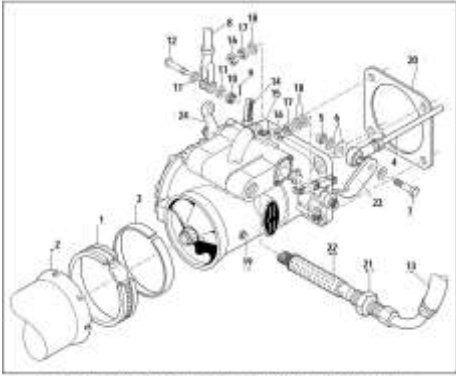
		MAINTENANCE WORK ORDER		
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		LIMPIEZA DE FILTRO DE COMBUSTIBLE DE SERVO INYECTOR		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		EFECTUAR LIMPIEZA A FILTRO DE COMBUSTIBLE DE SERVO INYECTOR		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DEL FILTRO DE COMBUSTIBLE 1. Coloque el interruptor Master en posición OFF. 2. Selectora de combustible en OFF. 3. Desconecte la manguera de llegada de combustible (13). 4. Retire el niple de entrada de combustible (21). 5. Remueva el filtro de combustible (22). LIMPIEZA DEL FILTRO DEL SERVO INYECTOR DE COMBUSTIBLE Se debe sumergir el filtro en Metil etil ketona, varsol o algún solvente similar. Retire el filtro del solvente y séquelo con aire comprimido seco. Si hay evidencia de daños se debe cambiar el filtro. INSTALACION DEL FILTRO DE COMBUSTIBLE (Fig. 5.12) 1. Coloque el filtro (22) en su alojamiento. 2. Instale el niple de entrada de combustible (21). 3. Conecte la manguera de llegada de combustible (13). 4. Si en prueba de motor el servo inyector de combustible muestra variaciones de relanti y mezcla, ajuste el relanti y mezcla según O.T. 1T-35-2 parrafo 5-10.19 5. Si la falla persiste Reemplaze servo inyector por posible obstruccion.			
				
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-7: Pauta de trabajo de limpieza de filtro de servo inyector de combustible.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

		MAINTENANCE WORK ORDER		
AVION		TIPO DE TRABAJO		
N/S MOTOR		DIAGNOSTICO, PRUEBA FUNCIONAL Y CALIBRACIÓN EN BANCO DE PRUEBAS DE SERVO INYECTOR		
FECHA		DESCRIPCIÓN		
O/T N°		DESMONTAR SERVO INYECTOR DE COMBUSTIBLE Y ENVIAR A MANTENIMIENTO DE DEPOSITO		
ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO				
OPERACIONES		EJECUTANTE	INSPECTOR/SUPUERSVISOR	
SEC.	DESCRIPCION	FIRMA R.U.N	APROBADO	RECHAZADO
10	TALLER MOTORES: DESMONTAJE DEL SERVO INYECTOR DE COMBUSTIBLE 1. Desinstale el Servo Inyector de combustible de acuerdo a la O.T. 1T-35-2, parrafo 5-10.5 INSTALACIÓN DEL SERVO INYECTOR DE COMBUSTIBLE 1. Coloque el servo inyector (19) en su alojamiento en el motor con la empaquetadura (20). 2. Instale las golillas (18), las tuercas (17) y los seguros (16). 3. Conecte las mangueras de: a. Llegada de combustible (13). b. Salida de combustible (14). c. Presión de combustible (15). 4. Conecte el cable del acelerador (4) instalando el perno (7), las golillas (6) y la tuerca (5). Conecte el cable de la mezcla (8), instalando el pasador (12), la golilla (11), la tuerca (10) y la chaveta (9). 5. Instale el espaciador (3), el ducto de aire (2) y la abrazadera (1). 6. Verifique la palanca del acelerador (23) y de mezcla (24) por libre recorrido. 7. Accione la bomba reforzadora de combustible y revise todas las uniones en el servo inyector para ver si hay filtraciones. AJUSTE DE RALENTI Y MEZCLA 1. Haga funcionar el motor y calientelo hasta que la temperatura de aceite y de cabeza de cilindros esten dentro de los rangos normales de operación. Temperatura de aceite: 24°C - 118°C. Temperatura de cabeza de cilindros: 94°C - 246°C. 2. Pruebe magnetos según manual de vuelo; si la caída de magnetos es normal, no más de 7% y la diferencia entre ambos no mayor a 2% de RPM, proceda con el ajuste del servo inyector para ralentí 3. Coloque la palanca del acelerador en posición cerrado, para obtener 21 a 25% de RPM en ralentí. De no ser así, ajuste el perno de regulación de ralentí (1) del servo inyector, en el sentido horario para aumentar RPM o en sentido contrario para disminuir RPM. 4. Cuando el ralentí se haya estabilizado, mueva la palanca de control de mezcla lentamente, con un movimiento firme y sostenido a la posición de corte de mezcla "IDLE CUT OFF" y observe el tacómetro por cualquier cambio durante el proceso de empobrecimiento. 3. Verifique el sistema de induccion por evidencia de filtracion, y de ser necesario apriete todas las conexiones en el sistema de induccion.			
20	CONTROL DE CALIDAD: Certificar trabajo según operación 10			

Figura 3-8: Pauta de trabajo de cambio de servo inyector de combustible.

Fuente: Procedimiento extraído de Orden Técnica 1T-35-2 - Manual de Mantenimiento del avión T35-Pillan. Formato de plan de mantenimiento de elaboración propia.

3.2.1 CHECKLIST

A continuación, se detalla un checklist de prueba de motor, el cual tiene como propósito monitorear y asegurar que todos los parámetros de funcionamiento del motor se encuentren dentro de los rangos establecidos por el fabricante, con el fin de asegurar la aeronavegabilidad y certificar el retorno al servicio de la aeronave.

CHECKLIST PRUEBA DE MOTOR				
AVIÓN	HR AVIÓN	N/S MOTOR	HR. MOTOR	UBICACIÓN
FECHA TEMP. AMB.				
POTENCIA	PRUEBA	V. NOMINAL	CON/OBS.	SIN/OBS.
Puesta en marcha	Tiempo para partir	Máx. 10 segundos		
	Oil press sobre 24 p.s.i.	Máx. 30 segundos		
Relantí	Magnetos a masa			
Calentamiento del motor 40% a 50%	Oil press.	55 a 95 p.s.i.		
	Oil temp.	Hasta alcanzar 60°C		
	temp. Cab. Cil.	96 a 246 °C		
Ralentí	Bomba mecánica	12 PSI Min.		
55%	Paso de Hélice (caída)	10% - 18% Max.		
75%	Magneto RH	Máx. 7%, dif. 2%		
	Magneto LH	Máx. 7%, dif. 2%		
	Sello de carlinga	ON/OFF		
	E.G.T.	125° F máx.		
Acelerador todo adelante	R.P.M.	97,5% a 99%		
	Manómetro de carga	26 a 27 pulg. HG		
	Flujómetro	155 a 165 lbs/hr.		
	Oil press	55 a 95 p.s.i.		
	Bomba mecánica	18 a 28 p.s.i.		
	Oil temp.	60 a 100° C.		
40%	Bomba Booster	1,5 ± 0,5 p.s.i. sobre bomba Mec. Máx % RPM		
	Bomba Mecánica	18 PSI Mínimo		
Acelerador todo adelante	Booster ON	Acelerador suavemente a relantí, verifique que el motor no tienda a cortar o detenerse		
Relantí	Aire Alterno	Leve caída (r.p.m.)		
	Acelerador	22% a 26% (r.p.m.)		
	Mezcla	Subir 2% máx. (r.p.m.)		
INSPECTOR DE CALIDAD: _____ RUN: _____ FIRMA: _____				

Figura 3-9: Checklist prueba de motor

Fuente: Procedimiento extraído de Manual del operador avión T35-Pillan. Formato checklist de elaboración propia.

Las ordenes de trabajo anteriormente expuestas, se llevarán a cabo de acuerdo a lo establecido en la hoja de decisión RCM tabla 2-3, capítulo 2. Estos procedimientos deben ser integrados en el software de mantenimiento que actualmente dispone la división de aviones de instrucción, con el propósito de introducir o ajustar los requisitos de inspección correspondientes. En este contexto el software deberá configurar una nueva alerta de inspección programada identificada como PPM de cumplimiento, la cual estará asociada a cada componente critico según su periodicidad y criterios de intervención establecidos.

La ejecución de los trabajos de mantenimiento es responsabilidad del Especialista en motores, quien, al finalizar la tarea asignada, debe certificar la correcta ejecución en el sistema de mantenimiento. adicionalmente, esta tarea es revisada y certificada por el inspector de control de calidad, garantizando así que se mantenga un control riguroso y un registro detallado de las inspecciones efectuadas en cada motor y aeronave.

3.3. COMPARACIÓN DE COSTOS

A continuación, se presenta un análisis comparativo asociado a los costos de mantenimiento actuales frente a los costos estimados al implementar la metodología RCM. Este análisis busca identificar las diferencias y los beneficios que podrían surgir al implementar la metodología RCM, proporcionando una visión detallada sobre la viabilidad y la eficiencia de los gastos asociados.

Plan de mantenimiento actual sin RCM [USD/Anual]	\$	31.263
Propuesta de plan de mantenimiento con RCM [USD/Anual]	\$	12.358
Ahorro	\$	18.905

Tabla 3-2: Comparación de costos

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 3-2, la implementación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), proporciona un beneficio cuantitativo significativo en la gestión de mantenimiento, permitiendo una reducción del presupuesto anual de mantenimiento del sistema critico en un 60%. En términos concretos, esto significa que el presupuesto del plan actual de mantenimiento sin RCM el cual equivale a un total de \$ 31.263 USD, se reduce considerablemente al implementar la propuesta de plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, el cual tiene un costo total de \$ 12.358 USD. Esta significativa reducción de costos no solo optimiza los recursos económicos, sino que también mejora la eficiencia operativa,

garantizando un enfoque más efectivo y sostenible en la gestión de mantenimiento de la flota de aeronaves T35-Pillan.

Desde una perspectiva analítica, la metodología RCM contribuye significativamente a mejorar la confiabilidad. Un indicador adicional de gran relevancia es el impacto positivo que esta estrategia de mantenimiento basada en la confiabilidad genera en la disponibilidad de la flota T35 Pillan, lo cual asegura que las aeronaves se mantengan en condiciones óptimas para la realización de vuelos de instrucción. Asimismo, al reducir los tiempos de inactividad de la aeronave y los costos asociados a detenciones no programadas, se optimiza la eficiencia operativa y lo más importante garantizar la seguridad en las operaciones de vuelo.

CONCLUSIONES

La propuesta de implementación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el sistema motor de la aeronave T-35-Pillan, permitió demostrar que la aplicación de metodologías estructuradas basadas en el análisis funcional y la evaluación de modos de falla, contribuye significativamente a optimizar el desempeño técnico-operacional y a reducir los costos de mantenimiento asociados al sistema evaluado. La identificación anticipada de fallos potenciales facilita la definición de tareas de mantenimiento más eficaces que mejor se ajusten para cada modo de fallo, logrando un control más eficiente sobre el estado del sistema, evitando fallas imprevistas y prolongando la vida útil de los componentes del sistema motor.

Uno de los principales logros alcanzados es la disminución de los costos anuales de mantenimiento, reduciendo el gasto de \$ 31.263 USD a \$ 12.358 USD, lo que representa un ahorro del 60 %. Esta mejora no solo implica un uso más eficiente de los recursos económicos, sino también una disminución de las tareas de mantenimiento correctivo, generando un impacto positivo en la confiabilidad operacional, la disponibilidad de aeronaves y en el grado de satisfacción del cliente.

Además, la metodología RCM permite establecer una gestión de mantenimiento basada en datos, retroalimentación constante y mejora continua, lo cual es muy considerada en entornos operacionales altamente exigentes como el aeronáutico. El análisis realizado demuestra que la implementación del plan basado en la metodología RCM es altamente viable, y promueve una gestión técnica más robusta y orientada a la confiabilidad operacional del sistema motor y al mismo tiempo de la aeronave.

En conclusión, el enfoque RCM aplicado al sistema motor de la aeronave T-35 Pillan no solo cumple con los objetivos técnicos y económicos del proyecto, sino que representa un modelo replicable, sustentable y alineado con las buenas practicas establecidas por las autoridades aeronáuticas Nacional e internacional en la gestión del mantenimiento aeronáutico.

RECOMENDACIONES

Capacitación continua del personal: Con el fin de asegurar una adecuada implementación del plan de mantenimiento basado en la metodología RCM, resulta fundamental proporcionar una formación constante al personal técnico. Esta capacitación debe enfocarse en las nuevas prácticas y procedimientos de mantenimiento, de manera que el personal esté debidamente preparado para aplicar y sostener las estrategias establecidas de forma eficaz y sostenible

Establecer un sistema de retroalimentación y mejora continua: Es recomendable implementar mecanismos de evaluación periódica del desempeño del plan RCM, con el fin de ajustar las estrategias en función de datos reales, experiencias operativas y evolución del estado del sistema motor de la aeronave.

Extensión de la metodología RCM en otros sistemas críticos de la aeronave: Dado el impacto positivo observado en el sistema motor, se recomienda evaluar la viabilidad de extender la metodología RCM a los demás sistemas de la aeronave, como el sistema aviónica, eléctrico, hidráulico, etc.

Incorporar tecnologías de monitoreo predictivo: Se sugiere la implementación de herramientas tecnológicas avanzadas para el monitoreo continuo de los parámetros operativos del motor, como por ejemplo el sistema EMS (Engine Monitoring System), que permitan detectar anomalías en tiempo real y anticiparse a posibles fallas. Otra herramienta que se puede introducir es el machine learning. El enfoque predictivo es altamente beneficioso para el campo aeronáutico debido a su alta eficiencia para el monitoreo y anticipación de fallas lo cual es beneficioso para la confiabilidad operacional y disponibilidad de la aeronave, además del impacto positivo que genera en los costos de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- John Moubray (2004). RCM II: Reliability Centered Maintenance Secon Edition.
- BS ISO 14224:2016. (2016). Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural-recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimeinto de equipos.
- Parra, C., & Crespo, A. (2020). Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos. Dept. Industrial Management. University of Seville: Ingeman.
- Pistarelli, A. J. (2010). Manual de mantenimiento: ingeniería, gestión y organización. Buenos Aires.
- Norma SAE JA 1011. (1999). Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
- Norma SAE JA 1012. (2002). Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).
- Diapositiva de clases de Ingeniería del mantenimiento. Universidad Tecnica Federico Santa Maria. ing. Pablo Duque Ramírez
- Orden Tecnica 1T-35-2. (Cambio 19, 2019) Manual de Mantenimiento Avión T35-Pillan – ENAER.
- Manual L-1363J (2021) 4300/6300 Magneto Maintenance and Overhaul Manual
- Norma DAN 145 (ED 2 / JUN 2011) – Centros de mantenimiento aeronautico – Dirección General de Aeronáutica Civil.
- www.enaer.cl