



Diseño de un sistema de mantenimiento proactivo basado en la metodología RCM como propuesta para el mantenimiento de las plantas eléctricas tipo GPU del GANCA

Alfonso Rafael Fren Mejía^{a,b}, Víctor Andrés Howard Leal^c & Carlos Ramón Batista Rodríguez^c

^a Decanatura Académica, Escuela Naval de Suboficiales ARC "Barranquilla", Barranquilla, Colombia,
alfonso.fren@armada.mil.co

^b Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia.
afren08@uan.edu.co, vhoward26@uan.edu.co

^c Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, Universidad Antonio Nariño, Barranquilla, Colombia.
carlos.batista@uan.edu.co

Recibido: Octubre 01, 2022

Recibido en su versión corregida: Octubre 20, 2022

<https://doi.org/10.54606/Sextante2022.v27.01>

Aceptación: Octubre 31, 2022

Cómo citar: Fren Mejía, A. R., Howard Leal, V. A., Batista Rodríguez, C.R. (2022). Diseño de un sistema de mantenimiento proactivo basado en la metodología RCM como propuesta para el mantenimiento de las plantas eléctricas tipo GPU del GANCA. Revista Sextante, 27, pp. 1 - 9, 2022.

Resumen

En este artículo se desarrolló una propuesta de trabajo cuyo propósito fue diseñar una alternativa de mantenimiento basada en confiabilidad para brindar mayor disponibilidad operativa en las Unidades de alimentación de Potencia eléctrica a Aeronaves en Tierra (GPU), del Grupo Aeronaval del Caribe (GANCA) en la ciudad de Barranquilla. Como resultado de la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), se logró el desarrollo de matrices, análisis de criticidad, causas y consecuencias a partir de la recolección, clasificación y categorización de los equipos, subsistemas y sistemas hasta el nivel de componentes; esto con el fin de reconocer, anticipar y controlar los modos de falla a través de tareas de mantenimiento. Con esto, el GANCA tendrá una solución para el mantenimiento de sus GPU, que servirá de referencia para impactar en el aumento de la disponibilidad y con ello mejorar la efectividad de mantenimiento, que podrá ser usada como referencia para otros equipos de apoyo terrestre en la Aviación Naval de Colombia. Desde el punto de vista práctico, se recomienda usar el esquema propuesto en este trabajo.

Palabras clave: Análisis de criticidad; Gestión de mantenimiento; GPU; Mantenimiento centrado en confiabilidad.

Proactive maintenance system design based on the RCM methodology as a proposal for maintaining GANCA's GPU-type power plants

Abstract

This article develops a proposal whose purpose was to design a maintenance alternative based on Reliability that leads to providing greater operational availability in the Ground Electric Power Supply Units for Aircraft (GPU) of the Caribbean Naval Group (GANCA) in the city of Barranquilla. As a result of applying the Reliability Centered Maintenance (RCM) methodology and recognizing, anticipating, and controlling failure modes through maintenance tasks, the following activities are required: i) collection, ii) classification, and iii) categorization (i.e., equipment, subsystems, and systems, down to the component level, development of matrices, criticality analysis, causes, and consequences). With this, GANCA will have a solution for the maintenance of its GPUs that will serve as a reference to impact the increase in availability and improve the effectiveness of maintenance, and that can be used as a reference for other equipment that provides ground support in Colombian Naval Aviation. From a practical point of view, it is recommended to use the scheme proposed in this work.

Keywords: Criticality analysis; Maintenance management, GPU; Reliability centered maintenance.



1. Introducción

La Ingeniería de Confiabilidad es el estudio de la longevidad y el fallo de los equipos. Es una metodología desarrollada en sus orígenes por la industria comercial de aviación de U.S.A., en su búsqueda de lograr mejoramiento en temas de seguridad y confiabilidad. Debido a la gran importancia de mantener los equipos con la finalidad de garantizar la máxima disponibilidad de las plantas eléctricas tipo GPU (por las siglas en inglés de Ground Power Unit), resulta necesario comprender el proceso de fallo de los dispositivos, con el fin de lograr mejoras a través de la integración de nuevos programas de mantenimiento. Los documentos que contienen los requisitos de mantenimiento deben revisarse periódicamente para identificar procesos, técnicas o tecnologías de mantenimiento; como para llamar la atención sobre herramientas y suministros obsoletos. Con la mejora de las técnicas actuales de mantenimiento se incrementa la disponibilidad de los equipos y a su vez la confiabilidad.

El presente artículo tiene como finalidad realizar la propuesta de un programa de mantenimiento aplicando la metodología Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por las siglas en inglés de Reliability Centered Maintenance) en las plantas tipo GPU del Grupo Aeronaval del Caribe.

2. Metodología

Para llegar a la propuesta final del sistema RCM, se planteó una metodología que consta de tres fases, con el objetivo de garantizar la efectividad del resultado previsto.

2.1. Fase previa a la aplicación del RCM

Antes de iniciar con el análisis resulta de suma importancia la recolección, organización y el análisis de la información, enfocada sobre los componentes de las plantas GPU.

Etapa de recopilación de la información

Para la aplicación de la metodología de RCM es pertinente crear mecanismos que permitan recopilar la información necesaria de los componentes de la planta GPU. “Esta información incluye planos, diagramas, manuales, bitácoras de operación / mantenimiento y documentos como el contexto operativo” (Ayauca Sierra, (2019)). De hecho, es esencial que se realicen encuestas y entrevistas a los operadores y al personal de mantenimiento.

Etapa de clasificación

En esta etapa se determinó el número de equipos que tiene el GANCA; su categoría, clase o tipo, esto de acuerdo con la forma que el Grupo Aeronaval los clasifique o identifique.

Etapa de análisis en el contexto operativo

En esta etapa se definieron las condiciones reales donde operan los equipos, incluyendo criterios y parámetros que el usuario expuso por medio de la solución de preguntas que serán analizadas, tanto numérica como gráficamente (Achahuanco Molina, 2020).

2.2. Fase de análisis

Toda la información recogida en la fase anterior permitió combinar la información suministrada en los manuales del fabricante y las experiencias de los técnicos de mantenimiento. Se buscó determinar los modos, causas de fallas y categorización de cada uno de los efectos y su prioridad de riesgo.

Etapa de análisis de modos de causa y fallas

La información recopilada permitirá definir el modo de falla; es decir, cuál sería el síntoma o evento de ocurrencia.

Etapa de categorización de efectos de falla

Para proporcionar una visión completamente transparente y rápida de lo ocurrido en el RCM “se propone incluir junto al enunciado del efecto de falla, la categorización del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) correspondiente” (Anaguano Lamiña, 2018). Esto es, parámetros asociados a la función cualitativa a partir de tres criterios: severidad, detectabilidad y ocurrencia.

2.3. Fase de retroalimentación y resultados

Después de la obtención de los resultados con esta metodología, se continuó con el proceso de asignación en materia de responsabilidades; de este modo la ejecución del plan de mantenimiento sería correcto.

Etapa de puesta en marcha

Con el fin de poner en práctica la metodología de mantenimiento propuesta se presentó un procedimiento general, con sugerencias acerca de la forma cómo deberá integrarse a los procesos de gestión de mantenimiento a las plantas GPU del GANCA.

3. Resultados

Se detalló cómo se concretaron las acciones previstas y cuáles fueron los resultados, parciales y finales, al cumplir las tareas emanadas de las etapas de la metodología prevista.

3.1. Recopilación de información sobre activos, clasificación y contextualización de funciones operacionales.

En la actualidad, la Aviación Naval de Colombia cuenta con diez plantas Eléctricas tipo GPU a nivel nacional. De ellas, tres plantas pertenecen a la División de Equipo Terrestre de Apoyo Aéreo (ETAA) del Grupo Aeronaval del Caribe

(GANCA), unidad militar donde se realizó la propuesta de mantenimiento. Teniendo en cuenta la confidencialidad de las unidades militares, se tomó como base el historial disponible de las plantas eléctricas tipo GPU, entregado por el GANCA.

A partir del plan de mantenimiento que se realiza actualmente en las plantas tipo GPU, se analizó y efectuó la revisión correspondiente para encontrar las oportunidades de mejora y fallas de mantenimiento de los equipos. En ese orden de ideas, se tomaron como referencia los registros históricos de las plantas tipo GPU, y se inició el proceso de agrupación de los componentes del sistema propuesto, teniendo en cuenta las funciones de estos.

Para recopilar la información se utilizó el historial de equipos, formatos de inspección y avería. En la [Tabla 1](#) se resumen las incidencias a nivel nacional, en la [Tabla 2](#) se presentan las incidencias de los sistemas de esas plantas GPU.

Las gráficas de Pareto, presentadas en las Figuras [1](#) y [2](#), demuestran la importancia de iniciar la propuesta de mantenimiento en las plantas eléctricas GPU del Grupo Aeronaval del Caribe en la ciudad de Barranquilla. Los análisis realizados a estos equipos se identifican hasta el nivel de ensamble de cada sistema, véase las Tablas [3](#) y [4](#).

3.2. Análisis de los modos, causas y efectos del fallo y cómo afecta al funcionamiento general del grupo

Al desarrollar un análisis profundo de las causas y efectos de fallas con el método de RCM ha sido posible determinar cuáles son las actividades necesarias para que este siga en operatividad de forma eficiente. En efecto, para que funcione debe conocerse la secuencia del proceso del RCM (ver [Figura 3](#)).

Tabla 1. Número de incidencias en plantas de la aviación naval.

| Aeropuerto | # Incidencias | % Total | % Acumulado |
|-----------------|---------------|---------------|-------------|
| 1. Barranquilla | 45 | 80,36 | 80,36 |
| 2. Bogotá | 6 | 10,71 | 91,07 |
| 3. Juanchaco | 5 | 8,93 | 100,00 |
| Total | 56 | 100,00 | |

Fuente: Los autores.

Tabla 2. Número de incidencias en las plantas por sistemas.

| Código | Sistema | Incidencias | %Total | %Acumulado |
|--------------|----------------------|-------------|------------|------------|
| 1 | Mecánico-motor | 14 | 66,7 | 66,7 |
| 2 | Control e indicación | 4 | 19,0 | 85,7 |
| 3 | Estructural | 2 | 9,5 | 95,2 |
| 4 | Eléctrico-generador | 1 | 4,8 | 100,0 |
| Total | | 21 | 100 | |

Fuente: Los autores.

Tabla 3. Subsistema - Grupo GPU Generador Hobart JetEx6D.

| Subsistema | Grupo |
|-----------------------|--|
| Eléctrico – Generador | Conjunto Generador |
| | Conjunto Rectificador |
| Mecánico – Motor | Motor de combustión interna |
| | Sistema eléctrico del motor |
| | Sistema de abastecimiento de combustible |
| | Sistema de enfriamiento, refrigeración |
| | Sistema de Admisión de aire |
| Indicación y Control | Sistema de lubricación |
| | Sistema de extracción de gases |
| | Sistema de indicación y control Generador |
| | Conjunto Sistema de indicación y control motor |
| Complementarios | Caja de Control interna |
| | Estructura, chasis y remolcador |

Fuente: Los autores.

Tabla 4. Función principal de los equipos.

| GPU Generador Hobart JetEx6D | | | |
|---------------------------------|--|---|--|
| Subsistema | Grupo | Componente | Función principal |
| Electro – Generador | Conjunto generador | Generador | Produce y suministra energía de 28,5 V CC, 600 A, a una aeronave estacionada u otras cargas. |
| | Conjunto rectificador | Rectificador | Convierte la salida de Corriente Alterna del generador a 28,5 Voltios de Corriente Continua. |
| Mecánico – Motor | Motor de combustión interna. | Polea de ventilador | Aloja la correa por medio de la cual se transmite el movimiento desde la volanta del motor. |
| | Sistema eléctrico del motor | Alternador 12 V DC | Cargar las baterías y alimentar el sistema eléctrico interno. |
| | Sistema de abastecimiento de combustible | Cuello y tapa de llenado de combustible | Permite el reabastecimiento de combustible desde el exterior. |
| | Sistema de enfriamiento, refrigeración | Radiador y Enfriador de aire de carga | Disminuye la temperatura del aire de admisión. |
| | Sistema de Admisión de aire. | Múltiple de admisión. | Permite la entrada de aire desde el filtro de aire hasta la cámara de combustión. |
| | Sistema de lubricación. | Carter | Contiene el aceite del motor. |
| Sistema de extracción de gases. | Múltiple de escape | Permite la salida de los gases de escape de cada cilindro y los conecta con el turbocargador. | |
| Indicación y Control | Sistema de indicación y control Generador | Voltímetro CC (M406) | Muestra la salida de voltaje del rectificador. |
| | Conjunto Sistema de indicación y control motor | Interruptor resortado de arranque (S401) | Cierra el solenoide de arranque circuito y arranca el motor. |
| | Caja de Control interna | Relé de sobrevoltaje (K403) | Interrumpe el suministro de energía en caso de sobrevoltaje. |
| Complemento | Estructura, chasis y remolcador | Chasis | Conecta todos los conjuntos de la planta, soporta las cargas estructurales de diseño. |

Fuente: Los autores.

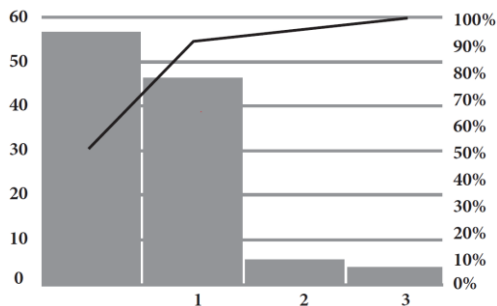


Figura 1. Fallas presentadas en plantas Aviación Naval. Fuente: Los autores.

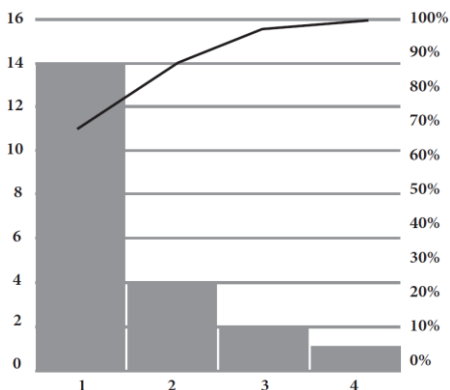


Figura 2. Diagrama de Pareto - Historial de Fallas. Fuente: Los autores.

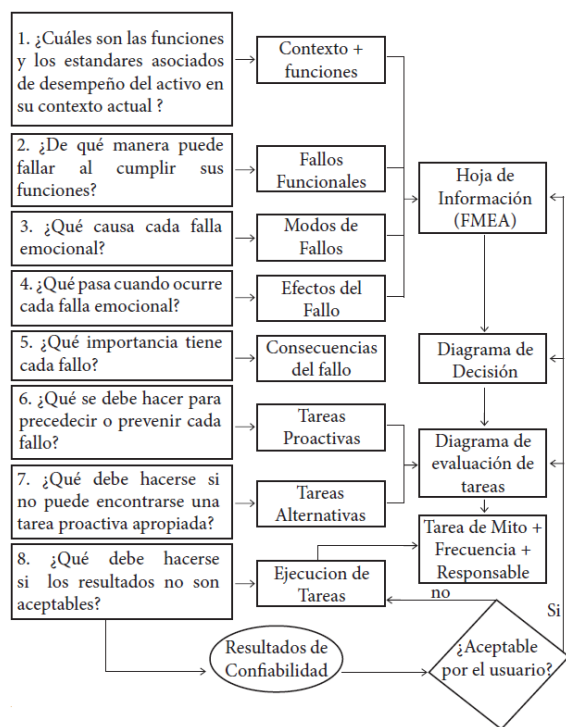


Figura 3. Secuencia del RCM. Fuente: Tomado de (Cabrera Ramón & Tapia González, 2019).

Como consecuencia, se busca determinar una decisión y encontrar patrones en las fallas que sean identificables.

Las mencionadas características permitirán resolver problemas encontrados. Por su parte, la metodología aplicada busca reducir las fallas producidas por el equipo. Estos eventos se muestran en la [Tabla 5](#), discriminados de acuerdo con el grupo.

Sin embargo, la NTP 679 definió el análisis de los modos (síntomas), “como la forma en la que una pieza o conjunto pudiera fallar potencialmente a la hora de satisfacer el propósito de diseño/proceso, los requisitos de rendimiento y/o las expectativas del cliente” (AMFE., 2021). El análisis de causa raíz o RCA pone a pensar sobre el problema como si fuera uno común, por tanto, se asume la prevención y la solución bajo la unión de técnicas asociadas a unas tendencias que son realizadas por los procesos; los cuales son actualizados de manera continua para el mejoramiento de este. Algunos de estos fallos se presentan en la [Tabla 6](#).

Tabla 5. Análisis Grupo – Evento.

| Grupo | Cód. Evento | Evento |
|-------|-------------|---|
| 1 | 1.1 | Equipo no entrega corriente de salida |
| | 1.2 | Salida del generador nula (o baja) tensión en todas las fases |
| 2 | 2.1 | Salida del generador nula (o baja) |
| 3 | 3.1 | Equipo no arranca |
| 4 | 4.1 | Equipo no arranca |
| | 4.2 | Batería descargada |
| 5 | 5.1 | Fluctuación de voltaje |
| | 5.2 | Parada durante la operación |
| 6 | 6.1 | Alta temperatura de refrigerante |
| 7 | 7.1 | Restricción de aire de admisión |
| 8 | 8.1 | Escape de lubricante |
| | 8.2 | Equipo no arranca |
| 9 | 9.1 | Ruido excesivo |
| | 9.2 | Humo negro |
| 10 | 10.1 | Tablero de control aislado |
| | 10.2 | Señal de voltaje inexistente |
| 11 | 11.1 | Monitor no enciende |
| | 11.2 | Valores de los parámetros no coinciden |
| 12 | 12.1 | Equipo corroído |
| | 12.2 | Llantas bloqueadas |

Fuente: Los autores.

Tabla 6. Evento – Falla.

| Cod. Evento | Cod. Falla | Falla |
|-------------|------------|---|
| 1.1 | 1.1.1 | Ruptura cable de entrega |
| 1.2 | 2.1.1 | Diodo en cortocircuito en el rectificador del excitador |
| 3.1 | 3.1.2 | Batería descargada |
| 4.1 | 4.1.1 | Tanque de combustible vacío |
| 4.2 | 4.2.1 | Bajo nivel de electrolito |
| 5.1 | 5.1.1 | Filtro de combustible sucio |
| 5.2 | 5.2.1 | Nivel bajo de combustible |
| 6.1 | 6.1.1 | Bajo nivel de refrigerante |
| 7.1 | 7.1.1 | Sensor de presión diferencial defectuoso |
| 8.1 | 8.1.1 | Empaque de cárter averiado |
| 8.2 | 8.2.1 | Sensor de bajo nivel de aceite activado |
| 8.3 | 8.3.1 | Aceite degradado o contaminado |
| 9.1 | 9.1.1 | Silenciador roto |
| 9.2 | 9.2.1 | Válvulas descalibradas |
| 10.1 | 10.1.1 | Conexiones sulfatadas |
| 11.1 | 11.1.1 | No hay alimentación de voltaje |
| 12.1 | 12.1.1 | Deterioro prematuro de los componentes |

Fuente: Los autores.

Cuando los equipos revelan los efectos de los fallos, algunas de sus causas están asociadas al mal uso o abuso por parte del operador, a errores de fabricación, errores de instalación, en ocasiones se debe a un mal mantenimiento. Tales factores pueden provocar averías, causando pérdidas e incrementos de los costos de la empresa. Debe recordarse siempre que “el análisis de fallas de un sistema conlleva aplicar destrezas de tipo cognitivas, tanto para las mecánicas como para las humanas, y, por consiguiente, una estrategia de avanzada ha sido la metacognición” (Villarroel, 2020).

3.3. Determinación de los modos de Fallo Funcional

Debe tenerse presente que en los modos de fallo “es una causa de falla, cuando un sistema tiene muchas maneras posibles de fallar, tiene múltiples modos de falla o riesgos que compiten. Mientras más complejo es un sistema, más modos de falla tendrá” (Montoya Escobar, 2017). Cabe resaltar que en el momento en que se ejecute el levantamiento de una falla, se debe plantar a detalle la lógica de cada estado de falla que se pueda detectar en equipos similares, como se muestra en la [Figura 4](#).

Por otro lado, al identificar esos modos de fallas se deberían identificar a su vez sus efectos. Dentro del procedimiento de mantenibilidad de los equipos, se debe indicar qué se debería realizar si una falla se presenta. Antes de realizar una clasificación del modo de falla, se deben solucionar interrogantes asociadas a los síntomas que presenta. Por ejemplo, si muestra algún indicador luminoso durante la falla, su velocidad se verá afectada, ¿cuál es?, el equipo podría presentar explosión. Dicha falla afectaría el prestigio empresarial, a su vez tiene afectaciones al medio ambiente. Cabe señalar que esta falla es fácil de detectar. En las [Tablas 7 y 8](#) se describen los resultados del análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad, FMECA, que se realizó a cada falla y evento.

Cabe resaltar que dentro del proceso del RCM, como siguiente paso a la determinación de funciones, fallas funcionales, modos de falla y sus efectos, se deben realizar las siguientes preguntas: ¿cómo y cuánto afecta dicha falla?, ¿cómo se debe prevenir?

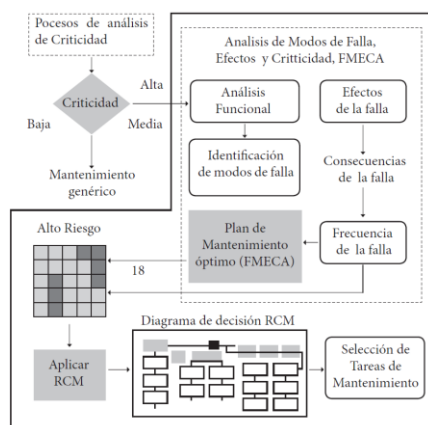


Figura 4. Proceso de Gestión del Mantenimiento aplicando el análisis de modos de falla y sus efectos y criticidad, AMFEC.
Fuente: Tomado de Aguilar Otero et al. (2010).

Tabla 7. Efectos de las fallas.

| Cod. | Efectos de la falla | Consecuencias de Falla |
|--------|--|---|
| 1.1.1 | No hay suministro eléctrico eficiente para los componentes del conjunto Transformador-rectificador | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |
| 2.1.1 | No hay estabilidad de suministro eléctrico para suministrar voltaje y corriente a equipos y sistemas externos | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |
| 3.1.2 | La alimentación eléctrica de la planta es insuficiente para el inicio parcial o total de la operación del equipo | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |
| 4.1.1 | Funcionamiento anormal, indicaciones por fuera de parámetros afectando otros sistemas de la planta GPU | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |
| 4.2.1 | Alimentación eléctrica insuficiente para mantener la operación correcta de otros componentes que lleva a una serie de errores y apagado de GPU | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |
| 5.1.1 | El motor funciona de manera irregular, con fluctuaciones de potencia | Mayor consumo de combustible, parada programada |
| 5.2.1 | El motor se apaga totalmente sin indicaciones previas de falla | Pérdida de producción y/o Operaciones, aumento de gases |
| 6.1.1 | Altas temperaturas en el motor, que conlleva a la parada de motor automática por protección | Aumento de temperatura, parada programada |
| 7.1.1 | Funcionamiento anormal que afectando otros sistemas y equipos de la GPU | Indicación errónea, parada programada. |
| 8.1.1 | Incremento de ruido por fricción entre piezas metálicas | Medio ambiente |
| 8.2.1 | Circulación de aceite insuficiente por los circuitos de lubricación. | Medio ambiente |
| 8.3.1 | lubricación insuficiente de piezas del motor | Medio ambiente |
| 9.1.1 | Afectación al medio ambiente | Medio ambiente |
| 9.2.1 | Afectación al medio ambiente | Medio ambiente |
| 10.1.1 | El equipo opera de manera insegura | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |
| 11.1.1 | Equipo no arranca | Oculto |
| 12.1.1 | Deterioro prematuro de los componentes | Pérdida de producción y/o Operaciones, fallas ocultas |

Fuente: Los autores.

Cuando se cuenta con esta metodología de RCM, el análisis de efectos resulta profundo, y en consecuencia aparecen varias categorías. La primera está asociada a las fallas ocultas o evidentes, puesto que su impacto es alto y afecta directamente la productividad; la segunda, se encuentra asociada a la seguridad y el medio ambiente, su impacto es medio o afecta al medio ambiente, o solo en su entorno; en la tercera se incluyen las consecuencias que afectan a la población e impacta sobre los trabajadores o la comunidad. Estas categorías se encuentran clasificadas en la [Tabla 9](#).

Adicionalmente, se tienen en cuenta las consecuencias “operacionales”, que afectan los costos de la empresa, aumentándolos; y, por último, las consecuencias “no operacionales” solo afectan el costo de reparación del activo. En la [Tabla 10](#) se observa la relación categoría-consecuencia del resumen de fallas.

Tabla 8. Falla - afectación al funcionamiento general del grupo al que pertenece.

| Código de Falla | Afectación al grupo al que pertenece |
|-----------------|---|
| 1.1.1 | Imposibilidad de generación de voltaje y alimentación a las aeronaves |
| 2.1.1 | |
| 3.1.2 | Imposibilidad de arranque del motor Diésel |
| 4.1.1 | |
| 4.2.1 | |
| 5.1.1 | Oscilación del voltaje de salida, aumento de costos operacionales y paradas inesperadas durante la tarea de atención a las aeronaves |
| 5.2.1 | |
| 6.1.1 | Daños mayores que conllevan a parada del equipo por trabajos de reparación y/o reconstrucción |
| 7.1.1 | Disminución de la capacidad de generación y potencia del equipo |
| 8.1.1 | Aumento de costos operacionales, disminución de la disponibilidad, ruptura de sellos, empaques y O-rings, trabajos de reparación y/o reconstrucción |
| 8.2.1 | |
| 8.3.1 | |
| 9.1.1 | Esparcimiento de residuos de combustión |
| 9.2.1 | Aumento de consumo de combustible, lubricante y pérdida de potencia |
| 10.1.1 | Equipo trabaja sin protecciones que puedan detectar posibles fallas, suspensión de la capacidad de generación. |
| 11.1.1 | Equipo trabaja sin protecciones que puedan detectar posibles fallas, condición que lo deja expuesto a daños mayores |
| 12.1.1 | Disminución e imposibilidad de la capacidad de transporte |

Fuente: Los autores.

Tabla 9. Categorías de consecuencia.

| Categoría | Menor C1 | Moderado C2 | Grave C3 | Catastrófico C4 |
|--|---|--|--|---|
| Producción | | | | |
| Pérdida de producción, daños a las instalaciones | Daños a las instalaciones y pérdida de la producción, menor a 5 millones de pesos | Daños a las instalaciones y pérdida de la producción, hasta 10 millones de pesos | Daños a las instalaciones y pérdida de la producción de hasta 20 millones de pesos | Daños a las propiedades o las instalaciones; pérdida mayor a 20 millones de pesos |
| Al ambiente | | | | |
| Descargas y derrames. | Contingencia controlable | Derrame significativo en tierra hacia ríos o cuerpos de agua | Contaminación de un gran Volumen de agua | Efecto sobre la flora y fauna |
| A las personas | | | | |
| Seguridad y salud del operador | Primeros auxilios | Lesiones menores sin incapacidad | incapacidad parcial o total temporal | Una o más fatalidades; Lesionados graves con daños irreversibles |

Fuente: Los autores.

La organización de la relación de falla y su afectación general al grupo al que pertenece se presenta en la [Tabla 11](#).

3.4. Propuesta de acciones a realizar al activo para predecir o prevenir la ocurrencia de falla y garantizar los recursos para su ejecución

Luego de haber realizado el análisis del árbol de problemas, surgieron, a modo de soluciones, las tareas de mantenimiento con el fin de poder predecir o prevenir la ocurrencia de la falla y poder garantizar la optimización de los recursos utilizados en este (ver [Tabla 12](#)). Para el equipo se proponen las estrategias de mantenimiento,

Tabla 10. Falla – Categoría de Consecuencia.

| Cód falla | Cat | Consecuencia | Cód. falla | Cat | Consecuencia |
|-----------|-----|----------------|------------|-----|----------------|
| 1.1.1 | C2 | Operacional | 8.1.1 | C2 | medio ambiente |
| 2.1.1 | C1 | Operacional | 8.2.1 | C1 | No operacional |
| 3.1.2 | C1 | operacional | 8.3.1 | C2 | No operacional |
| 4.1.1 | C1 | operacional | 9.1.1 | C1 | No operacional |
| 4.2.1 | C1 | operacional | 9.2.1 | C1 | No operacional |
| 5.1.1 | C1 | No operacional | 10.1.1 | C2 | No operacional |
| 5.2.1 | C2 | operacional | 11.1.1 | C1 | Oculto |
| 6.1.1 | C1 | No operacional | 12.1.1 | C1 | No operacional |
| 7.1.1 | C1 | No operacional | | | |

Fuente: Los autores.

Tabla 11. Consecuencias - Efecto – Afectación.

| Cód. Falla | Efecto ¿Qué sucede cuando se produce la falla? | Afectación al grupo al que pertenece. |
|------------|--|--|
| 1.1.1 | No hay suministro eléctrico eficiente para los componentes del conjunto Transformador – rectificador | Imposibilidad de generación de voltaje y alimentación a las aeronaves |
| 2.1.1 | Inestabilidad para suministrar voltaje y corriente a equipos y sistemas externos | |
| 3.1.2 | La alimentación eléctrica de la planta es insuficiente para el inicio parcial o total de la operación del equipo | Imposibilidad de arranque del motor Diésel |
| 4.1.1 | Funcionamiento anormal, indicaciones fuera de rangos afectando otros sistemas | |
| 4.2.1 | Alimentación eléctrica insuficiente para mantener la operación correcta, llevando a errores y apagado de GPU | |
| 5.1.1 | El motor funciona de manera irregular, con fluctuaciones de potencia | Oscilación del voltaje de salida, aumento de costos operacionales y paradas inesperadas durante la tarea de atención a las aeronaves |
| 5.2.1 | El motor se apaga totalmente sin indicaciones previas de falla | |
| 6.1.1 | Altas temperaturas en el motor, que conlleva a la parada de motor automática por protección | Daños mayores que conllevan a parada del equipo por trabajos de reparación y/o reconstrucción |
| 7.1.1 | Funcionamiento anormal que afectando otros sistemas y equipos de la GPU | Disminución de la capacidad de generación y potencia del equipo |
| 8.1.1 | Incremento de ruido por fricción entre piezas metálicas | Aumento de costos operacionales, disminución de la disponibilidad, ruptura de empaques, trabajos de reparación y/o reconstrucción. |
| 8.2.1 | Circulación de aceite insuficiente por los circuitos de lubricación | |
| 8.3.1 | lubricación insuficiente de piezas del motor | Imposibilidad de arranque del motor Diésel |
| 9.1.1 | Afectación al medio ambiente | Esparcimiento de residuos de combustión |
| 9.2.1 | Afectación al medio ambiente | Aumento de consumo de combustible, lubricante y pérdida de potencia |
| 10.1.1 | El equipo opera de manera insegura | Equipo trabaja sin protecciones que puedan detectar posibles fallas, suspensión de la capacidad de generación |
| 11.1.1 | Equipo no arranca. | Equipo trabaja sin protecciones que puedan detectar posibles fallas, condición que lo deja expuesto a daños mayores |
| 12.1.1 | Deterioro prematuro de los componentes | Disminución e imposibilidad de la capacidad de transporte |

Fuente: Los autores

Tabla 12. Afectación - Estrategia de Mantenimiento.

| Cod.falla | Estrategia De Mantenimiento. | TIPO | FRECUENCIA |
|-----------|-------------------------------------|--------------------|---------------------|
| 1.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Horario calendario | 2 años / 2000 horas |
| 2.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | por condición | como sea requerido |
| 3.1.2 | Mantenimiento preventivo, tarea RTF | Operacional | 1 mes |
| 4.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Preoperacional | diario |
| 4.2.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Horario calendario | 3 meses / 250 horas |
| 5.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea CD | Calendario | 1 mes |
| 5.2.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Preoperacional | Diario |
| 6.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Preoperacional | Diario |
| 7.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Preoperacional | Diario |
| 8.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Preoperacional | Diario |
| 8.2.1 | Mantenimiento preventivo, tarea CD | Preoperacional | Diario |
| 8.3.1 | Mantenimiento predictivo, tarea CD | Operacional | Diario |
| 9.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Preoperacional | Diario |
| 9.2.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Horarias | 1 año / 1000 horas |
| 10.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Horario calendario | 3 meses / 250 horas |
| 11.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Horario calendario | 3 meses / 250 horas |
| 12.1.1 | Mantenimiento preventivo, tarea TD | Horario calendario | 6 meses / 500 horas |

Fuente: Los autores.

acciones de mantenimiento, tipo y frecuencia, descritas en la [Tabla 13](#). Como es bien sabido, “en 1978 se cambiaron todas las creencias que se tenían sobre el mantenimiento, en cuanto al desgaste por la relación desempeño y el tiempo de operación; gracias a una publicación sobre el estudio de los patrones de falla de los aviones, realizada a través de United Airlines” (Mitchell Moubray, 2021). La [Figura 5](#) mostró que en realidad hay distintas formas de ocurrencia de fallos a través del tiempo, generalizadas en seis tipos de patrones, resumidos en sus respectivos gráficos.

El patrón A, o “curva de la bañera”, presentó una alta ocurrencia de fallas al inicio, luego hubo una disminución de la frecuencia de fallas y, posteriormente, un incremento potencial de la probabilidad de falla.

El patrón B inició con un número pequeño de fallas que concluyó con un incremento potencial de probabilidad de falla.

El patrón C tuvo un incremento constante desde el inicio hasta el final.

El patrón D tuvo una probabilidad de falla baja con un aumento de fallos acelerados que se mantienen en cantidad a través del tiempo.

Tabla 13. Estrategia de mantenimiento - acciones para predecir o prevenir la ocurrencia de la falla.

| Cód falla | Acciones para predecir o prevenir la ocurrencia de la falla |
|-----------|--|
| 1.1.1 | Verificar que el cable de salida se encuentre en buen estado. De igual manera verificar la conexión de alimentación a aeronaves por corrosión y estado general |
| 2.1.1 | Realizar la inspección correspondiente a las conexiones eléctricas, verificando que éstas no tengan partes sulfatadas, en mal estado verificando especialmente el estado de los terminales y conectores |
| 3.1.2 | Realización del chequeo preoperacional por parte del operario e implementación de tarea de inspección mensual de las baterías por parte del personal de mantenimiento |
| 4.1.1 | Realización del chequeo preoperacional por parte del operario |
| 4.2.1 | Realización del chequeo preoperacional por parte del operario e implementación de tarea de inspección mensual de las baterías por parte del personal de mantenimiento |
| 5.1.1 | Drenaje de filtros durante el chequeo preoperacional por parte del operario, cambio de filtros primario y secundario de combustible acuerdo recomendación del fabricante por parte del personal de mantenimiento |
| 5.2.1 | Realizar inspecciones durante la operación / instalación de un sensor de bajo nivel de combustible en el tanque |
| 6.1.1 | Realizar inspecciones durante la operación / instalación de un sensor de bajo nivel de refrigerante en el tanque de expansión |
| 7.1.1 | Limpieza del conector electrónico |
| 8.1.1 | No exceder el nivel máximo de llenado de la sonda de lubricante |
| 8.2.1 | Verificar que el nivel de aceite del cárter sea el adecuado |
| 8.3.1 | Realizar toma y análisis de muestra de lubricante |
| 9.1.1 | Realizar inspección visual al componente durante la operación |
| 9.2.1 | Calibración de tiempo de apertura de las válvulas de admisión y escape acuerdo intervalo recomendado por el fabricante |
| 10.1.1 | Implementar procedimiento de prueba de indicadores, sensores y reapriete de contactos |
| 11.1.1 | Implementar procedimiento de prueba de indicadores, sensores y reapriete de contactos |
| 12.1.1 | Implementar un programa periódico de limpieza, rutina manual mecánica y aplicación de esquema de pintura |

Fuente: Los autores.

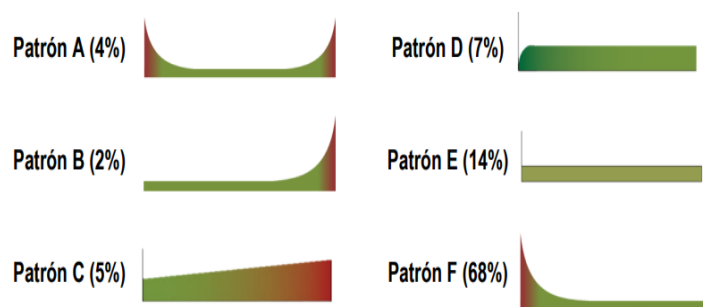


Figura 5. Patrones de Falla (Industria Aeronáutica). Fuente: Tomado de (Mitchell Moubray, 2021).

El patrón E mostró una cantidad constante de probabilidad de falla a través del tiempo.

El patrón F comenzó con una frecuencia de fallos muy alta, que desciende abruptamente hasta lograr una cantidad baja de fallos a través del tiempo. Estos estudios, realizados en la aviación civil, mostraron que el 4% de las causas de falla coincide con el patrón A; el 2% con el B; el 5% con el C; el 7% con el D; el 14% con el E; y un 68% con el patrón F” (Mitchell Moubray, 2021).

De acuerdo con cada patrón de falla, en el programa de mantenimiento propuesto por los autores, se siguieron los pasos para sugerir el tipo de tarea de mantenimiento aplicable; tales pasos se encuentran esquematizados en el diagrama de flujo mostrado en la [Figura 6](#).

3.5. Análisis integral de los resultados

A través del análisis de RCM de las plantas Generadoras GPU HOBART, pudieron ser detectadas oportunidades de mejora en el plan de mantenimiento para los Equipos de Tierra de Apoyo Aéreo del GANCA.

Por medio del desglose del equipo, la determinación de las funciones, los eventos, fallos y consecuencias de cada componente, se pudo especificar cuáles eran los puntos críticos para enfocar el análisis. Ese fue el punto de partida para diseñar una propuesta de mantenimiento aplicable a estas GPU, que servirán de recurso y herramienta para aumentar la disponibilidad, puesto que busca realizar acciones preventivas y/o predictivas, optimizando los tiempos de actividades de mantenimiento y evitando con ello los sobrecostos operativos y la falta de disponibilidad que ocasionan las paradas de los equipos.

Se debe entender que el RCM no busca realizar un rediseño del equipo, sino mantenerlo y optimizar su funcionamiento a partir de la evaluación de resultados que benefician el proceso y el aumento de la operatividad.

Es por esto por lo que se sugiere, a corto plazo, establecer un plan de capacitación acerca de la metodología RCM, dirigido el personal encargado de los equipos en tierra. Esta capacitación debe ir enfocada a adquirir las habilidades necesarias para analizar y diseñar estrategias de manteni-

ento que puedan prevenir o anticipar la ocurrencia de las fallas en los equipos, tal como se realizó en la presente investigación. A mediano plazo resulta necesario la creación de un grupo de confiabilidad que se integre al departamento de mantenimiento. Se consideró que el siguiente grupo de equipos, a los que se les deben aplicar la metodología, son los tractores livianos de remolque, dado que redundaría en el aumento de la capacidad operativa de la instalación militar.

4. Conclusiones

Basados en la información recolectada al inicio de la investigación, se trabajó en el logro del cumplimiento del objetivo general establecido inicialmente a través de una secuencia de acciones lógicas.

En primer lugar, se realizó la clasificación y contextualización de las funciones operacionales de cada componente, se recopiló la información suministrada por el departamento de mantenimiento del GANCA, la cual estaba consignada en registros de mantenimiento, historial de cada planta, reportes de novedades y copia de los contratos de reparación y mantenimientos efectuados.

Para el desarrollo del segundo objetivo específico, se identificaron los fallos que ocasionaban imprevistos, encarecimiento de los costos de mantenimientos y generando aumento de la indisponibilidad de las plantas GPU dentro de la operación; para esto se catalogaron los componentes en cuatro grupos, se analizó la clase y número de fallas en cada uno de ellos. Teniendo esta información, se utilizaron tablas estadísticas para identificar los componentes que tenían mayor recurrencia de fallas, lo que permitió definir a qué grupo de componentes debía ir enfocado el análisis.

Finalmente, se siguió la secuencia del árbol de decisiones lógicas para aplicar los criterios de un proceso de RCM de acuerdo con la norma SAE JA 1101. A partir de esta información se construyó una matriz que contiene la información de los modos de fallos, consecuencias, tipo de consecuencias, estrategias de mantenimiento, acciones para prevenir la ocurrencia de las fallas y asignación de tareas de mantenimiento.

Durante el desarrollo de la investigación se encontró que existen diferentes modelos de aplicación de la metodología de RCM, unos más complicados que otros, lo que puede generar confusión en el grupo de analistas de mantenimiento, dando como resultado que se extiendan los tiempos de implementación de las estrategias y, lo que es peor, que estas sean erróneas.

De acuerdo con la afirmación de los autores, sería conveniente aplicar el árbol de decisiones para la asignación de tareas de mantenimiento, utilizado en esta investigación por su carácter altamente intuitivo y de fácil desarrollo. Por último, se consideró que esta metodología podría ser replicada en otras máquinas, equipos o herramientas de la Armada de Colombia.

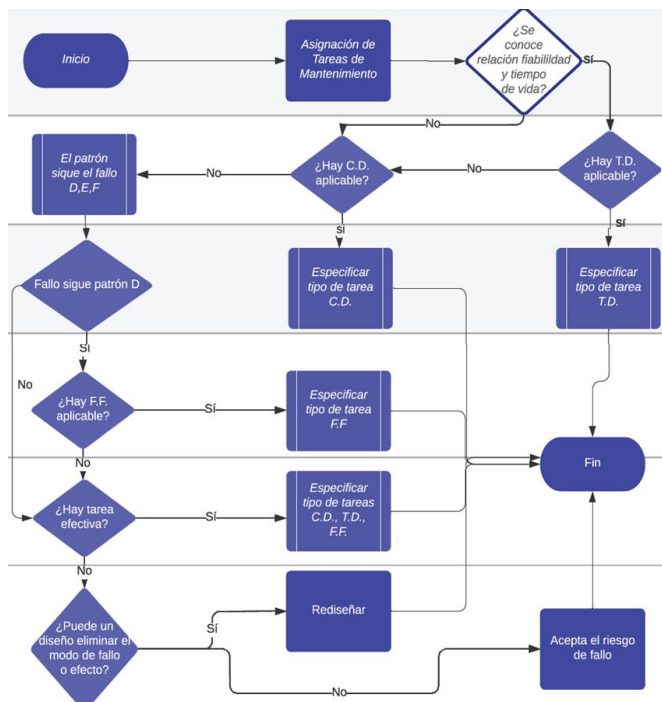


Figura 6. Asignación de tareas de mantenimiento. Fuente: Los autores.

Referencias

- Achahuanco Molina, A. (2020). *Análisis Del Mantenimiento Centrado En La Confiabilidad –Rcm – En La Subestación San José, Para La Estabilidad Del Sistema Interconectado Nacional Sein, En Base A La Confiabilidad De Sus Equipos.* Arequipa - Perú.
- Aguilar Otero, J., Torres Arcique, R., & Magaña Jiménez, D. (2010). *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento.* Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/482/48215094003.pdf>
- AMFE. (2021). *Análisis modal de fallos y efectos.* NTP 679: AMFE.
- Anaguano Lamiña, R. (2018). *Modelo de un plan de mantenimiento basado en procesos para el área de Preparación Hilatura Caso Empresa Vicunha Ecuador.* Quito: Universidad Andina Simón Bolívar.
- Ayauca Sierra, N. (2019). *Plan de mantenimiento basado en RCM para caldero de 50 BHP, Caso: Hospital Ciudad del Cusco.* Arequipa.
- Cabrera Ramón, E., & Tapia González, J. (2019). *Propuesta de Implementación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en la unidad de generación 2 de la Central SAYMIRIN.* Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17861/1/UPS-CT008458.pdf>
- Mitchell Moubray, J. (2021). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).* (I. Press, Ed.)
- Montoya Escobar, C. (2017). *Aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en el Sistema de Excitación de un Generador Sincrónico utilizando el Software IRCMS.* Medellín: Universidad EAFIT.
- Villarreal, H. (2020). *Estrategias metacognitivas para el análisis de falla en la unidad curricular optimización del mantenimiento del Proyecto Ingeniería de Mantenimiento Mecánico de la UNERMB.*