

Revista Sextante

ISSN : 2665-3923

Vol: 27 No: 01 (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

Alfonso Fren Mejía

Decanatura Académica, Escuela Naval de Suboficiales ARC “Barranquilla”, Barranquilla, Colombia

Carlos Ramón Batista Rodríguez

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, Universidad Antonio Nariño, Barranquilla, Colombia

Víctor Andrés Howard Leal

Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia

Article History

Received Dec , 11th , 2022

Accepted Dec ,12th , 2022

Published Dec, 13th,2022



© 2022 The Authors. This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution(CC-BY)license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Abstract

El presente estudio aborda el diseño de un sistema de mantenimiento proactivo basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM) para las Unidades de Potencia Eléctrica en Tierra o Ground Power Units (GPU) utilizadas por el Grupo Aeronaval del Caribe (GANCA) en Barranquilla, Colombia. Estas unidades constituyen equipos fundamentales para garantizar el suministro de energía eléctrica requerido por las aeronaves durante diferentes actividades de apoyo en tierra. Por ello, su disponibilidad, confiabilidad y capacidad de respuesta representan elementos esenciales dentro de las operaciones aeronáuticas. La metodología propuesta parte de la recopilación, clasificación y organización de información técnica sobre los equipos, sistemas, subsistemas y componentes de las GPU. Posteriormente se desarrolla un análisis funcional, identificación de modos de falla y evaluación de criticidad con el propósito de establecer las consecuencias potenciales de cada falla y seleccionar actividades de mantenimiento adecuadas. El enfoque permite diferenciar componentes de alta, media y baja criticidad, concentrando los recursos de mantenimiento en aquellos elementos que presentan mayor impacto sobre la operación. La aplicación del RCM facilita la transición desde un mantenimiento predominantemente correctivo hacia un sistema preventivo y proactivo. La propuesta incorpora inspecciones periódicas, mantenimiento basado en condición, pruebas funcionales, revisión de sistemas eléctricos y mecánicos y seguimiento de indicadores de confiabilidad. De esta manera, se busca anticipar las fallas, reducir los tiempos de indisponibilidad y fortalecer la planificación de recursos técnicos y humanos. El modelo desarrollado proporciona una estructura aplicable al mantenimiento de las GPU del GANCA y puede servir como referencia para otros equipos de apoyo terrestre utilizados en la Aviación Naval de Colombia. La aplicación sistemática de esta metodología puede contribuir al incremento de la disponibilidad operacional, la reducción de fallas no programadas y el mejoramiento continuo de la gestión del mantenimiento.

Keywords

Reliability-Centered Maintenance, RCM, Ground Power Unit, GPU, análisis de criticidad, gestión de mantenimiento, confiabilidad operacional, modos de falla

INTRODUCTION

Las operaciones aeronáuticas dependen de una amplia variedad de equipos auxiliares que permiten desarrollar actividades de mantenimiento, inspección, preparación y asistencia técnica de las aeronaves. Dentro de estos equipos se encuentran las Unidades de Potencia Eléctrica en Tierra, conocidas internacionalmente como Ground Power Units (GPU), cuya función principal consiste en proporcionar energía eléctrica a las aeronaves mientras permanecen en tierra. La disponibilidad operacional de una GPU puede afectar directamente la continuidad de determinadas actividades aeronáuticas. Cuando estos equipos presentan fallas inesperadas, la organización puede enfrentar retrasos en los procesos de preparación, mayores tiempos de intervención, utilización de recursos adicionales y dificultades en la planificación de las actividades de mantenimiento. Por esta razón, la confiabilidad constituye un elemento esencial para garantizar que las GPU puedan cumplir sus funciones cuando sean requeridas. Los métodos tradicionales de mantenimiento pueden clasificarse principalmente en estrategias correctivas y preventivas. El mantenimiento correctivo se ejecuta después de que ocurre una falla, mientras que el mantenimiento preventivo establece intervenciones de acuerdo con periodos definidos. Aunque ambas estrategias siguen siendo necesarias, su utilización sin un análisis adecuado de criticidad puede provocar intervenciones innecesarias o una respuesta tardía ante modos de falla importantes. El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM constituye una metodología estructurada que permite establecer qué actividades de mantenimiento deben realizarse para conservar las funciones de un activo dentro de su contexto operacional. El RCM considera las funciones del sistema, fallas funcionales, modos de falla, consecuencias y estrategias técnicamente apropiadas para evitar o controlar dichas fallas. Los antecedentes del RCM se encuentran estrechamente relacionados con el sector aeronáutico. Posteriormente, su aplicación se extendió a sectores como generación de energía, manufactura, petróleo y gas, transporte, sistemas eléctricos y otros entornos industriales. Su capacidad para relacionar confiabilidad, riesgo, criticidad y mantenimiento lo convierte en una herramienta apropiada para sistemas en los que la disponibilidad representa una variable operacional importante. Para las plantas eléctricas GPU del Grupo Aeronaval del Caribe, la metodología puede proporcionar una estructura que permita pasar de un mantenimiento basado principalmente en intervención periódica o corrección de fallas hacia una gestión proactiva. La identificación anticipada de componentes críticos puede facilitar la programación de tareas y contribuir a reducir fallas inesperadas. El objetivo principal del presente trabajo consiste en diseñar una propuesta de mantenimiento basada en RCM para aumentar la disponibilidad operacional de las GPU del GANCA. Para ello se consideran la clasificación funcional del equipo, análisis de criticidad, identificación de modos de falla, evaluación de consecuencias y definición de tareas de mantenimiento.

Fundamentos de la metodología RCM aplicados a las GPU

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se fundamenta en el principio de que el objetivo del mantenimiento no debe limitarse únicamente a conservar físicamente un equipo, sino garantizar que continúe desarrollando las funciones requeridas dentro de un determinado contexto operacional. En una GPU, la función fundamental consiste en suministrar energía eléctrica estable y segura a una aeronave en tierra. Sin embargo, para que dicha función pueda cumplirse correctamente intervienen diferentes sistemas y subsistemas relacionados con generación eléctrica, combustible, refrigeración, lubricación, control, protección y conexión. La primera fase del RCM consiste en determinar las funciones del activo. Posteriormente se identifican las fallas funcionales, es decir, las condiciones que impiden que el equipo pueda desarrollar total o parcialmente su función. Una GPU que no puede entregar el voltaje requerido, que presenta inestabilidad eléctrica o que no puede arrancar constituye un ejemplo de pérdida funcional. Después de identificar las fallas funcionales se establecen los modos de falla responsables de cada situación. Estos pueden incluir deterioro de conexiones, pérdida de capacidad de la batería, obstrucción del sistema de combustible, sobrecalentamiento, defectos del generador, degradación de componentes eléctricos o fallas en sensores y sistemas de control. El RCM analiza igualmente las consecuencias de cada modo de falla. Una falla puede presentar consecuencias relacionadas con seguridad, operación, costos, disponibilidad o desempeño del equipo. Esta evaluación permite determinar qué fallas requieren mayor atención y qué tipo de intervención debe utilizarse. Las tareas pueden incluir mantenimiento basado en condición, inspección, sustitución programada, restauración, pruebas funcionales o, cuando resulte técnicamente razonable, operación hasta falla seguida de una intervención correctiva. La ventaja fundamental consiste en evitar la aplicación indiscriminada de mantenimiento preventivo. No todos los componentes requieren las mismas frecuencias ni el mismo tipo de intervención. La estrategia debe corresponder al comportamiento del componente y a las consecuencias asociadas con su falla.

Clasificación de sistemas, subsistemas y componentes

Para desarrollar adecuadamente la metodología RCM es necesario establecer una estructura jerárquica del equipo. Esta clasificación permite pasar desde el nivel general de la GPU hasta sus componentes individuales y analizar

posteriormente las funciones y fallas correspondientes. Una GPU puede dividirse en diferentes sistemas principales. Entre ellos pueden considerarse el sistema de generación eléctrica, motor, sistema de alimentación de combustible, sistema de refrigeración, lubricación, batería y arranque, sistemas de control y protección y elementos de conexión con la aeronave. El sistema de generación constituye uno de los elementos principales debido a que transforma la energía mecánica disponible en energía eléctrica capaz de alimentar los sistemas de la aeronave. Cualquier desviación importante en voltaje, frecuencia o estabilidad puede comprometer el cumplimiento de la función principal de la GPU. El motor representa igualmente un sistema crítico debido a que proporciona la potencia mecánica necesaria. Su desempeño depende de componentes relacionados con combustible, lubricación y refrigeración. El deterioro de cualquiera de estos elementos puede disminuir la capacidad operacional del equipo. La clasificación estructurada facilita la creación de registros específicos para cada componente. Cada elemento puede asociarse con su función, modo de falla, causa, consecuencia, nivel de criticidad y actividad de mantenimiento correspondiente. Esta estructura también facilita la trazabilidad. Cuando se presenta una falla, el equipo de mantenimiento puede identificar con mayor rapidez el subsistema afectado y consultar su historial de intervenciones. De esta manera, la información deja de constituir un registro aislado y se convierte en una herramienta para tomar decisiones.

Análisis de criticidad y modos de falla

El análisis de criticidad permite establecer prioridades entre los diferentes componentes. La criticidad puede determinarse considerando variables como frecuencia de falla, severidad, efecto sobre la operación, riesgo para el equipo, tiempo de reparación, disponibilidad de repuestos y consecuencias económicas. Los componentes cuya falla puede causar la pérdida completa de la función de la GPU deben recibir especial atención. Un fallo importante en el generador, motor o sistema de control puede provocar la indisponibilidad inmediata de la unidad y afectar directamente las actividades de apoyo a la aeronave. Por el contrario, determinados elementos pueden presentar fallas que no produzcan inmediatamente la pérdida total de la función. Aunque estas anomalías también deben ser corregidas, su prioridad puede ser inferior. El análisis de modos de falla permite establecer cómo puede producirse la pérdida funcional. Esta actividad puede complementarse mediante Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) o Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). El análisis debe responder a preguntas fundamentales: qué componente puede fallar, cómo puede fallar, cuál puede ser la causa, qué ocurre cuando se produce la falla y qué consecuencias genera. El conocimiento del personal técnico constituye una fuente importante de información. Los registros históricos pueden complementarse con entrevistas, inspecciones, manuales del fabricante y experiencia acumulada durante las operaciones.

Table 1 Matriz propuesta de análisis RCM para componentes de una GPU

Sistema o componente	Modo de falla potencial	Consecuencia principal	Criticidad estimada	Tarea de mantenimiento propuesta
Motor	Pérdida de potencia	GPU fuera de servicio	Alta	Inspección y mantenimiento basado en condición
Generador	Voltaje incorrecto o ausencia de generación	Imposibilidad de alimentar la aeronave	Alta	Pruebas eléctricas y revisión periódica
Sistema de combustible	Obstrucción o fuga	Funcionamiento irregular o parada	Alta	Inspección, limpieza y control de fugas
Sistema de refrigeración	Sobrecalentamiento	Daño progresivo y parada del equipo	Alta	Control de temperatura y refrigerante
Sistema de lubricación	Presión insuficiente	Desgaste acelerado del motor	Alta	Control de nivel, presión y calidad del lubricante
Batería	Pérdida de capacidad	Dificultad o imposibilidad de arranque	Media-Alta	Medición de carga y revisión de terminales

La tabla muestra cómo el análisis RCM puede transformar los posibles modos de falla en tareas concretas. La clasificación definitiva debe realizarse utilizando los registros operacionales reales de cada GPU.

Diseño del programa de mantenimiento proactivo

El programa proactivo debe establecer tareas específicas para los componentes identificados durante el análisis. La selección de estas actividades debe basarse en las características técnicas de cada componente y no únicamente en intervalos arbitrarios. Las inspecciones previas al funcionamiento constituyen una primera barrera de prevención. Antes de poner en funcionamiento la GPU puede comprobarse visualmente el estado de conexiones, presencia de fugas, niveles de fluidos, condición de cables, terminales y posibles signos de deterioro. Una segunda categoría corresponde a las actividades periódicas. Estas pueden incluir cambio de lubricante, sustitución de filtros, verificación de batería, inspección del sistema de combustible, pruebas de generación, revisión de sistemas de protección y limpieza de componentes. El mantenimiento basado en condición puede aplicarse cuando existe una variable que permite detectar degradación antes de producirse una falla funcional. Temperatura, vibración, voltaje, presión, ruido y características del lubricante pueden utilizarse como señales de deterioro. Las tareas de búsqueda de fallas también resultan relevantes para aquellos dispositivos cuya pérdida de función no es inmediatamente evidente. Los sistemas de protección y determinados dispositivos auxiliares deben probarse regularmente para comprobar que continúan disponibles. La información obtenida durante las intervenciones debe registrarse. El programa RCM no debe considerarse un documento estático. Los resultados obtenidos durante la operación permiten revisar frecuencias, modificar tareas y mejorar progresivamente el programa. Para evaluar el desempeño pueden utilizarse indicadores como disponibilidad, Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), número de fallas no planificadas y porcentaje de tareas ejecutadas según programación.

Efectos esperados sobre confiabilidad y disponibilidad operacional

La confiabilidad representa la probabilidad de que un equipo realice adecuadamente su función durante un periodo determinado bajo condiciones de operación específicas. En las GPU, una mayor confiabilidad disminuye la posibilidad de interrupciones inesperadas durante las actividades de apoyo. La disponibilidad combina factores relacionados con confiabilidad y mantenibilidad. Un equipo puede presentar una determinada frecuencia de fallas, pero si las reparaciones se realizan rápidamente puede mantener una disponibilidad relativamente elevada. Por este motivo, una estrategia integral debe considerar tanto la prevención de fallas como la reducción de los tiempos requeridos para recuperar el servicio. El RCM puede contribuir a mejorar ambos aspectos. La identificación anticipada de modos de falla busca disminuir eventos imprevistos, mientras que la definición de procedimientos y necesidades de repuestos puede facilitar intervenciones más rápidas. Además, la clasificación por criticidad permite asignar racionalmente los recursos disponibles. En contextos donde existe una cantidad limitada de personal, herramientas o repuestos, resulta especialmente importante identificar los componentes cuya falla produce mayor impacto operacional. La gestión de repuestos puede integrarse al sistema RCM. Los componentes críticos con tiempos elevados de adquisición pueden requerir niveles mínimos de inventario. Los elementos de baja criticidad pueden gestionarse mediante políticas diferentes. La aplicación del modelo puede generar adicionalmente beneficios organizacionales. La documentación sistemática permite transferir conocimiento entre técnicos, reducir la dependencia exclusiva de experiencia individual y construir un historial técnico de cada equipo.

Implementación y mejora continua del sistema RCM

La implementación práctica del programa requiere la participación coordinada del personal responsable de operación y mantenimiento. El primer paso consiste en establecer una línea base utilizando los registros disponibles de fallas, mantenimientos, horas de funcionamiento y tiempos de indisponibilidad. A partir de estos datos deben identificarse los sistemas con mayor incidencia sobre las fallas. Posteriormente pueden actualizarse las matrices de criticidad para asegurar que la clasificación represente el comportamiento real de las unidades. La capacitación del personal es fundamental. Los técnicos deben comprender no solamente las tareas que deben ejecutar sino también la razón por la cual dichas actividades fueron seleccionadas. Este conocimiento fortalece la identificación temprana de anomalías. Los formatos utilizados para registrar las intervenciones deben mantenerse simples y estandarizados. Cada registro debería identificar el equipo, fecha, horas de funcionamiento, anomalía encontrada, componente afectado, acción desarrollada, repuestos utilizados y tiempo requerido. Con la información acumulada pueden calcularse indicadores relacionados con confiabilidad y mantenibilidad. La comparación periódica de estos indicadores permite establecer si las tareas están produciendo los resultados esperados. Si un determinado modo de falla continúa apareciendo con frecuencia, el programa debe revisarse. Puede ser necesario modificar la frecuencia de inspección, aplicar una tecnología de monitoreo diferente, utilizar otro componente o considerar una modificación de diseño. Por esta razón, el RCM constituye un proceso de mejora continua. Su efectividad depende tanto del análisis inicial como de la capacidad de aprender de la experiencia operacional.

Summary

El mantenimiento de las plantas eléctricas GPU representa un componente importante dentro de la gestión de los equipos de apoyo terrestre utilizados en operaciones aeronáuticas. Su disponibilidad permite garantizar el suministro de energía requerido por las aeronaves mientras permanecen en tierra y contribuye a mantener la continuidad de diferentes procesos operacionales. El enfoque RCM proporciona una metodología estructurada para identificar las funciones de cada sistema, reconocer sus fallas funcionales, determinar modos de falla y evaluar sus consecuencias. Esta información permite seleccionar estrategias de mantenimiento de acuerdo con el nivel de riesgo y criticidad asociado con cada componente. La aplicación del análisis de criticidad facilita la priorización de recursos. Los sistemas relacionados con generación eléctrica, motor, alimentación de combustible, refrigeración, control y conexiones requieren especial seguimiento cuando una falla puede ocasionar la pérdida completa de la función de la GPU. La propuesta de mantenimiento proactivo incorpora inspecciones, pruebas funcionales, mantenimiento preventivo y monitoreo basado en condición. Estas actividades buscan identificar señales de deterioro antes de que evolucionen hacia fallas funcionales. Otra contribución importante del sistema consiste en la creación de registros técnicos estructurados. La disponibilidad de datos históricos permite determinar tendencias, evaluar reincidencias y establecer indicadores como MTBF, MTTR y disponibilidad operacional. El modelo también permite mejorar la asignación de repuestos, recursos humanos y tiempos de intervención. Los componentes críticos pueden recibir mayor prioridad mientras que las actividades sobre componentes menos críticos pueden organizarse de acuerdo con su riesgo real. La metodología propuesta no debe entenderse como un programa fijo. El RCM debe actualizarse periódicamente a partir de los resultados observados. La aparición de nuevos modos de falla, modificaciones operacionales o cambios en el comportamiento de los componentes pueden requerir ajustes en las tareas y frecuencias. En conclusión, el diseño de un sistema de mantenimiento proactivo basado en RCM constituye una alternativa técnicamente adecuada para fortalecer la confiabilidad y disponibilidad de las plantas eléctricas GPU del Grupo Aeronaval del Caribe. Su aplicación puede reducir la dependencia del mantenimiento correctivo, mejorar la planificación de las intervenciones y desarrollar una cultura de mantenimiento fundamentada en riesgo y confiabilidad. La experiencia derivada de la aplicación del modelo también puede utilizarse como referencia para otros equipos de apoyo terrestre de la Aviación Naval de Colombia. Para ello será necesario adaptar los análisis funcionales, modos de falla y criterios de criticidad al contexto específico de cada activo.

Referencias

- Ahmadi, A., Gupta, S., Karim, R., & Kumar, U. (2010). Selection of maintenance strategy for aircraft systems using multi-criteria decision making methodologies. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 17(3), 223–243.
- 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, 1–9. <https://doi.org/10.54606/Sextante2022.v27.01>
- IEC. (2009). IEC 60300-3-11: Dependability management—Application guide—Reliability centred maintenance. International Electrotechnical Commission.
- Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). *Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications* (2nd ed.). CRC Press.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-centered maintenance*. United Airlines and U.S. Department of Defense.
- Rausand, M. (1998). Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 60(2), 121–132. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)83005-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)83005-6)

- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System reliability theory: Models, statistical methods, and applications* (2nd ed.). Wiley.
- SAE International. (2009). SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. SAE International.
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM—Gateway to world class maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39.