

Aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para optimizar la gestión del mantenimiento de activos eléctricos críticos y de emergencia en una institución hospitalaria de alta complejidad, conforme a las normas ISO 14224, ISO 31010, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11

Jorge Mario Londoño Navarro

Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali

2026

Nota del autor

Jorge Mario Londoño N; Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali.

Este documento cuenta con la dirección del I.M. M.Sc. Adolfo Gómez.

Trabajo de profundización para optar por el título de Magister en Gestión de Activos y Mantenimiento.

Cualquier mensaje con respecto a este trabajo debe ser enviado a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

E-mail: jorge.mario.londono@correounivalle.edu.co

Resumen

La gestión adecuada del mantenimiento en los hospitales es un pilar no negociable para proteger al paciente y garantizar que los servicios clínicos no se interrumpan (Fumagalli, Macchi & Rapaccini, 2019; Orozco, Duque & Mejía, 2017). Los equipos médicos, muchos de ellos de soporte vital, exigen estrategias que prioricen su correcto funcionamiento, disponibilidad y seguridad, dada la enorme responsabilidad que conlleva su uso diario (Mutia, Kihui & Maranga, 2012; Arab-Zozani et al., 2021).

Frente a este desafío, nuestro trabajo propone aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) a los activos más críticos del hospital de alta complejidad Medicadiz, en Ibagué, Colombia, una institución con ocho años de trayectoria en el sector salud.

El RCM es en esencia un método sistemático que permite entender para qué sirve un equipo, de qué formas puede fallar y qué consecuencias tendría cada falla. El objetivo final es diseñar planes de mantenimiento realmente efectivos que reduzcan riesgos, prevengan fallas catastróficas y mejoren la eficiencia (Geisbush & Ariaratnam, 2022; Moubray, 1997).

Lo que se busca con este enfoque es dejar atrás el modelo de “arreglar si se descompone” para adoptar uno preventivo y proactivo, alineado con lo que hoy se practica a nivel internacional (Salah, Osman & Hosny, 2018; Shamayleh, Awad & Abdulla, 2020).

Para desarrollar la metodología, se adoptan estándares técnicos como ISO 14224, ISO 31010, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, que proporcionan lineamientos para la gestión del riesgo, la estructuración de datos de confiabilidad y la evaluación de criticidad (International Electrotechnical Commission, 2019; International Organization for

Standardization, 2014, 2016; SAE International, 1999; Department of Defense, 1986; AENOR, 2011). Estas normas complementadas con marcos de gestión de mantenimiento y activos (Crespo Márquez, 2007; Pintelon & Van Puyvelde, 2020) y con bases de datos de referencia como OREDA (OREDA Participants, 2015), brindan el marco necesario para identificar, analizar y priorizar qué equipos son verdaderamente críticos.

A partir de este marco se elabora una propuesta concreta para implementar el RCM en el entorno hospitalario de Medicadiz, que tiene en cuenta la recolección de datos de confiabilidad, una evaluación rigurosa de riesgos y la optimización de los recursos disponibles.

Se espera que los resultados de este proyecto se traduzcan en una gestión de mantenimiento más optimizada, equipos esenciales más confiables y fáciles de mantener y lo más importante en una mayor garantía de continuidad y seguridad para los servicios de salud (Orozco, Duque & Mejía, 2017; Geisbush & Ariaratnam, 2022; Salah, Osman & Hosny, 2018). Esto contribuirá a la sostenibilidad del hospital y a una mejora continua en la calidad de la atención que reciben los pacientes.

Palabras clave: Mantenimiento, RCM, Activos críticos, Mantenibilidad, Confiabilidad.

Abstract

Proper maintenance management in hospitals is a non-negotiable pillar for protecting patients and ensuring that clinical services are not interrupted (Fumagalli, Macchi & Rapaccini, 2019; Orozco, Duque & Mejía, 2017). Medical equipment, much of which is life-supporting, requires strategies that prioritize proper functioning, availability, and safety, given the enormous responsibility associated with its daily use (Mutia, Kihui & Maranga, 2012; Arab-Zozani et al., 2021).

Faced with this challenge, this work proposes applying the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology to the most critical assets of the highly complex Medicadiz hospital in Ibagué, Colombia, an institution with eight years of experience in the healthcare sector.

RCM is, in essence, a systematic method that allows us to understand what a piece of equipment is used for, how it can fail, and what the consequences of each failure would be. The ultimate goal is to design truly effective maintenance plans that reduce risks, prevent catastrophic failures, and improve efficiency (Geisbush & Ariaratnam, 2022; Moubray, 1997).

The aim of this approach is to move away from the “fix it when it breaks” model and adopt a preventive and proactive one, in line with current international practice (Salah, Osman & Hosny, 2018; Shamayleh, Awad & Abdulla, 2020).

To develop the methodology, we rely on technical standards such as ISO 14224, ISO 31010, SAE JA1011, MIL-STD-2173, and UNE 200001-3-11, which provide guidelines for risk management, reliability data structuring and criticality assessment (International Electrotechnical Commission, 2019; International Organization for Standardization, 2014, 2016; SAE International, 1999; Department of Defense, 1986; AENOR, 2011). These standards, complemented by asset and maintenance management frameworks (Crespo Márquez, 2007; Pintelon & Van Puyvelde, 2020) and reliability data handbooks such as OREDA (OREDA Participants, 2015), provide the foundation to identify, analyze, and prioritize which equipment is truly critical.

Based on this framework, we developed a concrete proposal to implement RCM in the Medicadiz hospital environment that explicitly considers reliability data collection, rigorous risk assessment, and optimization of available resources.

The expected results of this project include more optimized maintenance management, more reliable and easier-to-maintain essential equipment, and, most importantly, an increased guarantee of continuity and safety in healthcare services (Orozco, Duque & Mejía, 2017; Geisbush & Ariaratnam, 2022; Salah, Osman & Hosny, 2018). This will undoubtedly contribute to the hospital's sustainability and to the continuous improvement of the quality of care received by patients.

Keywords: Maintenance, RCM, Critical assets, Maintainability, Reliability.

Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Contenido.....	5
Tabla de ilustraciones.....	8
Tablas	9
Ecuaciones	10
Introducción y Contexto Operacional.....	10
Planteamiento del Problema u Oportunidad	12
Límites del Problema u Oportunidad.....	13
Justificación	14
Viabilidad de la Idea del Trabajo de Profundización	15
Objetivos.....	16
General.....	16
Específicos	17
Objetivo Uno - Identificación de Activos Críticos.	17

Objetivo Dos - Caracterización Operativa y Funcional.....	17
Objetivo Tres - Análisis Técnico y Evaluación de Criticidad.....	17
Objetivo Cuatro - Aplicación de Metodología RCM.....	18
Objetivo Cinco - Propuesta de Mejora.....	18
Objetivo Seis - Evaluación y Conclusiones.....	18
Antecedentes de la Investigación o del Proyecto.....	18
Estado del Arte.....	21
Marco Metodológico o Elaboración Metodológica.....	24
Tipo de Estudio y de Análisis a Desarrollar.....	24
Fases del Proyecto.....	27
Desarrollo.....	29
Objetivo 1.....	29
Introducción.....	29
Marco metodológico ISO 31010.....	30
Criterios adoptados.....	31
Identificación y jerarquización de activos.....	31
Metodología de análisis del riesgo y fórmulas empleadas.....	32
Resultados de la matriz de criticidad.....	33
Nota. Los valores de riesgo se clasificaron conforme al principio ALARP, considerando no aceptables aquellos con $R \geq 15$	34
Activos críticos identificados.....	34
Resultados.....	34
Objetivo 2.....	35
Introducción.....	35
Fundamentación teórica y normativa (ISO 14224).....	36
Inventario resumido de activos críticos analizados.....	37
Requerimientos funcionales y condiciones de operación (ISO 14224).....	38
Indicadores RAM: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.....	39
Criterios de priorización y selección del subconjunto RCM.....	40
Resultado.....	42
Objetivo 3.....	43

Introducción	43
Método aplicado.....	44
Funciones por activo (criterios clave).....	45
Resultados: síntesis de criticidad por activo	46
Matriz de criticidad – GE 800 kVA (450073 – MP-760).....	47
Matriz de criticidad UPS de quirófanos (TITAN / referencia extrapolable a Liebert NXR).....	49
Priorización de riesgos y decisiones	51
Riesgo residual.....	52
Resultados	53
Objetivo 4.....	53
Introducción	54
Alineación normativa y criterios.....	55
Metodología aplicada.....	56
Árboles de decisión RCM.....	58
Resultados por activo: Generador 800 kVA (450073 MP-760)	62
Resultados por activo: UPS de quirófanos (TITAN y Liebert NXR)	67
Resultados	78
Objetivo 5.....	80
Introducción	80
Metodología aplicada.....	81
Desarrollo de la propuesta de implementación del RCM	84
Diseño de la fase piloto de implementación del RCM	85
Roles, responsabilidades y competencias	87
Necesidades de información y soporte tecnológico.....	89
Indicadores de desempeño propuestos.....	90
Lineamientos operativos y de sostenibilidad del RCM	93
Resultados	94
Plan de implementación a 12 meses, recursos y riesgos.....	95
Objetivo 6.....	98
Síntesis de los resultados obtenidos en el estudio.....	98

Evaluación del grado de cumplimiento de los objetivos específicos.....	98
Impacto anticipado del modelo RCM en la confiabilidad, disponibilidad y resiliencia	101
Recomendaciones y conclusiones generales.....	102
Descripción del proceso para alcanzar los objetivos del proyecto	104
Enfoque metodológico general para el cumplimiento de los objetivos	104
Cumplimiento del Objetivo 1.....	105
Cumplimiento del Objetivo 2.....	106
Cumplimiento del Objetivo 3.....	107
Cumplimiento del Objetivo 4.....	107
Cumplimiento del Objetivo 5.....	109
Cumplimiento del Objetivo 6.....	110
Síntesis final.....	111
Referencias.....	111

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Árbol A. Selección de modos de falla a analizar mediante RCM.....	55
Ilustración 2. Árbol B. Clasificación de fallas evidentes y funciones ocultas (S/O/H/E)...	55
Ilustración 3. Árbol C. Selección de tareas para fallas evidentes.....	56
Ilustración 4. Árbol D. Selección de tareas para funciones ocultas (H).....	56
Ilustración 5. Árbol E. Definición de intervalos de tareas de mantenimiento RCM.....	57
Ilustración 6. Árbol de decisión RCM aplicado al generador de 800 kVA.....	57
Ilustración 7. Árbol de decisión RCM aplicado a las UPS de quirófanos.....	57

Tablas

Tabla 1 - Inventario de activos eléctricos de la red crítica/vital y de emergencia.....	31
Tabla 2 - Matriz de criticidad aplicada a los activos eléctricos (según ISO 31010).....	33
Tabla 3 - Inventario resumido y contexto operacional.....	37
Tabla 4 - Requerimientos funcionales y condiciones de operación.....	38
Tabla 5 - Indicadores RAM estimados conforme a ISO 14224.....	39
Tabla 6 - Escalas de valoración de probabilidad e impactos (criterios de priorización)...	40
Tabla 7 - Resumen FMEA para activos eléctricos críticos (extracto para priorización)...	40
Tabla 8 - Modos de falla relevantes y criticidad – GE 800 kVA.....	46
Tabla 9 - Modos de falla relevantes y criticidad – UPS de quirófanos TITAN.....	47
Tabla 10 - Funciones y estándares de desempeño del generador 800 kVA (450073 M 760).....	60
Tabla 11 - Decisiones RCM e intervalos para el generador 800 kVA.....	62
Tabla 12 - Variables de monitoreo y umbrales para el generador 800 kVA.....	64
Tabla 13 - Funciones y estándares de desempeño de las UPS de quirófanos.....	65
Tabla 14 - Fallas funcionales de las UPS de quirófanos.....	66
Tabla 15 - Modos de falla, causas y evidencias de las UPS de quirófanos.....	67

Tabla 16 - Decisiones RCM e intervalos para las UPS de quirófanos.....	68
Tabla 17 - Variables de monitoreo y umbrales para las UPS de quirófanos.....	70
Tabla 18 - KPIs y metas de desempeño para el generador y las UPS.....	71
Tabla 19 - Matriz RACI para actividades RCM.....	72
Tabla 20 - Ejemplo de tareas RCM codificadas para el CMMS.....	73
Tabla 21 - Etapas de implementación del plan RCM en generador y UPS.....	83
Tabla 22 - Roles y responsabilidades en la implementación del RCM.....	84
Tabla 23 - Indicadores de gestión para el seguimiento del RCM.....	87

Ecuaciones

Ecuación 1 – Impacto ponderado.....	32
Ecuación 2 – Riesgo.....	32
Ecuación 3 – Disponibilidad.....	37

Introducción y Contexto Operacional

En los hospitales la capacidad de que los equipos críticos funcionen de manera constante y puedan repararse con facilidad es un aspecto clave para no interrumpir los servicios médicos y proteger la seguridad de quienes son atendidos. Dispositivos médicos y sistemas de soporte vital necesitan operar sin paros y con eficacia puesto que cualquier falla no solo afecta la calidad de la atención, sino que también pone en riesgo la estabilidad operativa de la institución de salud (Fumagalli, Macchi, & Rapaccini, 2019; Arab-Zozani, Pezeshki, Jahanbin, & Tabrizi, 2021).

En este marco, la gestión del mantenimiento deja de ser una simple tarea operativa para convertirse en un elemento estratégico avanzando desde un enfoque que solo repara lo que se ha dañado hacia uno que se basa en la prevención, la confiabilidad y la evaluación proactiva de riesgos (Tsang, 2002; Crespo Márquez, 2007; Pintelon & Parodi-Herz, 2008).

Frente a este reto el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) surge como una metodología especialmente adecuada. Al aplicarla es posible determinar las funciones de cada equipo, identificar cómo puede fallar y comprender el impacto de cada fallo, lo que permite tomar decisiones técnicas fundamentadas para mejorar la disponibilidad, reducir amenazas y asegurar que los procesos más sensibles no se detengan (Moubray, 1997; Geisbush & Ariaratnam, 2022).

Aunque el RCM se originó en el campo de la aviación, su uso en el entorno hospitalario es totalmente apropiado, considerando los altos niveles de confiabilidad, seguridad y eficiencia que exige la infraestructura de salud (Nowlan & Heap, 1978; Mutia, Kihui, & Maranga, 2012).

En Colombia, el Hospital Medicadiz, localizado en Ibagué, opera como un centro privado de alta complejidad y está clasificado como de cuarto nivel. Con ocho años de funcionamiento, la institución cuenta con historiales de fallas, calendarios de mantenimiento, reportes técnicos, manuales de operación y registros de incidentes relacionados con el comportamiento de sus equipos.

No obstante, aún no se ha llevado a cabo un proceso formal para identificar y clasificar sus activos más críticos. Esta omisión dificulta la creación de planes de mantenimiento basados en confiabilidad que se ajusten a las necesidades reales del hospital (Viscaíno-Cuzco, Villacrés-Parra, Gallegos-Londoño, & Negrete-Costales, 2019; Orozco, Duque, & Mejía, 2017).

Este proyecto de profundización plantea la puesta en marcha de la metodología RCM en los activos críticos del Hospital Medicadiz, tomando como referencia normas internacionales como la ISO 14224 (para el manejo de datos de confiabilidad), ISO 31010 (para la gestión de riesgos), SAE JA1011 (que establece los criterios para aplicar RCM), MIL-STD-2173 (norma de mantenimiento aeronáutico adaptable a salud) y UNE 200001-3-11 (sobre clasificación y gestión de activos). La iniciativa combina el análisis funcional de los equipos, la categorización de sus posibles fallas y el diseño de estrategias de mantenimiento organizadas, con el propósito de aumentar la confiabilidad y facilidad de mantenimiento de los dispositivos esenciales, resguardar la integridad de los pacientes y apoyar la eficiencia general del sistema hospitalario (Salah, Osman, & Hosny, 2018; Shamayleh, Awad, & Abdulla, 2020; Pintelon & Van Puyvelde, 2020).

Planteamiento del Problema u Oportunidad

En un centro hospitalario como Medicadiz en Ibagué la operación estable de equipos críticos marca la diferencia entre la atención segura y situaciones de riesgo. Sistemas como dispositivos de soporte vital y demás dispositivos médicos esenciales no pueden permitirse interrupciones. Cualquier falla en estos sistemas podría suspender procedimientos quirúrgicos, comprometer el funcionamiento de UCIs y desencadenar consecuencias graves en la salud de los pacientes (Fumagalli et al., 2019; Mutia et al., 2012).

Lamentablemente en muchos hospitales sigue predominando la cultura de “reparar hasta que se daña”. Esta mentalidad reactiva eleva significativamente el riesgo de fallas inesperadas en infraestructura vital (Geisbush & Ariaratnam, 2022). La carencia de métodos organizados para evaluar fallas y determinar prioridades, sumado al uso limitado de normas técnicas, debilita los programas de mantenimiento actuales y obstaculiza la toma de decisiones fundamentada en

evidencias (Tsang, 2002; Crespo Márquez, 2007; Pintelon & Van Puyvelde, 2020). Este panorama deriva no solo en mayores costos por reparaciones de urgencia, sino en una vulnerabilidad constante que amenaza la prestación continua de servicios médicos (Orozco et al., 2017; Salah et al., 2018).

Frente a esta realidad el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) emerge como una respuesta técnica bien fundamentada. Desarrollado inicialmente para aviación, este enfoque metodológico permite comprender las funciones de cada equipo, sus posibles modos de falla y el impacto de estas fallas en los servicios hospitalarios (Nowlan & Heap, 1978; Moubray, 1997). Al implementar RCM con apoyo de estándares internacionales, los hospitales pueden migrar definitivamente del esquema correctivo hacia uno preventivo. Esta transformación no solo optimiza recursos y reduce amenazas operativas, sino que asegura la continuidad y seguridad que los pacientes merecen (Moubray, 1997; Smith & Hinchcliffe, 2004; Pintelon & Van Puyvelde, 2020).

Límites del Problema u Oportunidad

Esta investigación se enfoca en la gestión del mantenimiento dentro de un hospital de alta complejidad, concentrándose específicamente en los activos más cruciales vinculados al sistema eléctrico esencial (según NFPA, 2021) y a la red de emergencias. Estas instalaciones son estratégicas porque agrupan los sistemas de seguridad de vida, equipos críticos y soporte vital, formando la base que garantiza la continuidad de las operaciones clínicas.

El desarrollo del trabajo incluye la identificación y categorización de estos activos, el análisis de sus funciones y nivel de criticidad, junto con la aplicación conceptual de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) bajo los lineamientos de

SAE JA1011. La iniciativa se sustenta en varios estándares internacionales como lo son el ISO 14224 para el manejo de datos de confiabilidad, ISO 31010 para la evaluación de riesgos, SAE JA1011 como referencia para validar procesos RCM, MIL-STD-2173 para requisitos en sistemas de alta confiabilidad, y UNE 200001-3-11 como guía técnica, complementados con la NFPA 99 para la clasificación de sistemas eléctricos hospitalarios (NFPA, 2021).

La investigación se limita al diseño metodológico y al desarrollo de una propuesta técnica para la implementación. Quedan excluidos específicamente los activos no clasificados como críticos, la puesta en marcha operativa y validación en campo de las tareas RCM, los estudios financieros detallados y eventos externos fuera del control de la institución, como cortes del servicio público o desastres naturales.

De este modo, el estudio mantiene un alcance definido, trazable y técnicamente riguroso, dirigido a fortalecer la confiabilidad, disponibilidad y seguridad operativa de los sistemas eléctricos del hospital. Como resultados concretos se esperan entregar un inventario jerarquizado de activos, análisis funcional, matriz de criticidad, selección conceptual de tareas de mantenimiento, un plan de implementación por etapas y los requisitos para el seguimiento de indicadores de rendimiento, consistentes con los objetivos planteados en el proyecto.

Justificación

En una institución hospitalaria de alta complejidad, la confiabilidad y disponibilidad de los activos críticos constituyen factores esenciales para garantizar la seguridad del paciente y la continuidad de los servicios clínicos. En particular los sistemas eléctricos de emergencia y la red eléctrica crítica/vital resultan indispensables para el funcionamiento ininterrumpido de equipos

médicos y de soporte de vida, cuya falla puede generar consecuencias severas tanto a nivel operativo como asistencial.

En este contexto, se hace necesaria la adopción de enfoques de mantenimiento que trasciendan las prácticas correctivas tradicionales y se orienten hacia estrategias proactivas y sistemáticas, tales como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), fundamentado en normas y guías internacionales como ISO 14224, ISO 31010, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11 (International Organization for Standardization, 2014, 2016; International Electrotechnical Commission, 2019; SAE International, 1999; Department of Defense, 1986; AENOR, 2011). Estudios recientes han mostrado que la integración de estos marcos con metodologías RCM en entornos hospitalarios contribuye a optimizar la confiabilidad, la mantenibilidad y los costos de operación (Salah et al., 2018; Shamayleh et al., 2020; Geisbush & Ariaratnam, 2022).

La relevancia de este trabajo radica en ofrecer una propuesta metodológicamente validada que optimice la gestión del mantenimiento en sistemas eléctricos hospitalarios críticos, contribuyendo a incrementar su confiabilidad, reducir riesgos operativos y asegurar la continuidad de los servicios de salud. Asimismo, el estudio aporta un modelo replicable para otras instituciones del sector, consolidando un marco de referencia que fortalece la seguridad y resiliencia de la infraestructura hospitalaria.

Viabilidad de la Idea del Trabajo de Profundización

La viabilidad del presente trabajo de profundización se sustenta principalmente en su pertinencia académica y en la solidez técnica e institucional que lo respaldan. Desde el ámbito académico el proyecto se ajusta plenamente a los lineamientos y exigencias de la facultad,

cumpliendo con los requisitos que se establecen para un trabajo de profundización. El diseño metodológico, basado en la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), se fundamenta en estándares internacionales reconocidos como la ISO 14224, ISO 31010 y SAE JA1011, lo cual garantiza el rigor científico y aporta un valor significativo al campo de la ingeniería hospitalaria. Asimismo, el trabajo contribuye al fortalecimiento de las competencias investigativas y técnicas del estudiante, al articular la teoría con la práctica en un entorno real de alta complejidad.

En el plano técnico se dispone de la información necesaria para el análisis, incluyendo registros históricos de fallas, manuales de equipos y datos de mantenimiento. Desde la dimensión institucional, se cuenta con la autorización del Hospital Medicadiz, así como con el apoyo de docentes, tutores y del personal hospitalario, lo que asegura la aplicabilidad del estudio en un escenario real y con acompañamiento experto.

De este modo la viabilidad del trabajo no solo está garantizada por la disponibilidad de información y recursos, sino por su coherencia académica, su alineación con los objetivos formativos del programa y su potencial para generar un aporte tangible en la gestión del mantenimiento hospitalario desde la perspectiva investigativa y aplicada.

Objetivos

General

Implementar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en los activos eléctricos críticos y de emergencia de una institución hospitalaria de alta complejidad, mediante el análisis funcional, la evaluación de criticidad y la clasificación técnica de la información, con el fin de mejorar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de estos

sistemas esenciales para la continuidad de los servicios clínicos y de soporte de vida, conforme a los lineamientos de las normas ISO 14224, ISO 31010, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11.

Específicos

Objetivo Uno - Identificación de Activos Críticos.

Determinar los activos eléctricos críticos y de emergencia involucrados en la operación hospitalaria, evaluando su impacto estratégico y su importancia funcional en la continuidad de los servicios clínicos, aplicando los criterios de la norma ISO 31010.

Nivel 1 – Conocer (Escala de Bloom y Gagné).

Objetivo Dos - Caracterización Operativa y Funcional.

Analizar la relevancia operativa y los requerimientos funcionales de los activos eléctricos críticos previamente identificados, con el propósito de seleccionar un subconjunto representativo sobre el cual se aplicará la metodología RCM, conforme a los lineamientos de la norma ISO 14224.

Nivel 2 – Comprender (Escala de Bloom y Gagné).

Objetivo Tres - Análisis Técnico y Evaluación de Criticidad.

Clasificar la información técnica relevante de los activos críticos, incluyendo funciones primarias y secundarias, fallas funcionales, modos de falla y niveles de criticidad, mediante la aplicación de la norma ISO 31010.

Nivel 3 – Aplicar (Escala de Bloom y Gagné).

Objetivo Cuatro - Aplicación de Metodología RCM.

Implementar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) conforme a las normas SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, sobre los activos críticos previamente seleccionados, con el fin de establecer estrategias de mantenimiento proactivas y basadas en confiabilidad.

Nivel 4 – Analizar (Escala de Bloom y Gagné).

Objetivo Cinco - Propuesta de Mejora.

Formular una propuesta de implementación del RCM adaptada al entorno hospitalario, orientada a optimizar la gestión del mantenimiento de los sistemas eléctricos críticos y de emergencia, incrementando su confiabilidad y reduciendo riesgos operativos.

Nivel 5 – Sintetizar (Escala de Bloom y Gagné).

Objetivo Seis - Evaluación y Conclusiones.

Presentar los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología y las principales conclusiones sobre su impacto en la confiabilidad, disponibilidad y resiliencia de la infraestructura hospitalaria.

Nivel 6 – Evaluar (Escala de Bloom y Gagné).

Antecedentes de la Investigación o del Proyecto

En el ámbito hospitalario, la confiabilidad y disponibilidad de los activos críticos resultan determinantes para garantizar la seguridad del paciente y la continuidad de los servicios clínicos. La literatura evidencia que las metodologías tradicionales de mantenimiento, centradas en esquemas preventivos o correctivos, presentan limitaciones para anticipar y mitigar fallas en equipos cuya operación es vital, tales como sistemas de soporte de vida, redes de gases

medicinales y unidades de energía de emergencia (Shamayleh et al., 2020; Fumagalli et al., 2019; Arab-Zozani et al., 2021).

En respuesta a esta problemática, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ha evolucionado como una estrategia sistemática y analítica que permite identificar funciones, modos de falla y consecuencias, orientando la definición de planes de mantenimiento óptimos (Moubray, 1997; Nowlan & Heap, 1978). Esta metodología, aplicada inicialmente en la industria aeronáutica, ha mostrado resultados efectivos en el sector salud al priorizar actividades en función de la criticidad y del impacto operativo (Salah et al., 2018; Shamayleh et al., 2020; Mutia et al., 2012).

Diversos estudios han demostrado la aplicabilidad del RCM en instalaciones hospitalarias de alta complejidad. Por ejemplo, Shamayleh et al. (2020) documentaron cómo el uso de un RCM basado en criticidad redujo significativamente los tiempos de inactividad en equipos biomédicos de un hospital especializado. Asimismo, Salah et al. (2018) integraron criterios de confiabilidad con enfoques de optimización en instalaciones hospitalarias, evidenciando mejoras tanto en mantenibilidad y confiabilidad como en costos de operación.

Estos resultados coinciden con la revisión de Geisbush y Ariaratnam (2022), quienes destacan al RCM como una de las prácticas más consolidadas para aumentar la resiliencia de sistemas en sectores de alta exigencia técnica. En la misma línea, trabajos realizados en hospitales de América Latina evidencian brechas en la gestión del mantenimiento de equipos críticos, resaltando la necesidad de marcos metodológicos robustos y alineados con normas internacionales (Orozco et al., 2017; Viscáíno-Cuzco et al., 2019).

En paralelo, se han desarrollado marcos normativos que fortalecen la aplicación metodológica del RCM. La norma SAE JA1011 establece los criterios de evaluación que debe cumplir cualquier proceso de RCM, mientras que la guía UNE 200001-3-11 proporciona lineamientos prácticos para su implementación. Complementariamente, la norma ISO 14224 estandariza la recolección y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento, favoreciendo la construcción de bases de datos robustas para la toma de decisiones (International Organization for Standardization, 2016; OREDA Participants, 2015; Tsang, 2002).

Por su parte, la ISO/IEC 31010 detalla metodologías de análisis de riesgos aplicables a la priorización de activos críticos, mientras que normas como MIL-STD-2173 y NFPA 99 consolidan criterios técnicos y prácticos para entornos de alta confiabilidad, entre ellos los hospitales (International Electrotechnical Commission, 2019; Department of Defense, 1986; NFPA, 2021). En la literatura de gestión de activos y mantenimiento, autores como Crespo Márquez (2007) y Pintelon & Van Puyvelde (2020) han demostrado la relevancia de integrar estos estándares en modelos de decisión orientados a la confiabilidad y la mantenibilidad.

En resumen los antecedentes muestran una convergencia entre las experiencias prácticas hospitalarias y los marcos normativos internacionales, consolidando al RCM como una metodología idónea para optimizar la gestión del mantenimiento en activos críticos. Esto sustenta la pertinencia de su aplicación en instituciones hospitalarias de alta complejidad, donde la confiabilidad, la disponibilidad y la seguridad son condiciones no negociables (Geisbush & Ariaratnam, 2022; Pintelon & Van Puyvelde, 2020).

Estado del Arte

La gestión de mantenimiento en hospitales representa un elemento crucial para mantener sin interrupciones los servicios médicos y asegurar su calidad. En este ámbito, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ha demostrado ser una metodología particularmente valiosa para garantizar que los equipos más importantes estén siempre operativos y seguros (Moubray, 1997; Salah et al., 2018; Shamayleh et al., 2020). La revisión de lo más actualizado en este campo revela progresos importantes en normativas, técnicas y métodos que han facilitado la adaptación del RCM a entornos demandantes como los hospitales, transformando el mantenimiento de una simple tarea operativa a un componente estratégico en la administración de equipos y la planificación institucional de los centros de salud.

En cuanto al aspecto normativo, varios estándares internacionales han guiado el desarrollo de metodologías prácticas para el mantenimiento hospitalario. La norma SAE JA1011 define los requisitos que debe seguir un proceso de RCM para ser considerado adecuado, especificando las preguntas fundamentales sobre funciones, fallas potenciales y sus efectos (Nowlan & Heap, 1978; Moubray, 1997). Complementariamente, la ISO 14224 ofrece directrices para recolectar y analizar información sobre confiabilidad y facilidad de mantenimiento, estableciendo las bases para desarrollar planes de mantenimiento basados en datos concretos (International Organization for Standardization, 2016; OREDA Participants, 2015). Este marco normativo se conecta con el concepto de gestión de activos de la ISO 55001, que considera el mantenimiento como una decisión que abarca toda la vida útil de los equipos (International Organization for Standardization, 2014; Crespo Márquez, 2007).

Igualmente, la ISO/IEC 31010 describe métodos para evaluar riesgos que son útiles para determinar la criticidad de los equipos y establecer prioridades en las intervenciones de

mantenimiento (International Electrotechnical Commission, 2019; Tsang, 2002). Otros estándares como la MIL-STD-2173 y la UNE 200001-3-11 fortalecen la aplicación organizada del RCM, aportando criterios técnicos para su implementación en sectores que requieren alta confiabilidad, incluido el hospitalario (Department of Defense, 1986; AENOR, 2011; Smith & Hinchcliffe, 2004; Pintelon & Van Puyvelde, 2020). La puesta en práctica de estos métodos se apoya en herramientas como análisis de modos de falla, árboles de fallos y estudios estadísticos del comportamiento de equipos que permiten medir el riesgo y fundamentar las decisiones de mantenimiento.

Desde el punto de vista académico, numerosas investigaciones han confirmado la utilidad del RCM en hospitales. Por ejemplo, Shamayleh et al. (2020) desarrollaron un método de RCM basado en criticidad en entornos sanitarios y registraron una disminución en fallas imprevistas de equipos biomédicos. De manera similar, Salah et al. (2018) demostraron cómo la planificación de mantenimiento con RCM reduce costos y mejora la disponibilidad de servicios esenciales en instalaciones hospitalarias. Investigaciones como la de Fumagalli et al. (2019) indican que combinar RCM con análisis de riesgos permite prever fallas de consecuencias graves, mientras que Mutia et al. (2012) destacan su efectividad en el manejo de equipos médicos y de soporte vital.

La literatura especializada más actual ha identificado como equipos críticos los sistemas de energía de emergencia, generadores eléctricos, dispositivos de soporte vital y equipos médicos de diagnóstico. Varios expertos subrayan que las fallas en estas instalaciones provocan interrupciones graves en la atención clínica, lo que hace del RCM una herramienta especialmente adecuada para prevenir fallos y diseñar planes de mantenimiento orientados al impacto operativo (Geisbush & Ariaratnam, 2022; NFPA, 2021; Arab-Zozani et al., 2021).

Desde la perspectiva de la gestión organizacional, la adopción de un esquema de mantenimiento centrado en la confiabilidad en un hospital de alta complejidad requiere una adecuada gestión del cambio, de forma que las nuevas prácticas, roles y responsabilidades se integren en la cultura institucional y en los procesos existentes. Los marcos de gestión de activos como ISO 55001 y los modelos de gestión del mantenimiento propuestos por Crespo Márquez (2007) y Pintelon & Parodi-Herz (2008) permiten alinear las decisiones de mantenimiento con la estrategia institucional, los objetivos de sostenibilidad económica y el modelo de operación, garantizando que las inversiones en confiabilidad se justifiquen tanto desde la perspectiva clínica como financiera.

En síntesis, el estado del arte muestra una consolidación normativa y académica que respalda la aplicación del RCM en instituciones hospitalarias. El uso de estándares internacionales como SAE JA1011, ISO 14224, ISO/IEC 31010, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, junto con la evidencia empírica reciente, constituye una base sólida para diseñar estrategias de mantenimiento que fortalezcan la confiabilidad y mantenibilidad de los activos críticos. Adicionalmente la gestión de la información y la medición del sistema de gestión de activos resulta fundamental para estructurar sistemas de registro, indicadores y tableros de control que permitan evaluar de manera continua el desempeño del sistema de mantenimiento, retroalimentando las decisiones derivadas del RCM y cerrando el ciclo de mejora continua (Pintelon & Van Puyvelde, 2020; Geisbush & Ariaratnam, 2022). No obstante, persiste la oportunidad de contextualizar dichas metodologías al sector hospitalario de alta complejidad, donde las condiciones de seguridad y criticidad exigen adaptaciones específicas que garanticen resultados sostenibles y efectivos.

Marco Metodológico o Elaboración Metodológica

Este trabajo de investigación adopta un enfoque descriptivo y práctico, enfocado en analizar y mejorar la gestión del mantenimiento en un hospital de alta complejidad donde la operación depende críticamente del funcionamiento confiable de sus sistemas eléctricos esenciales. Este tipo de estudio resulta particularmente apropiado cuando se pretende examinar una situación real, detectar sus limitaciones técnicas, metodológicas y formular propuestas concretas para reforzar la seguridad y continuidad de los servicios de atención médica.

El objetivo central es evaluar el estado actual de la gestión de mantenimiento de los activos eléctricos vitales del Hospital Mediadiz y con base en los hallazgos obtenidos desarrollar un marco metodológico fundamentado en el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Dicho modelo se alinearán con los criterios establecidos en normas técnicas internacionales como ISO 14224, ISO 31010, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, adaptándose a las particularidades operativas del entorno hospitalario.

Tipo de Estudio y de Análisis a Desarrollar

El presente trabajo se plantea como un diseño metodológico con estudio de caso de alcance descriptivo-aplicado, cuyo propósito es estructurar un marco metodológico y una propuesta técnica de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) adaptados a los activos eléctricos críticos de la red eléctrica esencial y de emergencias en un hospital de alta complejidad, en coherencia con el título y los objetivos del proyecto el énfasis está en delimitar con claridad el alcance y en entregar a la clínica un paquete documental listo para adopción interna.

El alcance incluye la identificación y priorización de activos críticos conforme a la clasificación del sistema eléctrico esencial de NFPA 99 y a la jerarquía/taxonomía de ISO 14224 (NFPA, 2021; International Organization for Standardization, 2016; Pintelon & Van Puyvelde, 2020); el análisis funcional y la valoración de criticidad bajo ISO 31010, con dimensiones operativa, seguridad y económica, ponderaciones PO/PS/PE y el cálculo $R = \text{Probabilidad} \times \text{Impacto ponderado}$ (International Electrotechnical Commission, 2019; Tsang, 2002) la estructuración conceptual de la lógica RCM conforme SAE JA1011, apoyada en MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11 para la selección justificada de tareas (TI, TD, CBM, rediseño, RTF) (Nowlan & Heap, 1978; Moubray, 1997; Smith & Hinchcliffe, 2004); y la formulación de una propuesta técnica de implementación por fases (piloto, despliegue) que define prerequisites, roles/competencias, requerimientos de datos y trazabilidad de indicadores (MTBF, MTTR, disponibilidad y cumplimiento PM) en línea con las mejores prácticas de confiabilidad y mantenibilidad (Crespo Márquez, 2007; Pintelon & Parodi-Herz, 2008; Geisbush & Ariaratnam, 2022).

El alcance no incluye la ejecución operativa en campo ni la validación física de las tareas propuestas. Tampoco evalúa en detalle la factibilidad financiera, ni cubre eventos externos no controlables por la institución.

Como entregables a la clínica, se proveen inventario y jerarquía de activos críticos alineados con la taxonomía de ISO 14224; análisis funcional y FMEA/RPN de los activos priorizados, matriz de criticidad basada en criterios de riesgo trazables y ponderaciones PO/PS/PE (International Organization for Standardization, 2016; International Electrotechnical Commission, 2019) y árbol/tabla de decisiones RCM estructurado a partir de la lógica SAE

JA1011/UNE/MIL-STD, con el catálogo de tareas y periodicidades de referencia (Moubray, 1997; Smith & Hinchcliffe, 2004; Salah et al., 2018; Shamayleh et al., 2020).

También se plantea un plan de implementación por fases con responsables, recursos, riesgos y controles, así como lineamientos de pruebas y verificación documental referenciados a normativa específica de equipos e instalaciones eléctricas por ejemplo, NFPA 110 para sistemas de emergencia y reserva, ISO 8528 para grupos electrógenos, UL 1008 e IEC 60947-6-1 para conmutadores/ATS, IEC 62040 para UPS, IEEE 485 e IEEE 1188 para dimensionamiento y mantenimiento de baterías VRLA, IEC 60364-7-710 y NFPA 70 (NEC) para locales médicos e instalaciones de baja tensión, así como RETIE y NTC 2050 para el marco colombiano aplicable—, complementados con criterios de confiabilidad y gestión de riesgo en sistemas eléctricos críticos (NFPA, 2021; Fumagalli et al., 2019).

Además, se propone un paquete de formatos y KPIs (plantillas de captura, tableros MTBF/MTTR/disponibilidad/cumplimiento PM) y un anexo normativo con el mapeo de requisitos a cada artefacto.

Metodológicamente, el estudio adopta un enfoque mixto en la dimensión cuantitativa se emplean indicadores de confiabilidad y mantenibilidad (MTBF, MTTR, disponibilidad), medidas de criticidad y riesgo según metodologías de análisis de riesgo estructuradas (Tsang, 2002; International Electrotechnical Commission, 2019); en la dimensión cualitativa se desarrollan análisis funcionales y validación por juicio experto frente a normas, garantizando triangulación y trazabilidad de hallazgos (Crespo Márquez, 2007; Pintelon & Van Puyvelde, 2020).

La unidad de análisis se delimita mediante la priorización de activos críticos siguiendo criterios de riesgo y confiabilidad, seleccionando un activo de referencia de alto impacto para

ilustrar la aplicación conceptual de la lógica RCM sin ejecución en campo (International Organization for Standardization, 2016; NFPA, 2021).

El contexto de aplicación es el Hospital Medicadiz (Ibagué, Colombia), institución privada de cuarto nivel cuyo desempeño asistencial depende de la confiabilidad y la disponibilidad de sus infraestructuras eléctricas críticas. La adopción normativa en este trabajo es documental y conceptual, y se utiliza para trazar criterios técnicos y de seguridad que sustenten la propuesta, manteniendo en todo momento la coherencia entre el título, los objetivos y el texto (Fumagalli et al., 2019; Geisbush & Ariaratnam, 2022).

Fases del Proyecto

El presente estudio se desarrollará en seis fases metodológicas, diseñadas en correspondencia con los objetivos específicos planteados, lo que garantiza coherencia entre el diseño metodológico y los resultados esperados.

Fase I – Identificación de activos críticos

En esta fase se realizará la identificación y priorización de los activos eléctricos críticos del Hospital Medicadiz, considerando la red eléctrica esencial y de emergencias. Para ello se aplicarán técnicas de análisis de riesgos alineadas con la ISO 31010, con el fin de determinar qué equipos resultan indispensables para la seguridad del paciente y la continuidad de la atención clínica.

Fase II – Caracterización operativa y funcional

En la segunda fase se llevará a cabo la caracterización operativa y funcional de los activos críticos seleccionados. Se documentarán funciones, parámetros de operación, modos de uso y condiciones de servicio, tomando como referencia la estructura de datos y taxonomía definida en

la ISO 14224, de manera que la información de confiabilidad y mantenibilidad quede organizada bajo estándares internacionales.

Fase III – Análisis técnico y evaluación de criticidad

La tercera fase comprende el análisis técnico detallado de los activos priorizados, incluyendo la definición de funciones primarias y secundarias, fallas funcionales, modos de falla y efectos asociados. Con base en los lineamientos de la ISO 31010, se elaborarán matrices de criticidad que integren dimensiones operativas, de seguridad y económicas, soportando la priorización de riesgos y la toma de decisiones sobre los activos más sensibles para el hospital.

Fase IV – Aplicación de la metodología RCM

En la cuarta fase se aplicará de manera estructurada la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) a los activos críticos seleccionados. Siguiendo los criterios establecidos en SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, se desarrollarán árboles de decisión RCM para definir tareas de mantenimiento preventivas, predictivas, basadas en condición, rediseños o estrategias de “dejar fallar”, según corresponda a las consecuencias y criticidad de cada modo de falla.

Fase V – Formulación de la propuesta de implementación

La quinta fase se enfocará en la elaboración de una propuesta de implementación del RCM adaptada al contexto del Hospital Medicadiz. Esta propuesta integrará los resultados de las fases anteriores, definiendo fases de despliegue (piloto y expansión), roles y competencias requeridas, necesidades de información, indicadores de desempeño (MTBF, MTTR, disponibilidad, cumplimiento de PM) y lineamientos operativos para asegurar la sostenibilidad de la metodología en el tiempo.

Fase VI – Evaluación y conclusiones

Finalmente, en la sexta fase se consolidarán los resultados del estudio, se evaluará la coherencia de la metodología propuesta frente a los objetivos del proyecto y se formularán conclusiones y recomendaciones. Esta fase incluirá la síntesis de hallazgos, la valoración del aporte del modelo RCM a la gestión del mantenimiento en el hospital y la identificación de oportunidades futuras de mejora y ampliación del alcance hacia otros activos hospitalarios.

Desarrollo

Objetivo 1

Determinar los activos eléctricos críticos y de emergencia involucrados en la operación hospitalaria, evaluando su impacto estratégico y su importancia funcional en la continuidad de los servicios clínicos, aplicando los criterios de la norma ISO 31010.

Introducción

La continuidad de la atención clínica en hospitales de alta complejidad depende de una infraestructura eléctrica confiable, segura y redundante. Normas internacionales como la NFPA 99 establecen la división del sistema eléctrico hospitalario en redes vitales, críticas y de emergencia, mientras que la ISO 31000 y la ISO 31010 proporcionan lineamientos técnicos para la gestión y evaluación del riesgo.

En este contexto, el Hospital Medicadiz (Ibagué) cuenta con plantas eléctricas sincronizadas y un conjunto de UPS que garantizan el suministro ininterrumpido en áreas críticas como quirófanos, unidades de cuidados intensivos (UCI), unidades de cuidados especiales

(UCE), diagnóstico por imágenes, hemodinamia y sistemas TICS.

La aplicación sistemática de la ISO 31010:2019 permite identificar y jerarquizar los activos eléctricos de la red vital/crítica y de emergencias, estimar la probabilidad de fallas relevantes y sus consecuencias sobre la seguridad del paciente, la operación y la economía hospitalaria, con el fin de determinar qué equipos resultan indispensables para la continuidad de los servicios clínicos.

En este primer objetivo, correspondiente a la Fase I, Identificación de activos críticos, se aplica de manera sistemática la norma ISO 31010 para identificar y priorizar los activos eléctricos críticos y de emergencia del Hospital Medicadiz que resultan indispensables para la seguridad del paciente y la continuidad de la atención clínica en función de su impacto estratégico y su importancia funcional en la operación hospitalaria.

Marco metodológico ISO 31010

La norma ISO 31010:2019, complementaria a la ISO 31000:2018, define un proceso estructurado para la evaluación del riesgo compuesto por cinco etapas fundamentales:

1. Establecimiento del contexto: delimitar el alcance, los criterios y el entorno organizacional y técnico.
2. Identificación del riesgo: reconocer los eventos, causas y consecuencias.
3. Análisis del riesgo: evaluar probabilidad e impacto mediante técnicas adecuadas.
4. Evaluación del riesgo: comparar resultados con criterios predefinidos.

En el marco de este objetivo y de la Fase I – Identificación de activos críticos, el trabajo se centra en las etapas 1 a 4 (establecimiento del contexto, identificación, análisis y evaluación

del riesgo), utilizando la ISO 31010 para priorizar activos. El tratamiento detallado del riesgo se desarrolla en los objetivos posteriores, asociados a la implementación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Criterios adoptados

Para la priorización de los activos se adoptaron los siguientes criterios:

TMIT (Tiempo Máximo de Interrupción Tolerable): 0 a 20 segundos para servicios vitales y críticos (UCI, UCE, quirófanos, hemodinamia, soporte TICS de misión crítica) y hasta 60 segundos para cargas industriales o auxiliares.

Pesos de impacto: Impacto Operativo (PO) = 0,4; Impacto en Seguridad (PS) = 0,4; Impacto Económico (PE) = 0,2.

Rangos de riesgo: Bajo: 1 – 6, Medio: 7 – 14, Alto: 15 – 25.

Principio ALARP (As Low As Reasonably Practicable): Se consideran no aceptables los riesgos con valores de $R \geq 15$.

Con estos criterios se consideran críticos aquellos activos cuyo riesgo ponderado resulta no aceptable ($R \geq 15$) y cuyo TMIT es incompatible con la seguridad del paciente y la continuidad de los servicios clínicos, alineando la priorización con el propósito de la Fase I.

Identificación y jerarquización de activos

Con base en la estructura de jerarquización de activos de la ISO 14224, se elaboró el inventario de los activos eléctricos involucrados en la operación de la red crítica/vital del hospital.

Tabla 1*Inventario de activos eléctricos de la red crítica/vital y de emergencia*

ID	Activo	Sistema alimentado	Marca/Modelo	Capacidad
450071	Planta eléctrica 3	Industrial + Diagnóstico	Modasa MP-515	625 kVA – 480 V
450073	Planta eléctrica 1	Vital y Crítica	Modasa MP-760	800 kVA – 208 V
751005	UPS UCI Red Crítica	TD-02 UCI	Liebert NXR	30 kVA – 208 V
751006	UPS UCE Red Crítica	TD-02 UCE	Liebert NXR	30 kVA – 208 V
751007	UPS Sistemas Regulados	Equipos biomédicos	Liebert NXR	60 kVA – 208 V
751008	UPS Hemodinamia	Diagnóstico por imagen	Powersun	120 kVA – 480 V
751010–14	UPS Quirófanos 1–4	TD-02 Quirófanos	Liebert NXR	6 kVA – 208 V
1051010–16	UPS Quirófanos 5–10	TD-02 Quirófanos	TITAN	6 kVA – 208 V

Nota. Fuente: Elaboración propia con base en registros técnicos del Hospital Medicadiz (2025).

Metodología de análisis del riesgo y fórmulas empleadas

La evaluación del riesgo se realizó mediante una matriz de criticidad que considera la probabilidad de falla (P) y un impacto ponderado (IP) construido a partir de tres dimensiones: impacto operativo (IO), impacto en seguridad (IS) e impacto económico (IE), cada una ponderada por sus respectivos pesos (PO, PS, PE).

Ecuación 1. Impacto ponderado

$$IP = (IO \times PO) + (IS \times PS) + (IE \times PE)$$

Donde: IO = Impacto operativo, IS = Impacto en seguridad, IE = Impacto económico,

PO = Peso operativo, PS = Peso en seguridad, PE = Peso económico

Ecuación 2. Riesgo

$$\text{Riesgo} = P \times IP$$

Donde R es el riesgo asociado al evento, P es la probabilidad de ocurrencia e IP es el índice de impacto que integra los efectos operativos, de seguridad y económico.

Los valores de IO, IS e IE se asignaron en una escala de 1 a 5, en función de la severidad de las consecuencias en cada dimensión, la probabilidad (P) se calificó igualmente en una escala de 1 a 5. El producto $P \times IP$ permite clasificar el riesgo en los rangos Bajo, Medio o Alto definidos previamente.

Resultados de la matriz de criticidad

Tabla 2

Matriz de criticidad aplicada a los activos eléctricos (según ISO 31010)

ID	Activo	P	IO	IS	IE	IP	R	Nivel	TMIT
450071	Planta Eléctrica 3	3	1	3	2	1,9	5,7	Bajo	60 s
450073	Planta Eléctrica 1	4	5	5	5	5,0	20	Alto	20 s
751005	UPS UCI Red Crítica	4	5	5	5	5,0	20	Alto	0 s
751006	UPS UCE Red Crítica	4	5	5	5	5,0	20	Alto	0 s
751007	UPS Sistemas Regulados	4	4	4	3	3,8	15,2	Alto	0 s
751008	UPS Hemodinamia	4	5	5	5	5,0	20	Alto	0 s
751010– 14	UPS Quirófanos 1– 4	4	5	5	5	5,0	20	Alto	0 s
1051010– 16	UPS Quirófanos 5– 10	3	5	5	5	5.0	15	Alto	0 s

Nota. Los valores de riesgo se clasificaron conforme al principio ALARP, considerando no aceptables aquellos con $R \geq 15$.

Activos críticos identificados

De acuerdo con los resultados de la matriz de criticidad y los criterios definidos ($R \geq 15$ y $TMIT \leq 20$ s), los activos eléctricos críticos de la red esencial y de emergencias del Hospital Medicadiz son:

1. Planta Eléctrica 1 (Modasa MP-760, 800 kVA – 208 V)
2. UPS UCI Red Crítica (Liebert NXR, 30 kVA – 208 V)
3. UPS UCE Red Crítica (Liebert NXR, 30 kVA – 208 V)
4. UPS Hemodinamia (Powersun, 120 kVA – 480 V)
5. UPS Quirófanos 1–4 (Liebert NXR, 6 kVA – 208 V)
6. UPS Quirófanos 5–10 (TITAN, 6 kVA – 208 V)
7. UPS Sistemas Regulados (Liebert NXR, 60 kVA – 208 V)

Estos equipos presentan los mayores valores de riesgo ponderado ($R \geq 15$) y son determinantes en la operación continua de servicios clínicos vitales, por lo que se reconocen como activos eléctricos críticos de la red esencial y de emergencias del hospital, en cumplimiento del objetivo y de la Fase I – Identificación de activos críticos.

Resultados

La aplicación de la ISO 31010:2019 permitió una identificación objetiva y cuantificada de los activos eléctricos críticos mediante una matriz de criticidad $P \times IP$, apoyada en criterios de

probabilidad, impacto operativo, de seguridad y económico. Los activos con valores de $R \geq 15$ y $TMIT \leq 20$ s se consideran críticos, pues sustentan la continuidad de procesos clínicos vitales y no toleran interrupciones prolongadas sin comprometer la seguridad del paciente y la operación hospitalaria. La identificación y priorización de estos activos constituye el insumo para los objetivos 2, 3 y 4 del proyecto, en los que se desarrollará el análisis funcional detallado y el tratamiento del riesgo mediante la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), orientado a mejorar los indicadores de confiabilidad, disponibilidad (MTBF) y seguridad eléctrica hospitalaria.

Objetivo 2

Analizar la relevancia operativa y los requerimientos funcionales de los activos eléctricos críticos previamente identificados, con el propósito de seleccionar un subconjunto representativo sobre el cual se aplicará la metodología RCM, conforme a los lineamientos de la norma ISO 14224.

Introducción

La continuidad de la atención clínica en un hospital de alta complejidad depende de la capacidad de sus activos eléctricos críticos para responder de manera confiable ante interrupciones de la red eléctrica normal. En este contexto la norma ISO 14224:2016 establece un marco estandarizado para la recopilación, estructuración y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos industriales, mediante una taxonomía jerárquica de activos y la definición de conjuntos de datos (Data Record Set, DRS) orientados al cálculo de indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (RAM).

En coherencia con el Objetivo 1, que permitió identificar los activos eléctricos críticos del Hospital MedicaDiz, el Objetivo 2 se centra en comprender y analizar su relevancia operativa y requerimientos funcionales, documentando funciones, parámetros de operación, modos de uso y condiciones de servicio conforme a la ISO 14224. En términos de la Escala de Bloom y Gagné, este objetivo se sitúa en el Nivel 2 – Comprender, pues exige interpretar la información técnica y contextualizarla en función de la continuidad asistencial.

A partir de esta caracterización operativa y funcional, se selecciona un subconjunto representativo de activos el generador de 800 kVA y las UPS asociadas a quirófanos sobre el cual se aplicará en fases posteriores la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Fundamentación teórica y normativa (ISO 14224)

La ISO 14224:2016 propone una taxonomía jerárquica de equipos (unidad, sistema, subsistema, componente) y define una estructura de datos para registrar información de fallas y mantenimiento, bajo el enfoque RAM. Para cada activo crítico se recomienda consolidar, como mínimo:

Identificación inequívoca y jerarquía dentro del sistema eléctrico esencial.

Función principal y funciones secundarias, incluyendo el contexto operacional.

Condiciones de servicio (carga, ambiente térmico, modo de operación, régimen de trabajo).

Historial de fallas y mantenimientos (preventivos, correctivos, predictivos).

Indicadores cuantitativos como Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y Disponibilidad Operativa (A).

La disponibilidad operativa se modela de acuerdo con la expresión:

Ecuación 3. Disponibilidad

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde A es la disponibilidad intrínseca del activo o sistema; MTBF es el tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures) y MTTR es el tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair).

Lo que permite relacionar el desempeño real de los activos con las exigencias de continuidad del servicio en áreas críticas hospitalarias. Esta estructura de datos organizada conforme a la ISO 14224, constituye el insumo base para la priorización y posterior aplicación de la metodología RCM.

Inventario resumido de activos críticos analizados

En concordancia con el resultado del Objetivo 1, se selecciona para esta fase un subconjunto inicial de activos eléctricos críticos asociados al sistema eléctrico esencial del Hospital Medicadiz.

Tabla 3

Inventario resumido y contexto operacional

ID	Tipo	Descripción	Ubicación	Sistema alimentado	Marca/Modelo	Especificación	Instalación	Últ. mantto.	Fallas	Responsable
450073	Grupo electrógeno	Planta eléctrica 1	Clínica / Sótano	Sistemas vitales y críticos	Modasa MP-760	800 kVA – 208 V – 60 Hz	17/08/2017	Nov-2025	Sí – Tarjeta AVR	Cummins de los Andes
751010-14	UPS Quirófanos 1–4	Liebert NXR (4 u.)	Clínica / Piso 2	TD-02 Quirófanos	Liebert NXR	6 kVA c/u – 208 V – 60 Hz	25/11/2017	Abr-2025	Sí – Baterías	Inverser Ltda
1051010-16	UPS Quirófanos 5–10	TITAN (6 u.)	Clínica / Piso 2	TD-02 Quirófanos	TITAN	6 kVA c/u – 208 V – 60 Hz	05/08/2024	Abr-2025	Sí – Baterías	Inverser Ltda

Nota. Información resumida conforme a la estructura DRS de ISO 14224.

Estos activos representan la arquitectura de continuidad eléctrica asociada a quirófanos, las UPS asumen el suministro instantáneo ante pérdida de la red, mientras que la planta eléctrica de 800 kVA sostiene el suministro durante interrupciones prolongadas.

Requerimientos funcionales y condiciones de operación (ISO 14224)

Con base en la ISO 14224 y en los datos institucionales, se describen los parámetros de diseño, las condiciones funcionales requeridas y el mantenimiento preventivo asociado a cada activo, tal como se presenta en la Tabla 7.

Tabla 4*Requerimientos funcionales y condiciones de operación*

Activo	Parámetros de diseño	Condiciones funcionales requeridas	Mantenimiento preventivo (frecuencia)	Observaciones técnicas clave
Generador 800 kVA (Modasa MP-760)	800 kVA – 208 V – 60 Hz; arranque automático; autonomía ≥ 8 h	Arranque ≤ 10 s; pruebas semanales bajo carga; T° de motor < 90 °C	Cada 250 h o mensual; análisis de aceite por condición; pruebas de aislamiento semestrales	Telemetría/SCADA; redundancia de arranque, control de combustible y filtración
UPS Quirófanos Liebert NXR	208 V – 60 Hz; autonomía ≥ 15 min; eficiencia > 95 %	Redundancia N+1; pruebas de transferencia trimestrales; control térmico 20–25 °C	Inspección mensual; pruebas semestrales; reemplazo de baterías 3–5 años	SNMP; pruebas de autonomía; balanceo de carga
UPS Quirófanos TITAN	208 V – 60 Hz; autonomía ≥ 15 min; baterías VRLA/Li-ion	Redundancia N+1; control de armónicos; 20–25 °C	Inspección mensual; pruebas semestrales; reemplazo de baterías según SOH	BMS; control de firmware; monitoreo de impedancia

Nota. Requerimientos alineados con prácticas de confiabilidad y mantenibilidad (ISO 14224).

Esta caracterización permite evidenciar la relevancia operativa de cada activo: el generador garantiza el respaldo integral de sistemas vitales y críticos, mientras que las UPS aseguran la continuidad inmediata en quirófanos, donde el tiempo de transferencia y la calidad de la energía resultan determinantes para la seguridad del paciente.

Indicadores RAM: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

A partir del historial de fallas y mantenimientos, se estiman indicadores RAM para los activos analizados, en coherencia con las recomendaciones de la ISO 14224. La Tabla 5 resume los valores de MTBF, MTTR y Disponibilidad (A).

Tabla 5*Indicadores RAM estimados conforme a ISO 14224*

Activo	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilidad (A)	Interpretación técnica
Generador 800 kVA	1800	4	99.78 %	Alta disponibilidad si se sostienen pruebas semanales y análisis de aceite por condición.
UPS Quirófanos (Liebert NXR)	2500	2	99.92 %	Excelente mantenibilidad; dominante la degradación del banco de baterías.
UPS Quirófanos (TITAN)	2500	2	99.92 %	≥ 99.9 % con control térmico y pruebas de transferencia.

Nota. La disponibilidad A se calcula como $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$.

Estos indicadores cuantitativos refuerzan la selección de los activos analizados como elementos donde la confiabilidad y la mantenibilidad tienen un impacto directo sobre la continuidad operativa de los servicios quirúrgicos y de soporte vital.

Criterios de priorización y selección del subconjunto RCM

Para justificar la selección del subconjunto de activos sobre los cuales se aplicará la metodología RCM, se emplearon escalas de valoración de probabilidad e impacto y un extracto de FMEA, en coherencia con las técnicas de análisis de riesgos descritas en la ISO 31010, pero manteniendo el foco en la priorización de activos más que en el diseño detallado de tratamientos.

Tabla 6*Escalas de valoración de probabilidad e impactos (criterios de priorización)*

Valor	Probabilidad	Impacto Operativo	Impacto Seguridad	Impacto Económico
1	Remota (<1 cada 5 años)	Afecta sistema no esencial	Sin riesgo paciente	<\$1M COP
3	Ocasional (1 vez/año)	Afecta sistema crítico parcial	Riesgo moderado	\$5–20M COP
5	Frecuente (>4 veces/año)	Paraliza servicio vital	Riesgo vital	>\$50M COP

Nota. Las escalas se aplican para estimar la relevancia relativa de cada activo y priorizar aquellos cuya falla compromete servicios vitales.

Con base en estas escalas y en un FMEA de alto nivel, se identificaron modos de falla cuya ocurrencia genera impactos severos en la continuidad de quirófanos y sistemas vitales. La Tabla 7 resume algunos de los modos de falla representativos:

Tabla 7*Resumen FMEA para activos eléctricos críticos (extracto para priorización)*

Activo	Componente	Modo de falla	Controles existentes	Acciones recomendadas
Planta Eléctrica 1	Sistema de arranque	No arranca / encendido tardío	Pruebas semanales, checklist	Monitoreo remoto, doble banco de baterías
UPS UCI	Banco de baterías	Sulfatación / pérdida de capacidad	Medición de impedancia, alarmas	BMS por celda, sensores de temperatura
UPS Hemodinamia	By-pass	No conmuta / cerrado	Ensayo de transferencia	Redundancia N+1, revisión SSR trimestral

UPS Quirófanos	Control lógico	Falla de sincronismo	Watchdog, autotest	Respaldo de firmware y simulaciones
UPS Sistemas regulados	Inversor	Deriva térmica	Alarmas de temperatura	Termografía semestral, mantenimiento predictivo

Nota. Elaboración propia conforme a la metodología FMEA (ISO 31010:2019), empleada aquí como soporte para la priorización de activos a analizar mediante RCM.

A partir de esta priorización, se concluye que el generador de 800 kVA y las UPS asociadas a quirófanos conforman un subconjunto representativo de la red eléctrica esencial, donde convergen alta relevancia operativa, exigentes requerimientos funcionales y una elevada sensibilidad frente a fallas, por lo que se seleccionan como objeto del análisis RCM en fases posteriores.

Resultado

En síntesis, el desarrollo del Objetivo 2 permitió analizar la relevancia operativa y los requerimientos funcionales del generador de 800 kVA y de las UPS de quirófanos, estructurando la información conforme a la taxonomía, DRS e indicadores RAM propuestos por la ISO 14224. Se documentaron funciones, parámetros de operación, condiciones de servicio y desempeño esperado, evidenciando su papel crítico en la continuidad de los servicios quirúrgicos y sistemas vitales del Hospital Medicadiz.

A partir de esta caracterización y de una priorización basada en probabilidad e impactos, se seleccionó un subconjunto representativo de activos planta eléctrica de 800 kVA y UPS de quirófanos sobre el cual se aplicará la metodología de Mantenimiento Centrado en la

Confiabilidad (RCM) en los objetivos siguientes. De esta manera, se cumple la descripción de la Fase II y se enlaza de forma coherente con la lógica global del proyecto.

Objetivo 3

Clasificar la información técnica relevante de los activos críticos, incluyendo funciones primarias y secundarias, fallas funcionales, modos de falla y niveles de criticidad, mediante la aplicación de la norma ISO 31010.

Introducción

La continuidad asistencial en áreas quirúrgicas y servicios vitales del hospital depende de la capacidad de sus activos eléctricos críticos para mantener la energía en condiciones seguras y confiables. En el presente Objetivo 3 se desarrolla un análisis técnico detallado de los activos priorizados en objetivos previos: el generador de 800 kVA (ID 450073, Modasa MP-760) y las UPS de quirófanos (Liebert NXR y TITAN).

El propósito es clasificar la información técnica relevante de estos activos, definiendo sus funciones primarias y secundarias, las fallas funcionales asociadas, sus modos de falla y los niveles de criticidad correspondientes. La evaluación del riesgo se realiza mediante la aplicación práctica de la norma ISO 31010, utilizando técnicas de análisis de riesgos (FMEA y matriz de riesgo) que cuantifican la Probabilidad (P) y los impactos operativos, de seguridad y económicos. De esta forma, se alcanza el Nivel 3 – Aplicar (Escala de Bloom y Gagné), al operacionalizar los conceptos de gestión de riesgo sobre activos concretos del sistema eléctrico esencial.

El análisis se apoya en los resultados de los Objetivos 1 y 2, conservando los pesos oficiales de impacto ($PO = 0,4$; $PS = 0,4$; $PE = 0,2$) y los umbrales de nivel definidos por la matriz de criticidad institucional. Como producto, se consolida una matriz de clasificación y criticidad alineada con la estructura jerárquica de activos de la ISO 14224 e integrada con los criterios de riesgo de la ISO 31010, incorporando evidencias (órdenes de trabajo, registros de pruebas, logs de eventos) y controles existentes/acciones recomendadas. El resultado proporciona una priorización clara y trazable para alimentar el Objetivo 4 (aplicación de la metodología RCM).

Método aplicado

El método seguido para el desarrollo del Objetivo 3 se resume en los siguientes pasos:

1. Estructura jerárquica ISO 14224: Desagregación activo, sistema, subcomponente, conservando la codificación e identificación inequívoca.
2. Definición de funciones:
 - Función primaria: capacidad esencial del activo (qué debe hacer, en qué condiciones y con qué desempeño medible).
 - Funciones secundarias: monitoreo, protección, comunicación, calidad de la energía, integridad de suministros, entre otras.
3. Formulación de fallas funcionales: Identificación de las condiciones en las que el activo o subcomponente no cumple su función (total o parcialmente), en términos operativos y de seguridad.

4. Identificación de modos de falla y efectos asociados: Para cada falla funcional se listan los modos de falla técnicos y/o operativos (ejemplo: sulfatación de baterías, obstrucción de filtros, sobre temperatura, fallo de contactores), así como sus efectos asociados sobre:

- Disponibilidad del activo.
- Continuidad del servicio clínico.
- Seguridad del paciente y del personal.

5. Valoración del riesgo conforme a ISO 31010:

- Asignación de Probabilidad (P) e impactos IO, IS, IE con base en las escalas del proyecto.
- Cálculo de $IP = IO \cdot PO + IS \cdot PS + IE \cdot PE$.
- Cálculo de $R = P \times IP$.

6. Clasificación de niveles de criticidad

Asignación del nivel (Bajo / Medio / Alto) según los umbrales oficiales del proyecto, identificando los modos que se ubican en la banda superior del nivel Medio o cercanos al nivel Alto.

7. Consolidación de controles existentes y acciones recomendadas

Registro de controles actuales (pruebas, mantenimientos, monitoreo) y propuestas de mejora, que servirán como base para el diseño de tareas RCM en el Objetivo 4.

Funciones por activo (criterios clave)

-Generador 800 kVA (450073 – Modasa MP-760).

Función primaria: Suministrar ≥ 800 kVA en ≤ 10 s ante contingencias de la red comercial, manteniendo frecuencia de 60 Hz ± 5 % y tensión dentro de ± 10 % durante toda la contingencia.

Funciones secundarias: Comunicación confiable con ATS, emisión de alarmas y registros, mantenimiento de parámetros del motor y alternador dentro de rangos seguros, integridad del sistema de combustible, protección eléctrica adecuada para equipos conectados y para el personal.

-UPS de quirófanos (Liebert NXR / TITAN)

Función primaria: Proporcionar energía ininterrumpida (tiempo de transferencia 0 ms) a las cargas críticas de quirófanos, con autonomía $\geq$ la prevista en diseño para la carga típica y con THD y parámetros de V/f dentro de límites admisibles.

Funciones secundarias: Gestión de bypass seguro, comunicación con el sistema de generación/ATS, supervisión de estado de baterías, registro de eventos y alarmas, contribución al mantenimiento de la calidad de energía en el sistema TD-02.

Resultados: síntesis de criticidad por activo

Índice máximo de riesgo por activo:

GE 800 kVA (450073 – MP-760): R máx = 11,1.

UPS Liebert NXR (quirófanos): R máx = 11,1.

UPS TITAN (quirófanos): R máx = 11,1.

Estos valores de R se sitúan por encima del rango Medio oficial (8,0–10,4) y por debajo del nivel Alto (≥ 15), ubicándose en la banda superior de la criticidad Media. Esto implica que,

aunque formalmente pertenecen al nivel Medio, requieren priorización específica en la toma de decisiones, al estar asociados a funciones vitales (arranque de generador y autonomía de UPS).

Matriz de criticidad – GE 800 kVA (450073 – MP-760)

Tabla 8*Modos de falla relevantes y criticidad – GE 800 kVA.*

Subcompon ente	Falla funciona l	Modo de falla (ejemplos)	Efecto asociado	P	I O	I S	I E	I P	R	Nivel
Sistema de arranque	No arranca / arranca fuera de tiempo	Baterías sulfatadas/descargadas, terminales flojos, motor de arranque defectuoso	El generador no entra en servicio a tiempo, pérdida de respaldo de sistemas vitales y críticos	3	5	4	3	3, 7	11, 1	Medio (banda superior)
Filtración / líneas de combustible	Potencia insuficiente / paro en carga	Filtro obstruido; agua en diésel, crecimiento microbiano, fuga en líneas	Pérdida parcial o total de potencia durante la contingencia, riesgo de paro inesperado	3	4	4	3	3, 6	10, 8	Medio
Sistema de enfriamiento	Sobre temperatura – paro	Correa rota, bomba averiada, radiador obstruido	Disparo por alta temperatura; reducción de autonomía del grupo electrógeno	2	4	5	3	3, 9	7, 8	Medio

Nota. Criticidad del generador 800 kVA (450073 – MP-760) evaluada conforme a los criterios de la ISO 31010.

- Controles existentes (GE 800 kVA):

Prueba mensual con carga, banco de carga anual, mantenimiento de baterías, checklist pre-arranque, cambio de filtros por horas/año, drenaje periódico de trampa de agua, muestreo de combustible según ASTM, inspección mensual del sistema de refrigeración, prueba funcional bajo carga, limpieza de radiador.

- Acciones recomendadas (GE 800 kVA):

Reemplazo programado de baterías cada 36 – 48 meses, instalación de registrador de arranques y tiempos, torque y limpieza sistemática de terminales, instalación de filtro coalescente e indicador de ΔP , contrato de suministro de diésel certificado, termografía semestral de conexiones, disponibilidad de repuestos críticos (correa, bomba de agua), sensor redundante de temperatura en puntos críticos.

***Matriz de criticidad UPS de quirófanos (TITAN / referencia extrapolable a Liebert
NXR)***

Tabla 9

Modos de falla relevantes y criticidad – UPS de quirófanos TITAN

Subcomponente	Falla funcional	Modo de falla	Efecto asociado	P	I O	I S	I E	I P	R	Nivel
Banco de baterías (VRLA/string)	Autonomía < mínima requerida	Sulfatación/envejecimiento, celda abierta, temperatura elevada	Pérdida de respaldo instantáneo, desconexión o caída de carga crítica durante fallas de red o del generador	3	5	4	3	3,7	11,1	Medio (banda superior)
Electrónica de potencia (IGBT/rectificador)	Transferencia a bypass no planificada	IGBT/driver en corto, sobre temperatura, contaminación por polvo	Pérdida de doble conversión, posible exposición de la carga a variaciones de red y perturbaciones	2	4	5	4	4,0	8,0	Medio
Bypass (estático/mecánico)	Bypass falla/interrumpe en maniobra	Relés/contactores pegados, lógica defectuosa	Interrupción de la carga o imposibilidad de transferencia segura, riesgo para equipos conectados	2	5	4	3	3,7	7,4	Medio

Nota. Criticidad UPS de quirófanos TITAN; criterios análogos se aplican a UPS Liebert

NXR con parámetros específicos de diseño.

- Controles existentes (UPS quirófanos):

Medición periódica de impedancia de baterías, monitoreo de alarmas, inspecciones visuales, pruebas funcionales de transferencia, mantenimiento preventivo de electrónica de potencia y ventilación, revisión de registros de eventos y temperatura.

- Acciones recomendadas (UPS quirófanos):

Reemplazo programado de bancos de baterías según vida útil y resultados de pruebas, implementación de BMS a nivel de string o celda, instalación de sensores de temperatura adicionales y mejora de ventilación/sistema de climatización en sala de UPS, termografía semestral de barras y conexiones, revisión y prueba estructurada del bypass (estático/mecánico) con registros, políticas de limpieza y filtración de aire para minimizar polvo en electrónica.

Priorización de riesgos y decisiones

A partir de las matrices anteriores, se destacan los siguientes hallazgos:

- Los modos de falla asociados al sistema de arranque del generador y al banco de baterías de las UPS de quirófanos presentan $R \approx 11,1$, ubicándose en la banda superior del nivel Medio, por encima del rango Medio típico y cercanos al umbral de Alto.
- Estos modos afectan directamente la capacidad de respuesta ante contingencias (arranque oportuno del generador y autonomía de las UPS), por lo que se consideran modos críticos prioritarios para el diseño de tareas RCM.
- Modos como la contaminación del combustible, la sobre temperatura en el sistema de enfriamiento y las fallas del bypass o electrónica de potencia muestran valores de R en el rango Medio, pero con impacto significativo sobre la continuidad y la seguridad, por lo

que deben ser incluidos en la planificación de mantenimiento y en las estrategias de monitoreo.

En términos de decisión, los resultados de criticidad orientan a:

- Reforzar la disponibilidad del arranque y del suministro de combustible en el generador 800 kVA.
- Asegurar la autonomía real de las UPS mediante gestión activa de baterías y condiciones térmicas.
- Incrementar la confiabilidad de electrónica y bypass, especialmente donde no existe redundancia N+1.

Riesgo residual

Las acciones recomendadas tienen como propósito reducir la Probabilidad (P) o los impactos (IO, IS, IE), con la expectativa de que el valor de R descienda a niveles situados dentro de la banda Media baja o inferior. Los modos de falla que aun con controles mejorados, no logren ubicarse en niveles aceptables deberán ser tratados mediante medidas de ingeniería (por ejemplo, redundancia de sensores, mejoras en ventilación o aire acondicionado de salas de UPS y refuerzo en la gestión).

Estos resultados constituyen la base para el Objetivo 4, donde apoyados en los estándares SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, se estructurarán las tareas específicas de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para los modos de falla más críticos identificados en este objetivo.

Resultados

En resumen el desarrollo del Objetivo 3 permitió clasificar de manera sistemática la información técnica relevante de los activos eléctricos críticos priorizados (generador 800 kVA y UPS de quirófanos), incluyendo:

- Definición de función primaria y funciones secundarias por activo.
- Identificación de fallas funcionales, modos de falla y efectos asociados sobre la operación clínica.
- Cuantificación de la criticidad mediante IP y R, integrando dimensiones operativas, de seguridad y económicas con los pesos PO, PS y PE.
- Asignación de niveles de criticidad (Bajo/Medio/Alto) y priorización de modos de falla más sensibles para el hospital.

De esta forma, se cumple la descripción de la Fase III: el análisis técnico detallado de los activos priorizados y la elaboración de matrices de criticidad basadas en la ISO 31010, dejando trazada la ruta para el diseño de tareas RCM y la toma de decisiones sobre los activos eléctricos más críticos del Hospital MedicaDiz.

Objetivo 4

Implementar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) conforme a las normas SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, sobre los activos críticos previamente seleccionados, con el fin de establecer estrategias de mantenimiento proactivas y basadas en confiabilidad.

Introducción

La continuidad de la atención clínica y la seguridad del paciente exigen que el sistema eléctrico esencial responda sin fallas, especialmente ante eventos de pérdida de red o perturbaciones de calidad de energía. En este Objetivo 4, correspondiente al Nivel 4 – Analizar de la escala de Bloom y Gagné, se implementa de manera estructurada la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), conforme a las normas SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, sobre los activos críticos priorizados: generador de 800 kVA (450073 MP-760) y UPS de quirófanos (TITAN y Liebert NXR).

La ejecución se apoya en lo construido en los objetivos anteriores, el contexto operacional y la jerarquía de activos (ISO 14224) y la matriz de criticidad basada en ISO 31010 con ponderaciones PO/PS/PE = 0.4/0.4/0.2 (impacto operativo, de seguridad y económico). A partir de las funciones y fallas funcionales, los modos de falla y sus efectos y consecuencias (S/O/H/E), se aplica el árbol de decisión RCM para seleccionar tareas de mantenimiento preventivas sistemáticas, predictivas/basadas en condición (on-condition), failure-finding para funciones ocultas, rediseños cuando procede o, de forma justificada, estrategias de “dejar fallar” en modos de baja criticidad.

Los intervalos se definen considerando la ventana P–F, la demanda y la criticidad de cada modo de falla. Se fijan umbrales de monitoreo (por ejemplo, tiempo de arranque, THDv, estado de salud SoH de baterías), se programa el plan preventivo en el CMMS, se asignan responsabilidades mediante una matriz RACI y se establecen KPIs (disponibilidad, % de PM cumplido, RPN, THDv, tiempo de arranque, SoH de baterías, backlog, entre otros) para verificar el desempeño y cerrar el ciclo de mejora continua.

Alineación normativa y criterios

La implementación del RCM se estructura conforme a los siguientes lineamientos normativos:

- SAE JA1011: define los requisitos de un proceso RCM válido, incluyendo las preguntas esenciales:
 - ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo?
 - ¿De qué manera puede fallar en el cumplimiento de cada función (fallas funcionales)?
 - ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
 - ¿Qué ocurre cuando se presenta cada modo de falla (efectos)?
 - ¿Qué consecuencias tienen estas fallas (seguridad, operación, medio ambiente, economía)?
 - ¿Qué tareas proactivas son técnicamente factibles y efectivas?
 - Si no existen tareas adecuadas, ¿se justifica un rediseño o una estrategia de “dejar fallar” documentada?

Estas preguntas se formalizan en un árbol de decisión RCM, que para cada modo de falla recorre las ramas de consecuencias de seguridad, ambientales, operativas y económicas, y conduce a una de cinco familias de tareas. Mantenimiento preventivo sistemático (restauración/reemplazo por edad), mantenimiento basado en condición (on-condition / predictivo), tareas de búsqueda de fallos (failure-finding) para funciones ocultas, rediseño y dejar fallar de forma controlada y justificada.

- MIL-STD-2173: aporta criterios para el análisis de tareas e intervalos, el uso de información de confiabilidad y mantenibilidad, y la estructuración de hojas de trabajo RCM, con énfasis en la selección de tareas efectivas y la optimización de frecuencias.
- UNE 200001-3-11: establece una adaptación europea de la metodología RCM, con énfasis en la gestión de riesgos, la integración con sistemas de gestión de activos y la necesidad de resultados documentados, trazables y auditables.

Metodología aplicada

La metodología empleada en este objetivo busca aplicar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) sobre el generador de 800 kVA (450073 MP-760) y las UPS de quirófanos (TITAN y Liebert NXR), garantizando coherencia con los resultados de los objetivos anteriores y con los criterios de las normas SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11. El punto de partida consiste en consolidar, para cada activo, las funciones primarias y secundarias y sus estándares de desempeño a partir del contexto operacional definido en el Objetivo 2 y de la taxonomía de ISO 14224. Sobre estas funciones se formulan las fallas funcionales, entendidas como la incapacidad de cumplir el estándar, por ejemplo: interrupciones, tiempos de arranque excesivos, pérdidas de autonomía o salidas fuera de banda de tensión y frecuencia.

A partir del FMEA del Objetivo 3 se organiza un inventario de modos de falla por componente (baterías, sistemas de combustible y lubricación, enfriamiento, alternador/AVR, ATS, rectificador, inversor, bypass estático, ventilación, tarjetas de control, entre otros), indicando causas probables y evidencias observables como impedancia o conductancia, resultados de análisis de aceite, temperaturas, THDv, ripple DC o registros de alarmas. Cada modo se clasifica según sus consecuencias en las categorías S (seguridad), O

(operación/disponibilidad), H (función oculta) y E (ambiental/económica) y se asocia al puntaje de riesgo obtenido en la matriz de criticidad de ISO 31010, calculada con el impacto ponderado $IP = IO \cdot PO + IS \cdot PS + IE \cdot PE$ y el riesgo $R = P \cdot IP$ utilizando los pesos PO/PS/PE = 0,4/0,4/0,2. Esta etapa permite seleccionar qué modos, por su nivel de riesgo o su impacto sobre la seguridad y la continuidad clínica, deben pasar al análisis RCM completo.

Una vez priorizados los modos de falla, se aplica la lógica de decisión RCM formalizada en SAE JA1011. En primer lugar, se distingue entre fallas evidentes y funciones ocultas, confirmando en cada caso el tipo de consecuencia S/O/H/E. Posteriormente para las fallas evidentes se analiza si existe una característica potencial que haga posible un mantenimiento basado en condición (por ejemplo, tendencia de impedancia, parámetros de aceite, THDv o temperatura), si el comportamiento está dominado por la vida útil del componente o si sólo son viables tareas preventivas de carácter sistemático. Para las funciones ocultas, como el ATS o el bypass estático, se determina la pertinencia de tareas de failure-finding que permitan verificar periódicamente su disponibilidad o la necesidad de plantear rediseños cuando las pruebas no sean viables o suficientes frente al riesgo. De este recorrido se derivan para cada modo tareas concretas de tipo On-Condition, preventivas por edad, failure-finding, rediseño o cuando el riesgo residual es aceptable estrategias justificadas de “dejar fallar”.

Definidas las tareas, se establecen sus intervalos de ejecución combinando la información disponible sobre la ventana P-F, la vida útil de los componentes, las recomendaciones de los fabricantes y cuando existen los datos históricos propios del hospital. En los casos en que se dispone de una P-F claramente identificada, se adopta el criterio de intervalo $I \leq 0,5 \cdot (P-F)$ para las tareas basadas en condición, cuando el comportamiento está dominado por envejecimiento se fijan edades de sustitución que evitan operar en la zona de incremento

acelerado de la tasa de falla, para las funciones ocultas, los intervalos de failure-finding se ajustan a la frecuencia esperada de demanda y a la severidad de las consecuencias. En paralelo se diseña el esquema de monitoreo, definiendo para cada activo las variables críticas, el método de medición, los umbrales de alarma y crítico, la frecuencia y la evidencia documental requerida, de forma que el mantenimiento basado en condición sea efectivamente ejecutable y trazable.

Finalmente, las tareas resultantes del análisis RCM se integran en el sistema de gestión de mantenimiento (CMMS) mediante códigos que vinculan activo, componente, modo de falla y tipo de tarea, acompañados de sus frecuencias, duraciones e indicadores de cumplimiento. Se seleccionan indicadores de desempeño (KPIs) orientados a evaluar la disponibilidad del generador y de las UPS, el cumplimiento del mantenimiento preventivo y de las pruebas de failure-finding, el comportamiento de variables como THDv, tiempo de arranque y SoH de baterías y la evolución del RPN de los modos críticos. Esta integración se completa con una matriz de roles y responsabilidades (RACI) y con un plan de implementación en horizonte de doce meses, que ordena la carga inicial de tareas en el CMMS, la obtención de líneas base de condición, la puesta en marcha de las rutinas periódicas y la revisión periódica de resultados, asegurando que la lógica RCM se traduzca en prácticas de mantenimiento sostenibles y consistentes con la criticidad de los activos eléctricos del hospital.

Árboles de decisión RCM

En esta sección se presentan los diagramas de decisión que estructuran la lógica RCM aplicada.

Ilustración 1. Árbol A. Selección de modos de falla a analizar mediante RCM.

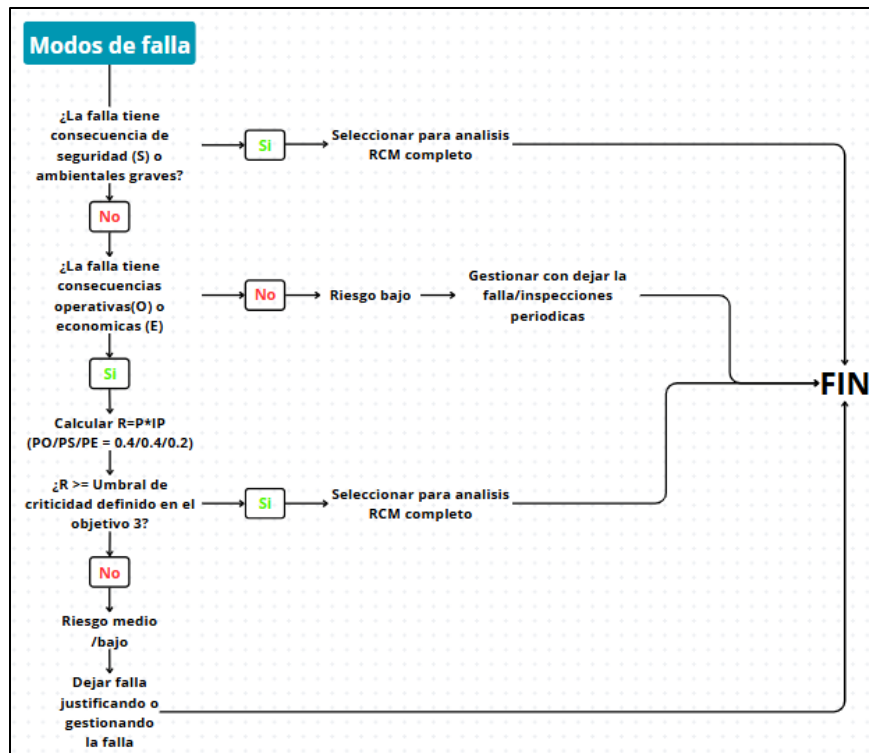


Ilustración 2. Árbol B. Clasificación de fallas evidentes y funciones ocultas (S/O/H/E).

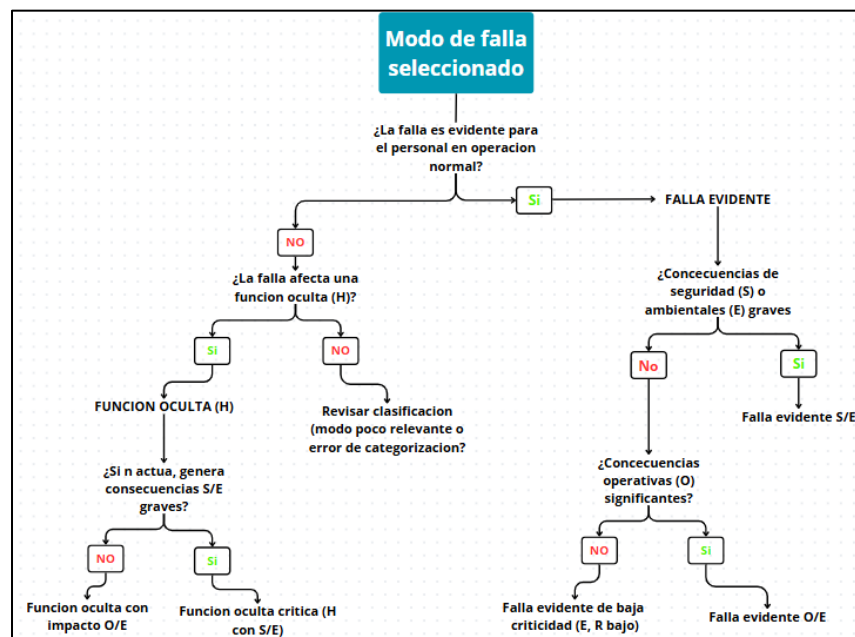


Ilustración 3. Árbol C. Selección de tareas para fallas evidentes.

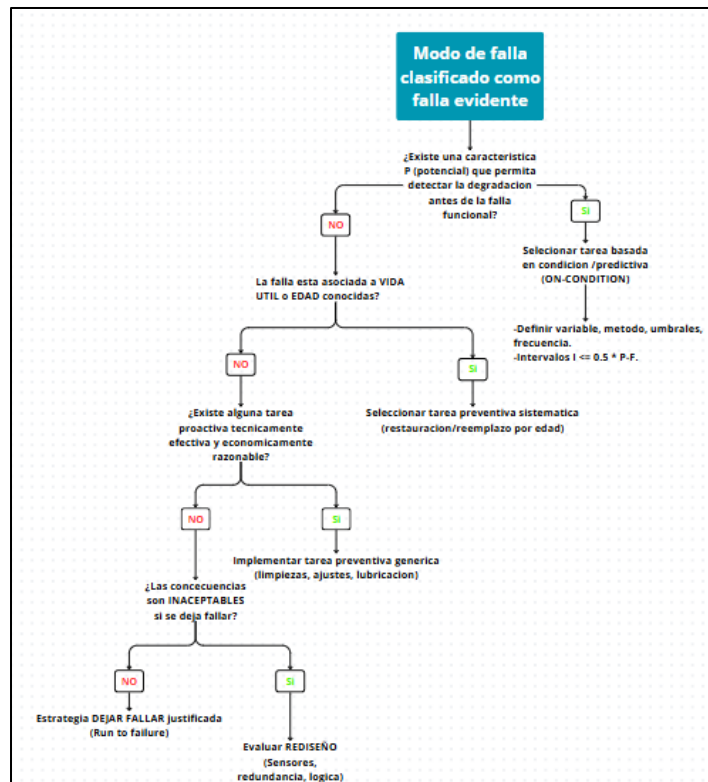


Ilustración 4. Árbol D. Selección de tareas para funciones ocultas (H).

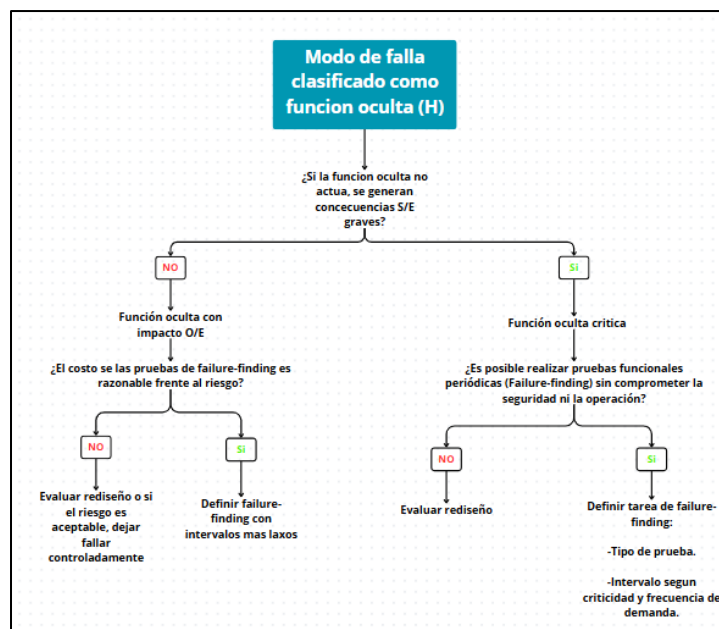


Ilustración 5. Árbol E. Definición de intervalos de tareas de mantenimiento RCM.

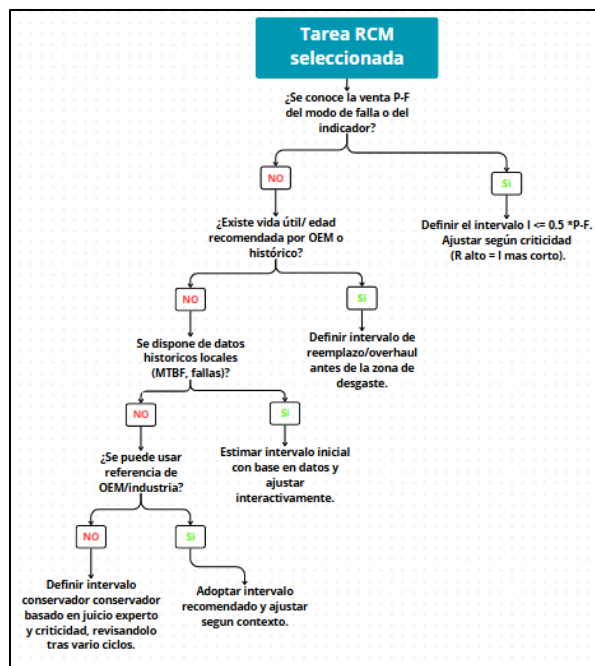


Ilustración 6. Árbol de decisión RCM aplicado al generador de 800 kVA.

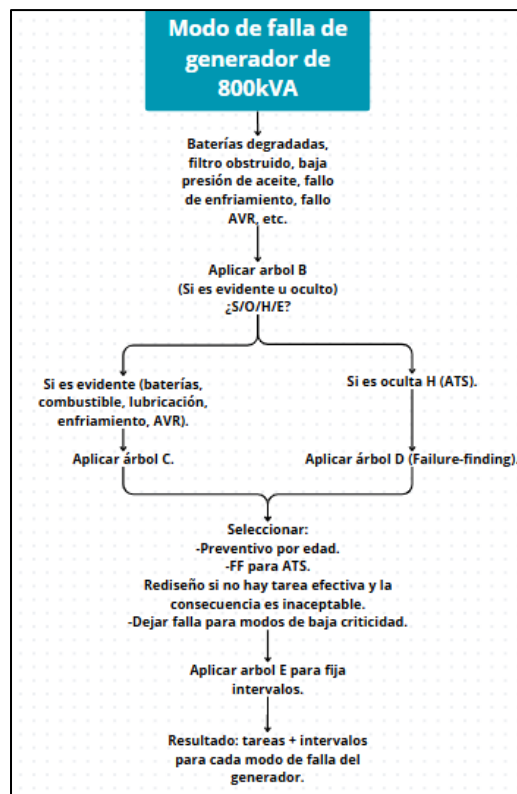
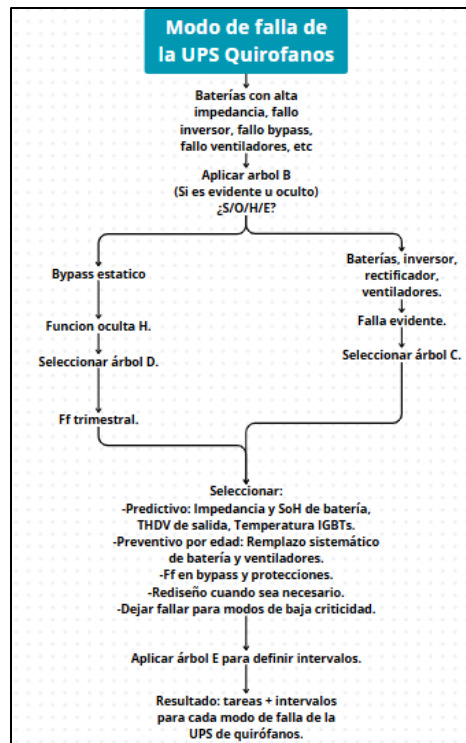


Ilustración 7. Árbol de decisión RCM aplicado a las UPS de quirófanos



Resultados por activo: Generador 800 kVA (450073 MP-760)

Tabla 10. Funciones y estándares de desempeño

Funciones y estándares de desempeño del generador 800 kVA (450073 MP-760)

Tipo	Declaración de función y criterios mensurables
Primaria	Asumir la carga crítica ante pérdida de red en ≤ 10 s; mantener tensión en banda $\pm 5\%$ y frecuencia $60\text{ Hz} \pm 1\text{ Hz}$; THDv $\leq 5\%$; autonomía ≥ 8 h con combustible conforme.
Secundarias	Protección por baja presión de aceite y sobret temperatura; registro de eventos (arranques y tiempos); operación y transferencia correcta con ATS; calidad de potencia adecuada para cargas clínicas.

Nota. La función primaria corresponde al desempeño esperado del activo ante pérdida de red; las funciones secundarias se relacionan con protección, registro y calidad de potencia.

Tabla 12.

Modos de falla, causas y evidencias del generador 800 kVA.

Componente	Modo de falla	Causas probables	Evidencias / señales	Consecuencia RCM (S/O/H/E)
Arranque (baterías, relés)	Baterías degradadas / sulfatadas	Fin de vida, temperatura, carga parasitaria	Conductancia/capacidad baja, arranque lento	S/O
Combustible	Filtro obstruido / aire en línea	Particulado/agua, PM tardío	ΔP , oscilación de RPM, humo	O/E
Lubricación	Baja presión de aceite	Bomba desgastada, fuga, aceite degradado	Alarma, aumento de temperatura, análisis de aceite	S/O
Enfriamiento	Fuga/obstrucción; correa/bomba dañada	Corrosión, aflojamiento, desgaste	Temperatura del refrigerante, fugas visibles	S/O

Alternador/AVR	Falla de AVR / excitación	Tarjeta dañada, conexiones deficientes	Tensión inestable, THDv elevado, disparos de protección	O
Interfaz ATS	No transfiere o fuera de tiempo	Lógica, contactores, ajuste inadecuado	Acta de prueba FAIL, tiempos fuera de especificación	H/S

Nota. S = Seguridad, O = Operación/Disponibilidad, H = Función oculta, E = Ambiental/Económica.

Tabla 11.

Decisiones RCM e intervalos para el generador 800 kVA.

Modo de falla	Tarea seleccionada	Intervalo	Justificación técnica
Baterías degradadas	On-Condition (conductancia/capacidad) + reemplazo por edad	Medición mensual; reemplazo a 36 meses	Ventana P-F observable con SoH; vida útil finita; impacto S/O elevado.
Filtro/aire en línea	On-Condition + restauración	Drenaje agua/sedimentos	ΔP y síntomas de combustión permiten

		mensuales; filtros cada 500 h o anual	intervención previa a falla; impacto operativo relevante.
Baja presión de aceite	On-Condition (análisis de aceite)	Trimestral o cada 250 h	Deriva detectable en parámetros de aceite (metales, viscosidad); riesgo de daño catastrófico (S/O).
Enfriamiento	On-Condition + restauración	Inspección mensual; termografía semestral; correas cada 24 meses	Temperaturas y fugas evidencian degradación; se mitiga riesgo térmico y de paro.
AVR/excitación	Inspección funcional + repuesto crítico	Verificación y THDv trimestral; stock AVR	Sin P-F robusta; se asegura continuidad con inspecciones periódicas y repuesto crítico disponible.

ATS (función oculta)	Failure-Finding (prueba de transferencia con carga)	Mensual (validado en sitio)	Función protectora oculta (H); sólo se evidencia en demanda; pruebas periódicas reducen el riesgo.
----------------------	---	-----------------------------	--

Nota. OC = On-Condition (mantenimiento basado en condición); FF = Failure-Finding.

Monitoreo y umbrales

Tabla 12.

Variables de monitoreo y umbrales para el generador 800 kVA.

Variable	Método	Umbral de alarma	Umbral crítico	Frecuencia	Evidencia
Tiempo de arranque [s]	Prueba con carga / ATS	≥ 8 s	≥ 10 s	Mensual	Acta de prueba
THDv salida [%]	Analizador de red	> 4 %	> 5 %	Trimestral	Reporte de calidad
Tensión / frecuencia (banda)	Analizador de red	Fuera ± 5 % / ± 1 Hz	Fuera ± 10 % / ± 2 Hz	Mensual	Registro de prueba

Presión de aceite	SCADA / alarma	Bajo mínimo OEM	Disparo	Mensual (en prueba)	Bitácora
Temperatura del refrigerante	Sensor / indicador	$\geq 95\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 105\text{ }^{\circ}\text{C}$	Mensual	Bitácora
Agua/sedimentos en diésel	Drenaje / inspección	Trazas presentes	Acumulación recurrente	Mensual	Checklist
Conductancia/capacidad baterías	Medición con instrumento	SoH < 85 %	SoH < 80 % o celda fuera	Mensual	Tendencia de SoH

Nota. SoH = *State of Health* del banco de baterías.

Resultados por activo: UPS de quirófanos (TITAN y Liebert NXR)

Tabla 13.

Funciones y estándares de desempeño de las UPS de quirófanos.

Tipo	Declaración de función y criterios mensurables
Primaria	Entregar energía ininterrumpida (0 ms de interrupción) a los quirófanos con 208/220/230 V $\pm 2\%$, 60 Hz, THDv $\leq 3\text{--}5\%$; autonomía ≥ 30 min al 100 % de la carga crítica.

Secundarias	Transferencia segura a bypass estático; generación de alarmas y registros de eventos; gestión térmica adecuada; autodiagnóstico y pruebas internas.
-------------	---

Nota. La función primaria corresponde al desempeño esperado del activo ante pérdida de red; las funciones secundarias se relacionan con protección, registro y calidad de potencia.

Tabla 14.

Fallas funcionales de las UPS de quirófanos.

Función	Falla funcional
Energía ininterrumpida	Interrupción del suministro o salida fuera de banda de tensión/frecuencia.
Respaldo (autonomía)	Autonomía insuficiente para mantener la carga crítica requerida.
Transferencia a bypass	Bypass estático no opera o lo hace fuera de especificación.

Nota. Las fallas funcionales se formulan como el incumplimiento total o parcial de la función especificada, en coherencia con la metodología RCM.

Tabla 15.*Modos de falla, causas y evidencias de las UPS de quirófanos.*

Componente	Modo de falla	Causas probables	Evidencias / señales	Consecuencia RCM (S/O/H/E)
Baterías	Pérdida de capacidad / celda abierta	Envejecimiento, temperatura, ciclos	Impedancia + , autonomía -	S/O/E
Rectificador	Diodos/puente degradado	Sobretensión, envejecimiento	Ripple DC +, alarmas del equipo	O/E
Inversor	Falla de IGBTs / control PWM	Sobrecarga, temperatura, polvo	Distorsión, sobre temperatura, disparos de protección	S/O
Bypass estático	No cierra/abre al demandarse	SCR/triacs dañados, fallo de control	Falla de transferencia a bypass	H/S-O
Ventilación	Falla de ventiladores	Desgaste de rodamientos,	Aumento de temperatura,	S/O/E

		acumulación de polvo	alarmas térmicas	
Control/tarjetas	Firmware/tarjeta dañada	Picos de tensión, humedad	Eventos espurios, reinicios, alarmas intermitentes	O

Nota. Las consecuencias RCM se codifican mediante las siglas S, O, H y E de acuerdo con las categorías de impacto definidas en la metodología aplicada.

Tabla 16.

Decisiones RCM e intervalos para las UPS de quirófanos.

Modo de falla	Tarea seleccionada	Intervalo	Justificación técnica
Baterías	On-Condition (impedancia + prueba de autonomía) + reemplazo por edad	Impedancia mensual; prueba anual; reemplazo a 36–48 meses (desde 2025-09)	P–F observable mediante Z/SoH y autonomía; consecuencia S/O relevante.
Bypass estático	Failure-Finding (prueba de	Trimestral	Función oculta crítica (H); sólo se evidencia en

(función oculta)	transferencia a bypass)		demanda; imprescindible verificación periódica.
Inversor (IGBT/PWM)	On-Condition + mantenimiento programado	Termografía/temperatura mensual; limpieza trimestral; mantenimiento OEM anual	Riesgo S/O; condición observable a través de temperatura y alarmas; se mitiga con limpieza y revisión.
Rectificador	On-Condition	Medición de ripple DC/diagnóstico semestral; limpieza trimestral	Variación del ripple DC indica degradación; tarea predictiva adecuada.
Ventiladores	On-Condition + reemplazo por edad	Verificación de RPM/ruido mensual; reemplazo a 36 meses	Desgaste mecánico; síntomas térmicos/acústicos; se combina condición con reemplazo sistemático.

Nota. Las tareas se seleccionan conforme a la metodología RCM, combinando mantenimiento basado en condición, pruebas de función oculta y reemplazos sistemáticos según criticidad y patrón de falla.

Tabla 17.

Variables de monitoreo y umbrales para las UPS de quirófanos.

Variable	Método	Umbral de alarma	Umbral crítico	Frecuencia	Evidencia
Impedancia por bloque [mΩ]	Impedancímetro	$+ \geq 20 \%$ sobre valor base	$+ \geq 30-50 \%$ o celda fuera	Mensual	Tendencia de Z
Autonomía [min]	Prueba de capacidad	$< 120 \%$ de la requerida	$< 100 \%$ de la requerida	Anual	Informe de prueba
THDv salida [%]	Analizador de red	$> 3 \%$	$> 5 \%$	Trimestral	Reporte de calidad
Temperatura IGBTs / disipador	Sensor / termografía	$\geq 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sostenido	$\geq 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ o disparo	Mensual	Registro de temperatura
Ripple DC bus [%] (UPS NXR)	Medición / diagnóstico	$> 1 \%$	$> 2 \%$	Semestral	Reporte de diagnóstico
Transferencia a bypass (H)	Prueba funcional	Fuera de especificación	Falla de transferencia	Trimestral	Acta PASS/FAIL

Nota. Los umbrales de alarma y críticos se establecen con base en criterios de desempeño aceptables para la operación de las UPS; (H) indica que se trata de una función oculta cuya falla solo se evidencia en condición de demanda. **Tabla 18.**

KPIs y metas de desempeño para el generador y las UPS.

KPI	Definición	Fórmula	Meta
Disponibilidad técnica GE	% de tiempo disponible del generador	$1 - (\text{Horas fuera serv GE} / \text{Horas totales})$	$\geq 99,5 \%$
Disponibilidad técnica UPS	% de tiempo disponible de las UPS	$1 - (\text{Horas fuera serv UPS} / \text{Horas totales})$	$\geq 99,9 \%$
% Cumplimiento PM	Mantenimiento preventivo cumplido	PM ejecutadas / PM programadas	$\geq 95 \%$
% Failure-Finding ATS/Bypass	Pruebas realizadas vs planificadas	FF realizadas / FF planificadas	100 %
RPN promedio (modos críticos)	RPN promedio de modos críticos	PROMEDIO (RPN filtrado)	-30 % vs línea base
Tiempo de arranque [s]	Promedio en pruebas	PROMEDIO (Tiempos arranque)	$\leq 7 \text{ s}$
THDv GE [%]	THDv en pruebas del generador	PROMEDIO (THDv_GE)	$\leq 4 \%$
SoH baterías UPS [%]	Estado de salud baterías UPS	PROMEDIO (SoH)	$\geq 90 \%$
% Pruebas de autonomía cumplidas	Pruebas con autonomía $\geq$ requerida	Cumplidas / Realizadas	100 %

Backlog PM (semanas)	Semanas de PM pendiente	Horas PM pendiente / Horas disponibles semana	≤ 2 semanas
-------------------------	----------------------------	--	------------------

Nota. GE = generador eléctrico; UPS = sistemas de alimentación ininterrumpida; PM = mantenimiento preventivo; FF = failure-finding; RPN = número de prioridad de riesgo; SoH = estado de salud de las baterías; THDv = distorsión armónica total de tensión.

Tabla 19.

Matriz RACI para actividades RCM

Actividad	R (responsable)	A (Aprobador)	C (Consultado)	I (Informado)
Prueba ATS con carga (mensual)	Operación / Mantenimiento	Jefe de mantenimiento	Proveedor GE	Seguridad del paciente / HSE
Prueba bypass UPS (trimestral)	Proveedor UPS / Mantenimiento	Ingeniería clínica/eléctrica	Usuarios de quirófanos	Calidad / HSE
Medición de impedancia de baterías	Proveedor UPS	Ingeniería clínica	Mantenimiento	Calidad
Análisis de aceite GE	Mantenimiento	Ingeniería	Laboratorio externo	HSE
Termografía GE/UPS	Ingeniería	Jefe de mantenimiento	Proveedor de termografía	HSE
Gestión de repuestos críticos	Compras / Almacén	Gerencia técnica	Ingeniería / proveedores	Finanzas
Reemplazo de bancos de baterías	Proveedor / área eléctrica	Compras / Ingeniería	Usuarios	Calidad
Reporte de KPIs (trimestral)	Ingeniería	Gerencia técnica	Operación / proveedores	Calidad / HSE

Nota. La matriz RACI define los roles por actividad: R = responsable de la ejecución; A = aprobador final; C = consultado durante la actividad; I = informado sobre los resultados. Si esta tabla no es la séptima en tu documento, ajusta el número de tabla según corresponda.

Tabla 20.

Ejemplo de tareas RCM codificadas para el CMMS.

Código	Actividad	Componente	Tarea	Tipo	Frecuencia	Duración [h]	Evidencia
GE- ATS- FF- MEN	4500 73 MP- 760	ATS / Interfaz	Prueba de transferencia con carga	Failure- Finding	Mensual	1,0	Acta + tiempo
GE- ARR- OC- MEN	4500 73 MP- 760	Arranque/bat erías	Conductancia/capa cidad + inspección de bornes	OC + Edad	Mensual / reemplazo a 36 meses	1,0	Tendencia SoH
GE- COM B- FILT-	4500 73 MP- 760	Combustible	Cambio de filtros diésel	Restauración	Cada 500 h o anual	1,5	OT cerrada

PRO G							
GE- LUB- ANA L- TRI M	4500 73 MP- 760	Lubricación	Muestreo y análisis de aceite	Predictiv o	Trimestr al o cada 250 h	0,5	Informe de laborato rio
GE- AVR- INS- TRI	4500 73 MP- 760	Alternador/A VR	Verificación de conexiones + THDv; revisión de stock AVR	Inspecció n	Trimestr al	1,0	Reporte
UPS- TIT- IMP- MEN	UPS TITA N	Baterías	Medición de impedancia por bloque	OC + Edad	Mensual / reempla zo 36– 48 meses	2,0	Tenden cia de Z
UPS- TIT- BYP-	UPS TITA N	Bypass estático	Prueba de transferencia a bypass	Failure- Finding	Trimestr al	1,0	Acta de prueba

FF- TRI							
UPS- NXR- INV- OC- MEN	UPS NXR	Inversor	Termografía/temp eratura del módulo	On- Conditio n	Mensual	0,5	Checkli st
UPS- NXR- VEN T- EDA D	UPS NXR	Ventilación	Reemplazo de ventiladores	Edad	Cada 36 meses	2,0	OT cerrada

Nota. OC = mantenimiento on-condition; FF = failure-finding; OT = orden de trabajo;

THDv = distorsión armónica total de tensión; SoH = estado de salud; ATS = interruptor de transferencia automática. Ajusta el número de tabla (Tabla 8) según la secuencia real de tu documento.

Resultados

La implementación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) sobre el generador de 800 kVA (450073 MP-760) y las UPS de quirófanos (TITAN y Liebert NXR) permitió traducir la criticidad definida en los objetivos previos en un esquema de mantenimiento proactivo, estructurado y trazable. En primera instancia se consolidaron

funciones y estándares de desempeño cuantificables para ambos activos (tiempo máximo de arranque, bandas de tensión y frecuencia, límites de THDv, autonomía mínima, tiempos de transferencia, entre otros), lo que facilitó definir de manera explícita qué se considera falla funcional en el contexto del sistema eléctrico esencial del hospital.

A partir del FMEA y de la matriz de criticidad basada en ISO 31010, se obtuvo un conjunto depurado de modos de falla relevantes por componente, clasificados en términos de consecuencias S, O, H y E y priorizados según el riesgo $R = P \cdot IP$. Sobre estos modos se aplicaron los árboles de decisión RCM, lo que dio como resultado la selección justificada de familias de tareas: mantenimiento basado en condición (medición de impedancia y SoH de baterías, análisis de aceite, termografía, monitoreo de THDv, temperaturas y ripple DC), mantenimiento preventivo por edad (baterías, ventiladores, correas y elementos con vida útil finita) y tareas de failure-finding para funciones ocultas como el ATS y el bypass estático de las UPS. En los pocos casos donde no existieron tareas proactivas eficaces y el riesgo residual se consideró aceptable, se documentó explícitamente la estrategia de dejar fallar.

Estos lineamientos se concretaron en un esquema de monitoreo con variables, métodos, umbrales y frecuencias definidos para cada activo, y en un conjunto de tareas codificadas en el CMMS, vinculando activo, componente, modo de falla y tipo de tarea, junto con sus evidencias requeridas. Adicionalmente, se establecieron indicadores de desempeño (disponibilidad de generador y UPS, cumplimiento de PM y pruebas de failure-finding, comportamiento de THDv, tiempos de arranque, SoH de baterías y reducción del RPN en modos críticos) y se esbozó un plan de implementación a doce meses con roles y responsabilidades claros. En conjunto, estos resultados muestran que el RCM ha dejado de ser un marco conceptual para convertirse en un plan operativo aplicable a los activos eléctricos críticos del Hospital Medicadiz.

Objetivo 5

Formular una propuesta de implementación del RCM adaptada al entorno hospitalario, orientada a optimizar la gestión del mantenimiento de los sistemas eléctricos críticos y de emergencia, incrementando su confiabilidad y reduciendo riesgos operativos.

Introducción

El quinto objetivo del trabajo se orienta a formulación de una propuesta de implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) adaptada al entorno hospitalario, con énfasis en los sistemas eléctricos críticos y de emergencia del Hospital de alta complejidad Medicadiz. A diferencia de los objetivos posteriores, centrados en la identificación, análisis y decisión técnica sobre las tareas de mantenimiento, este objetivo se focaliza en cómo llevar a la práctica, de manera ordenada y sostenible, la metodología construida, de forma que se traduzca en mejoras verificables en confiabilidad, disponibilidad y gestión del riesgo operativo.

En coherencia con el Nivel 5 – Sintetizar de la escala de Bloom y Gagné, este objetivo supone integrar los resultados parciales de los objetivos 1, 2, 3 y 4 en un esquema de implementación estructurado, que articule fases de despliegue (piloto), roles y competencias, necesidades de información, indicadores de desempeño e instrumentos de seguimiento. De este modo, el análisis técnico desarrollado previamente se transforma en una hoja de ruta operativa que permita al hospital adoptar el RCM no solo como ejercicio académico, sino como una práctica sistemática de gestión del mantenimiento.

La propuesta se enmarca en los lineamientos de normas como NFPA 99, ISO 31010, ISO 14224, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, y se focaliza inicialmente en los

activos eléctricos críticos priorizados en las fases anteriores, particularmente el generador de 800 kVA y las UPS que alimentan quirófanos y servicios asistenciales sensibles.

Metodología aplicada

La metodología aplicada para el desarrollo del Objetivo 5 se estructura en nueve pasos secuenciales, orientados a transformar los resultados de los objetivos anteriores en una propuesta concreta de implementación del RCM en el Hospital Medicadiz:

- Paso 1. Síntesis de los resultados de los objetivos 1 – 4.

Se revisan los productos obtenidos en las fases previas, identificación y priorización de activos eléctricos críticos (Objetivo 1), caracterización operativa y funcional (Objetivo 2), análisis de modos de falla y criticidad (Objetivo 3) y definición de tareas de mantenimiento bajo lógica RCM para el generador de 800 kVA y las UPS de quirófanos (Objetivo 4). A partir de estos insumos se elabora una síntesis narrativa que destaca los hallazgos clave que justifican la necesidad de implementar el RCM y que definen los activos prioritarios para iniciar el despliegue metodológico.

- Paso 2. Definición del alcance de la propuesta de implementación.

Se delimita el ámbito técnico y organizacional de la propuesta. En lo técnico, se establece que el foco inicial de implementación será el sistema eléctrico esencial y de emergencias, con énfasis en el generador de 800 kVA (activo 450073 MP-760) y las UPS que soportan quirófanos y servicios críticos (TITAN / Liebert NXR). En lo organizacional, se identifican las áreas involucradas (mantenimiento, infraestructura, servicios clínicos críticos, SST, calidad, gerencia) y se alinean los lineamientos con las normas de

referencia: NFPA 99, ISO 31010, ISO 14224, SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11.

- Paso 3. Diseño de la fase piloto de implementación del RCM.

Se estructura una fase piloto dirigida a validar en campo los planes de mantenimiento derivados del análisis RCM. En este paso se definen los objetivos específicos del piloto, las actividades a ejecutar (configuración de planes y órdenes de trabajo, capacitación, ejecución de tareas, registro de datos, seguimiento de indicadores), el horizonte temporal y los recursos requeridos (personal, tiempo, presupuesto, herramientas de monitoreo).

- Paso 4. Definición de roles, responsabilidades y competencias.

Se elabora una matriz de roles y responsabilidades (tipo RACI) que identifique los actores clave en la implementación y sostenimiento del RCM: gerencia, jefe de mantenimiento, ingeniero de confiabilidad/mantenimiento, técnicos eléctricos, jefes de servicios clínicos, áreas de calidad y SST. Para cada rol se describen las responsabilidades principales y las competencias técnicas requeridas (conocimientos normativos, habilidades en análisis de fallas, uso del CMMS, seguridad eléctrica), proponiendo además un plan de formación gradual.

- Paso 5. Identificación de necesidades de información y soporte tecnológico.

Se determinan los requerimientos de información mínimos para que la metodología de RCM pueda operar de forma efectiva. Esto incluye la definición de los datos que deben registrarse en el sistema de gestión de mantenimiento (CMMS o herramientas existentes), así como los formatos de órdenes de trabajo y los campos obligatorios (tipo de tarea, modo de falla, causa raíz, tiempos, repuestos). Adicionalmente, se valoran requerimientos

de soporte tecnológico como integración con sistemas de monitoreo y BMS para generadores y UPS.

- Paso 6. Definición de indicadores de desempeño (KPIs).

Se selecciona un conjunto de indicadores clave de desempeño orientados a evaluar el impacto de la implementación del RCM sobre la confiabilidad, la disponibilidad y la eficacia del mantenimiento. Entre ellos se consideran: MTBF, MTTR, disponibilidad operacional, porcentaje de cumplimiento del mantenimiento planificado, porcentaje de fallas repetitivas y proporción de órdenes de trabajo con causa raíz identificada. Para cada indicador se definen la fórmula, la fuente de datos, la frecuencia de cálculo, el responsable y metas de referencia.

- Paso 7. Formulación de lineamientos operativos y de sostenibilidad.

Se establecen reglas y criterios para asegurar que el RCM se convierta en un proceso continuo y no en una iniciativa aislada. Esto incluye la periodicidad de revisión de los análisis RCM, la integración de los planes derivados en el plan maestro de mantenimiento, la formalización de procedimientos e instrucciones de trabajo, y la articulación con otros sistemas de gestión institucional (calidad, seguridad del paciente, gestión de activos).

- Paso 8. Consideración de la gestión del cambio y de los riesgos de implementación.

Se identifican las principales barreras para la adopción del RCM (resistencia del personal, limitaciones de recursos, carga de trabajo, dependencia de proveedores externos) y se construye una matriz de riesgos específica para la fase de implementación. Se plantean medidas de gestión del cambio organizacional (comunicación, capacitación, acompañamiento, reconocimiento) y acciones de mitigación de riesgos.

- Paso 9. Elaboración de la síntesis final del objetivo 5.

Finalmente, se integra la propuesta en un apartado de cierre que explica cómo la hoja de ruta de implementación formulada articula los resultados técnicos previos y se proyecta como un modelo replicable en otros sistemas del hospital. Esta síntesis permite enlazar el objetivo 5 con las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo de profundización.

Desarrollo de la propuesta de implementación del RCM

La propuesta de implementación del RCM se limita inicialmente a los sistemas eléctricos críticos y de emergencia del Hospital MedicaDiz, entendidos como aquellos que garantizan la continuidad de la atención clínica y la seguridad del paciente ante fallas de la red eléctrica comercial. En esta primera etapa el alcance técnico se focaliza en dos grupos de activos priorizados en los objetivos anteriores: el generador diésel de 800 kVA (activo 450073 MP-760) y las UPS que alimentan quirófanos y servicios asistenciales sensibles (equipos TITAN y Liebert NXR).

Este alcance responde a criterios de criticidad definidos con base en ISO 31010, considerando la probabilidad de falla, el impacto operativo, el impacto en la seguridad del paciente y el impacto económico. Estos activos constituyen nodos centrales de la red eléctrica esencial, de modo que cualquier mejora en su confiabilidad y mantenibilidad tiene un efecto directo en la continuidad del servicio clínico.

En el plano organizacional, la implementación del RCM compromete a las áreas de mantenimiento e infraestructura, a los jefes de servicios clínicos críticos, a las dependencias de calidad y seguridad y a la alta dirección, en tanto se requiere su aval para asignación de recursos

y adopción de políticas. La propuesta se rige por los principios de: (I) priorización basada en riesgo, (II) alineamiento normativo con NFPA 99, ISO 14224 y SAE JA1011, (III) enfoque incremental (piloto y expansión) y (IV) mejora continua, utilizando indicadores y retroalimentación sistemática para ajustar los planes de mantenimiento.

Diseño de la fase piloto de implementación del RCM

La fase piloto constituye el primer despliegue práctico de la metodología de RCM en el Hospital MedicaDiz y tiene como propósito validar su pertinencia técnica y operativa, así como generar evidencia cuantitativa de su impacto sobre la confiabilidad y la gestión del riesgo. Esta fase se enfoca exclusivamente en el generador de 800 kVA y las UPS de quirófanos.

Los objetivos específicos de la fase piloto incluyen:

- Implementar en el CMMS (o herramientas disponibles) los planes de mantenimiento derivados del análisis RCM para el generador y las UPS.
- Ejecutar de forma sistemática las tareas definidas (preventivas, predictivas, on-condition, de búsqueda de fallas ocultas, de pruebas de transferencia y bypass, etc.).
- Mejorar la calidad y completitud del registro de información de fallas y actividades de mantenimiento.
- Calcular indicadores de desempeño (MTBF, MTTR, disponibilidad, cumplimiento de mantenimiento planificado) antes y durante el piloto, para evaluar cambios.
- Identificar ajustes necesarios en frecuencias, tareas, recursos y formatos documentales.

De manera referencial, la fase piloto puede estructurarse en etapas como las siguientes:

Tabla 21.

Etapas de implementación del plan RCM en generador y UPS

Etapas	Actividad principal	Periodo tentativo	Responsable principal
1	Parametrización de planes RCM en el CMMS / plan maestro	Mes 1	Jefe de mantenimiento / ingeniero de confiabilidad
2	Diseño y ajuste de formatos de órdenes de trabajo y Checklists específicos	Mes 1–2	Ingeniero de mantenimiento
3	Capacitación del personal técnico y supervisores en RCM y nuevos procedimientos	Mes 2	Jefe de mantenimiento / SST
4	Ejecución sistemática de tareas RCM en generador y UPS	Mes 3–8 (ejemplo)	Técnicos eléctricos
5	Seguimiento mensual de indicadores y revisión de registros	Mes 3–8	Ingeniero de confiabilidad / calidad
6	Evaluación de resultados y ajuste de planes	Mes 9–10	Comité de mantenimiento / gerencia

Nota. El cronograma es tentativo y deberá ajustarse según la disponibilidad operativa del hospital, las ventanas de intervención y la madurez del equipo en la metodología RCM.

La duración exacta de la fase piloto dependerá de las condiciones reales del hospital, no obstante se sugiere un horizonte mínimo de 6 meses para captar suficiente información operacional y de fallas.

Roles, responsabilidades y competencias

La implementación efectiva del RCM exige una distribución clara de responsabilidades y la definición de las competencias mínimas de cada actor. A modo de referencia, se propone la siguiente estructura:

Tabla 22.

Roles y responsabilidades en la implementación del RCM

Rol	Responsabilidades principales
Gerencia / Dirección	Aprobar la política de RCM, asignar recursos, revisar indicadores estratégicos, avalar la hoja de ruta de expansión.
Jefe de mantenimiento / infraestructura	Liderar la implementación del RCM, coordinar el equipo técnico, asegurar el cumplimiento de planes, reportar resultados a la gerencia.
Ingeniero de confiabilidad / mantenimiento	Mantener y actualizar los análisis RCM, procesar datos de fallas, calcular indicadores, proponer mejoras a los planes.
Técnicos de mantenimiento eléctrico	Ejecutar las tareas de mantenimiento, reportar condiciones anómalas, registrar información completa y veraz en las órdenes de trabajo.
Jefes de servicios clínicos críticos	Coordinar ventanas de intervención, reportar incidentes relacionados con fallas eléctricas, retroalimentar sobre impactos en la operación clínica.
Calidad / SST	Integrar el RCM con los sistemas de gestión de calidad y seguridad, hacer seguimiento a incidentes, apoyar en auditorías y en capacitación.

Nota. La tabla resume los roles clave involucrados en la implementación y sostenimiento del RCM, diferenciando responsabilidades estratégicas, tácticas y operativas. Ajusta el número de tabla según la secuencia real de tu documento.

Necesidades de información y soporte tecnológico

Para asegurar la trazabilidad y eficiencia del RCM, es imprescindible que el hospital cuente con un sistema de información de mantenimiento que registre de manera estructurada la información relevante de activos, fallas y tareas. Como mínimo se requiere:

- Información de activos, alineada con ISO 14224: Código del activo, ubicación, fabricante, modelo, año de instalación, potencia, función principal, criticidad, etc.
- Información de mantenimiento: Tipo de tarea (preventiva, correctiva, predictiva, on-condition, búsqueda de fallas ocultas), fecha de ejecución, técnico responsable, horas-hombre empleadas, repuestos utilizados, hallazgos durante la intervención.
- Información de fallas: Fecha y hora de ocurrencia, síntoma, modo de falla asociado (según FMEA), causa raíz identificada (cuando aplique), tiempo de parada, impacto sobre el servicio clínico.
- Información de operación: Horas de operación del generador, número de arranques, eventos de transferencia, alarmas en UPS, parámetros eléctricos relevantes (tensión, frecuencia, THD, temperatura de baterías, etc.), según la instrumentación disponible.

En cuanto al soporte tecnológico, se recomienda:

- Utilizar un CMMS (o, en su defecto, hojas de cálculo estructuradas) con campos normalizados y obligatorios para capturar los datos anteriores.
- Diseñar formatos de órdenes de trabajo que incluyan la referencia al modo de falla y a la tarea RCM específica ejecutada.

- Aprovechar, cuando exista, la integración con sistemas de monitoreo y BMS para obtener datos de operación en tiempo real o histórico de generadores y UPS.

Indicadores de desempeño propuestos

Los indicadores de desempeño permiten evaluar si la implementación del RCM está logrando los objetivos planteados. A continuación, se presentan algunos KPIs sugeridos:

Tabla 23.

Indicadores de gestión para el seguimiento del RCM

Indicador	Definición	Fórmula (referencial)	Frecuencia	Responsable	Comentario
MTBF (Mean Time Between Failures)	Tiempo medio entre fallas de un activo o sistema	MTBF = Horas de operación / Número de fallas en el periodo	Trimestral / Semestral	Ingeniero de confiabilidad	Permite evaluar cambios en confiabilidad del generador y UPS.
MTTR (Mean Time To Repair)	Tiempo medio de reparación por falla	MTTR = Σ tiempos de reparación / Número de fallas	Trimestral / Semestral	Jefe de mantenimiento	Mide capacidad de respuesta del equipo de mantenimiento.
Disponibilidad operacional	Proporción de tiempo en que el activo está disponible para cumplir su función	Disponibilidad = $d = \text{Tiempo disponible} / \text{Tiempo total}$	Trimestral / Anual	Ingeniero de confiabilidad / gerencia	Indicador clave para sistemas eléctricos críticos.

Cumplimiento de mantenimiento o planificado (PM)	Porcentaje de tareas planificadas o ejecutadas en el periodo	$\% \text{ PM} = (\text{OT planificadas} / \text{ejecutadas} / \text{OT planificadas totales}) \times 100$	Mensual	Jefe de mantenimiento o	Refleja disciplina de ejecución de los planes RCM.
% de fallas repetitivas	Proporción de fallas que se repiten en el mismo modo	$\% = (\text{Fallas repetitivas} / \text{Fallas totales}) \times 100$	Trimestral	Ingeniero de confiabilidad	Indica la necesidad de revisar planes o rediseñar.
% de OT con causa raíz identificada	Órdenes de trabajo donde se registra la causa raíz	$\% = (\text{OT con causa raíz} / \text{OT por falla}) \times 100$	Trimestral	Calidad / mantenimiento o	Refuerza la cultura de análisis de fallas.

Nota. MTBF = tiempo medio entre fallas; MTTR = tiempo medio de reparación; PM = mantenimiento preventivo; OT = órdenes de trabajo. Ajusta el número de tabla según la secuencia real en tu documento.

La definición detallada de metas cuantitativas para cada indicador dependerá del estado actual de los activos y de la política de riesgo aceptable de la institución. No obstante, se sugiere

que, al menos, se establezcan metas de mejora progresiva a partir de los valores de línea base obtenidos en el diagnóstico inicial.

Lineamientos operativos y de sostenibilidad del RCM

Para garantizar la sostenibilidad del RCM, la propuesta plantea los siguientes lineamientos operativos:

- Integración en el plan maestro de mantenimiento: Los planes RCM para generadores y UPS deben incorporarse formalmente en el plan anual del servicio de mantenimiento, con responsables, frecuencias y recursos asignados.
- Revisión periódica de los análisis RCM: Se recomienda una revisión formal al menos anual, o después de la ocurrencia de eventos críticos, para actualizar modos de falla, frecuencias de tareas y decisiones de rediseño.
- Formalización documental: Elaboración de procedimientos, instructivos y formatos que describan la metodología RCM adoptada, las tareas específicas y los criterios de aceptación/rechazo durante las actividades de mantenimiento.
- Articulación con sistemas de gestión: Vincular el RCM con los procesos de calidad, seguridad del paciente y gestión de riesgos institucionales, de forma que los hallazgos de mantenimiento alimenten el sistema de reporte de incidentes y viceversa.
- Auditorías internas de mantenimiento: Programación de auditorías orientadas a verificar el cumplimiento de tareas RCM, la adecuada documentación en las órdenes de trabajo y la integridad de los datos utilizados para calcular indicadores.

Estos lineamientos buscan consolidar el RCM como un componente estable de la gestión del mantenimiento, más allá de la vigencia del proyecto de profundización.

Resultados

Del desarrollo del Objetivo 5 se obtuvo una propuesta estructurada de implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para los sistemas eléctricos críticos y de emergencia del Hospital Medicadiz, articulada en fases, roles, requerimientos de información e indicadores de seguimiento. Esta propuesta se construyó integrando los productos de los objetivos 1 a 4 y adaptándolos al contexto organizacional y operativo del hospital.

En primer lugar, se definió un alcance de implementación que prioriza, en una fase piloto, el generador diésel de 800 kVA (activo 450073 MP-760) y las UPS que alimentan quirófanos y servicios clínicos sensibles, estableciendo para estos activos los planes de mantenimiento derivados del análisis RCM y su parametrización en el sistema de gestión de mantenimiento. Como resultado, se configuró una hoja de ruta de despliegue que incluye la fase piloto y una fase de expansión progresiva hacia otros generadores, UPS de UCI/UCE/hemodinamia y sistemas de transferencia ATS, ordenados según criterios de criticidad y disponibilidad de recursos.

En segundo lugar, se obtuvo una estructura organizacional de soporte al RCM, expresada en una matriz de roles y responsabilidades que asigna funciones específicas a la gerencia, jefatura de mantenimiento, ingeniería de confiabilidad, técnicos eléctricos, jefes de servicios clínicos y áreas de calidad y SST. Asociado a ello, se definieron las competencias técnicas mínimas requeridas y un esquema básico de formación para el personal involucrado.

En tercer lugar, se identificaron y documentaron las necesidades de información y soporte tecnológico para operar el RCM, especificando los datos mínimos de activos, fallas, mantenimiento y operación que deben registrarse en el CMMS o en las herramientas disponibles, así como los ajustes requeridos en formatos de órdenes de trabajo para vincular las tareas ejecutadas con los modos de falla y decisiones RCM.

Finalmente, se estableció un conjunto de indicadores de desempeño (MTBF, MTTR, disponibilidad, cumplimiento del mantenimiento planificado, porcentaje de fallas repetitivas y porcentaje de órdenes de trabajo con causa raíz identificada) con sus definiciones, fórmulas y responsables, junto con lineamientos operativos y de sostenibilidad (revisión periódica de los análisis RCM, integración al plan maestro de mantenimiento, auditorías internas) y una matriz de riesgos de implementación con medidas de gestión del cambio asociadas. Estos resultados conforman un paquete técnico-operativo que permite al Hospital Medicadiz disponer de una guía clara para poner en marcha y mantener en el tiempo la metodología de RCM en sus sistemas eléctricos críticos.

Plan de implementación a 12 meses, recursos y riesgos

El plan de implementación del RCM se estructura en un horizonte de 12 meses, organizado en cinco fases secuenciales que integran el diseño de tareas en el CMMS, la ejecución piloto, la revisión de indicadores, las auditorías de cumplimiento y la evaluación integral de resultados. Este despliegue progresivo busca institucionalizar el RCM en el generador de 800 kVA y las UPS de quirófanos del Hospital Medicadiz, articulando recursos técnicos, humanos y de gestión, y controlando los principales riesgos operativos para garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

- Meses 1–2
 - Carga de tareas RCM al CMMS (códigos, frecuencias, duraciones).
 - Definición y validación de formatos de actas de prueba (ATS, bypass, THDv, SoH).
 - Medición de línea base de impedancia/SoH de baterías, THDv y tiempos de arranque del generador.
 - *Riesgo clave*: disponibilidad limitada de ventanas para pruebas iniciales.
 - *Mitigación*: coordinar con quirófanos y UCI para programar pruebas en horarios de baja demanda.
- Meses 3–4
 - Ejecución rutinaria de pruebas ATS mensuales y pruebas de bypass trimestrales.
 - Mediciones mensuales de impedancia de baterías.
 - Termografía y limpieza conforme a la frecuencia definida.
 - Gestión de compras y establecimiento de stock mínimo de repuestos críticos (AVR, ventiladores, baterías).
 - *Riesgo*: retrasos en la entrega de repuestos.
 - *Mitigación*: acuerdos con proveedores y definición de inventario mínimo.
- Meses 5–6
 - Primera revisión trimestral de KPIs (disponibilidad, %PM, SoH, THDv, backlog).

- Ajuste de umbrales e intervalos con base en los datos reales.
- Cierre de acciones del FMEA asociadas a modos de alta criticidad.
- *Riesgo*: ajustes de intervalos no reflejados en el CMMS ni comunicados a operación.
 - *Mitigación*: validar cambios en comité de mantenimiento y actualizar procedimientos y CMMS.
- Meses 7–9
 - Auditoría interna de cumplimiento de mantenimiento preventivo y de tareas de failure-finding.
 - Evaluación del backlog de PM y de la capacidad de recursos.
 - Actualización de listas de repuestos críticos.
 - *Riesgo*: incumplimiento de PM por sobrecarga operativa.
 - *Mitigación*: priorización de tareas críticas y ajuste de recursos/turnos si es necesario.
- Meses 10–12
 - Ejecución de pruebas de autonomía anual de UPS.
 - Evaluación del cumplimiento de metas (reducción de RPN en modos críticos, disponibilidad, %PM, THDv, SoH).
 - Consolidación de lecciones aprendidas y actualización de planes RCM y de las frecuencias de tarea.

- *Riesgo*: metas no alcanzadas en el primer ciclo.
 - *Mitigación*: definición de acciones correctivas (potenciales rediseños, ajustes de frecuencias, capacitación adicional).

Objetivo 6

Presentar los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología y las principales conclusiones sobre su impacto en la confiabilidad, disponibilidad y resiliencia de la infraestructura hospitalaria.

Síntesis de los resultados obtenidos en el estudio

Las actividades realizadas lograron cumplir con el propósito central del trabajo: elaborar una propuesta de aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ajustada al contexto hospitalario, con el fin de mejorar la gestión del mantenimiento de los sistemas eléctricos vitales y de emergencia del Hospital Medicadiz, un centro de alta complejidad.

Gracias al análisis detallado del generador de 800 kVA y de las UPS de los quirófanos, se consiguió evolucionar desde una práctica de mantenimiento principalmente correctiva y sustentada en la experiencia del personal, hacia un enfoque sistemático fundamentado en la criticidad, las funciones específicas de cada equipo y las posibles consecuencias de sus fallas. Esto permitió estructurar una propuesta metodológica y técnica con el potencial de ser ejecutada en la operación diaria del hospital.

Evaluación del grado de cumplimiento de los objetivos específicos

La fase final del proyecto destaca por su rigor, ya que no solo expone los productos obtenidos, sino que también examina su coherencia con los objetivos establecidos desde el inicio.

-Objetivo específico 1 – Identificación de activos críticos (ISO 31010)

Este objetivo se cumplió mediante la aplicación de una matriz de criticidad basada en la norma ISO 31010. Esta matriz combinó la probabilidad de ocurrencia de fallas con un impacto ponderado que consideró aspectos operativos, de seguridad y económicos. Este proceso permitió:

- Fundamentar con criterios cuantitativos la selección del generador de 800 kVA y las UPS de quirófanos como los activos de mayor prioridad.
- Distinguir claramente entre equipos cuyo nivel de riesgo resultaba inaceptable (según un umbral predefinido) y aquellos cuyo manejo podía diferirse o abordarse con estrategias menos exigentes.

Este logro es fundamental, ya que alinea la priorización de los equipos con una evaluación explícita del riesgo, dejando atrás decisiones basadas únicamente en percepciones subjetivas o en presiones operativas inmediatas.

-Objetivo específico 2 – Caracterización operativa y funcional (ISO 14224)

Se alcanzó a través de la descripción del contexto operativo, las funciones principales y secundarias, así como los requerimientos funcionales de los activos seleccionados, apoyándose en la taxonomía de la norma ISO 14224. Este ejercicio posibilitó:

- Convertir exigencias clínicas concretas (como la no interrupción en quirófanos, los límites de tiempo de transferencia o la calidad de la tensión) en requerimientos funcionales técnicos precisos.
- Identificar vacíos importantes en la información disponible (como historiales incompletos, registros dispersos o datos no normalizados) que actualmente limitan el análisis a largo plazo y la estimación fiable de indicadores de confiabilidad.

Este resultado muestra que el proyecto no se limitó a aplicar la norma, sino que además puso en

evidencia deficiencias en la gestión de datos que el hospital debe superar para consolidar una verdadera cultura de la confiabilidad.

-Objetivo específico 3 – Identificación de modos de falla y evaluación de criticidad (FMEA/FMECA)

Se cumplió con la elaboración de matrices FMEA/FMECA, las cuales permitieron clasificar las fallas funcionales, los modos de falla y su nivel de criticidad. El valor añadido de esta etapa fue:

- Hacer visibles modos de falla que, sin provocar necesariamente una parada total del equipo, afectan negativamente la calidad de la energía (por ejemplo, mediante distorsión armónica o variaciones de tensión) o reducen la autonomía de respaldo de las UPS, factores directamente vinculados con la seguridad clínica.
- Establecer prioridades entre los modos de falla, dirigiendo los recursos hacia aquellos con un Número de Prioridad de Riesgo (RPN) más alto o con un impacto mayor en la seguridad.

De este modo, la gestión del mantenimiento deja de centrarse únicamente en que "el equipo encienda" para analizar también "cómo funciona", "con qué calidad" y "por cuánto tiempo" puede sostener la operación crítica.

-Objetivo específico 4 – Formulación de tareas de mantenimiento basadas en RCM (SAE JA1011, MIL-STD-2173, UNE 200001-3-11)

Este objetivo se logró aplicando la lógica de decisión propia del RCM a los modos de falla previamente priorizados. Como resultado, se generaron planes de mantenimiento que:

- Integran de manera balanceada tareas basadas en condición (como la medición de impedancia en baterías, pruebas de los ATS o verificación de la distorsión armónica) con reemplazos programados, actividades de búsqueda de fallas en funciones ocultas y, en casos justificados, estrategias controladas de operar hasta la falla.

- Se alinean directamente con las consecuencias potenciales de cada falla, es decir, con el posible daño a pacientes, la afectación operativa y los costos asociados.

El principal aporte aquí radica en que las tareas de mantenimiento dejan de definirse de manera genérica ("realizar mantenimiento preventivo cada X meses") para ser justificadas técnicamente, con sustento en normas y en un análisis explícito de riesgos.

-Objetivo específico 5 – Propuesta para la implementación del RCM

Se considera cumplido al estructurar una propuesta de despliegue por fases (una piloto y otra de expansión), que incluye la definición de:

- Roles y competencias mínimas necesarias (como un ingeniero de confiabilidad, técnicos eléctricos especializados y coordinación con el personal clínico).
- Requerimientos específicos de información (uso efectivo del Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado -CMMS-, estandarización de formatos y captura sistemática de datos de fallas).
- Indicadores clave de desempeño (como el Tiempo Medio Entre Fallas -MTBF-, el Tiempo Medio de Reparación -MTTR-, la disponibilidad y el porcentaje de cumplimiento del mantenimiento planificado).

El modelo planteado es viable y adaptable al contexto del hospital, aunque su éxito depende críticamente de tres factores: la mejora en la calidad de los datos, un compromiso institucional sostenido y el fortalecimiento de las capacidades del personal en temas de confiabilidad y gestión de riesgos.

Impacto anticipado del modelo RCM en la confiabilidad, disponibilidad y resiliencia

Si bien el alcance temporal de este estudio no permite observar aún cambios consolidados en indicadores históricos como el MTBF o la disponibilidad global, los resultados obtenidos

permiten prever un impacto positivo en la confiabilidad, la disponibilidad y la resiliencia de la infraestructura eléctrica esencial del hospital.

En cuanto a la confiabilidad, la identificación de los modos de falla más críticos y la incorporación de tareas basadas en condición para componentes como baterías, sistemas de transferencia automática y electrónica de control, incrementan la capacidad para detectar procesos de degradación antes de que se materialicen en fallas funcionales. Esto reduce la probabilidad de eventos inesperados en los servicios más sensibles.

Respecto a la disponibilidad, la organización de las actividades de mantenimiento según la criticidad de los equipos y la coordinación de las ventanas de intervención con los horarios de quirófanos y unidades de cuidado intensivo, contribuye a disminuir las paradas no planificadas y a reducir los tiempos de reparación (MTTR) de aquellas fallas que no se pueden evitar por completo. Así, el modelo RCM propuesto favorece una mayor disponibilidad operacional del generador de 800 kVA y de las UPS de quirófanos, al lograr un equilibrio más eficiente entre las necesidades de la operación clínica y los requerimientos del mantenimiento.

Finalmente, la resiliencia de la infraestructura se ve fortalecida al sistematizar pruebas de transferencia, verificar rutas de *bypass*, asegurar las capacidades de respaldo y definir criterios claros de priorización ante contingencias eléctricas. Esto mejora la capacidad del hospital para absorber perturbaciones y gestionar eventos de falla sin comprometer la continuidad y la seguridad de la atención al paciente.

Recomendaciones y conclusiones generales

A partir de los hallazgos del estudio, se formula un conjunto de recomendaciones para el hospital:

Se recomienda fortalecer el uso del Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado (CMMS), incorporando campos específicos para registrar los modos de falla, los tiempos de intervención, las causas raíz y las consecuencias operativas. Esto permitiría consolidar una base de datos alineada con la estructura de la norma ISO 14224.

Se sugiere ampliar de manera progresiva la aplicación de la metodología RCM a otros sistemas hospitalarios críticos, como la climatización en áreas sensibles, las redes de gases medicinales, la infraestructura de Tecnologías de la Información y los equipos biomédicos de soporte vital, adaptando el análisis a las particularidades de cada tipo de activo.

Resulta conveniente integrar el enfoque RCM dentro de un marco más amplio de gestión de activos, por ejemplo, en coherencia con la norma ISO 55001. Paralelamente, se deben desarrollar programas de formación continua en confiabilidad y análisis de riesgos para el personal técnico y de gestión.

Adicionalmente, se propone formalizar criterios de riesgo aceptable, umbrales de desempeño específicos y protocolos de respuesta ante fallas eléctricas, con el fin de garantizar que las decisiones tomadas sean consistentes, transparentes y basadas en criterios técnicos.

En términos generales, esta fase final permitió consolidar los resultados del estudio, evaluar la coherencia de la metodología propuesta con los objetivos definidos inicialmente y formular recomendaciones prácticas orientadas a la mejora continua. El trabajo demuestra que la aplicación del RCM a los sistemas eléctricos críticos del Hospital Medicadiz es técnicamente viable, se alinea con normativas internacionales y tiene el potencial de ser efectiva para incrementar la confiabilidad, la disponibilidad y la resiliencia de su infraestructura eléctrica esencial. De esta manera, el proyecto cumple con las exigencias propias de un trabajo de profundización de maestría, al articular un marco normativo sólido con herramientas de análisis

cuantitativo y una propuesta de implementación aplicable a un caso real de alta relevancia clínica, proporcionando al hospital una hoja de ruta concreta para fortalecer su gestión del mantenimiento y la seguridad eléctrica.

Descripción del proceso para alcanzar los objetivos del proyecto

El cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos se logró mediante un desarrollo metodológico secuencial e interconectado, fundamentado en normas internacionales (NFPA 99, ISO 31010, ISO 14224, SAE JA1011, MIL-STD-2173, UNE 200001-3-11) y ajustado a la realidad operativa del Hospital de alta complejidad Medicadiz.

A continuación, se expone de forma organizada el camino seguido para el logro de cada objetivo.

Enfoque metodológico general para el cumplimiento de los objetivos

Sustento normativo y conceptual:

Se estableció un marco de trabajo fundamentado en normas técnicas y bibliografía especializada en mantenimiento hospitalario y RCM. Este marco guió las decisiones metodológicas a lo largo de todas las etapas del proyecto.

Desarrollo progresivo por fases:

Los objetivos se dispusieron en una secuencia lógica y progresiva: primero la identificación de los activos críticos, seguida de su caracterización técnica y funcional, luego el análisis de sus posibles fallas y riesgos, la aplicación concreta de la metodología RCM, la formulación de un plan de implementación y, finalmente, la integración de resultados y conclusiones.

Conexión entre objetivos:

Cada objetivo se construyó sobre la base de los productos obtenidos en el anterior (inventario →

caracterización → modos de falla → tareas RCM → plan de implementación → evaluación de impacto). Esto aseguró una coherencia interna y permitió trazar claramente la evolución del trabajo.

Cumplimiento del Objetivo 1

“Determinar los activos eléctricos críticos y de emergencia... aplicando los criterios de la norma ISO 31010.”

Estrategia empleada:

Se realizó un levantamiento exhaustivo del inventario de la red eléctrica esencial y de emergencia, incluyendo generadores, UPS, ATS, tableros de distribución y las cargas asociadas a ellos.

Se definieron criterios claros para evaluar la probabilidad (P) de falla y un impacto ponderado (IP) que considerara las dimensiones operativa, de seguridad y económica, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 31010.

Se construyó una matriz de criticidad donde el riesgo (R) se calculó como $R = P \times IP$. Además, se incorporó el criterio del Tiempo Máximo de Interrupción Tolerable (TMIT) según la clasificación de la carga (vital, crítica o no vital).

Resultados que evidencian el logro:

Se obtuvo una priorización objetiva de los activos, destacando aquellos con valores de riesgo elevados y con un TMIT muy reducido.

Se realizó una selección formal de los activos considerados críticos para un análisis más profundo, entre los cuales se encuentran el generador de 800 kVA y las UPS de los quirófanos.

De este modo, se cumplió con el propósito de identificar y delimitar el conjunto de activos eléctricos más sensibles del hospital.

Cumplimiento del Objetivo 2

“Caracterizar la información técnica y operacional de los activos críticos... siguiendo ISO 14224.”

Estrategia empleada:

Los activos priorizados se clasificaron de acuerdo con la taxonomía jerárquica propuesta por la norma ISO 14224 (sistema, subsistema, equipo, componente).

Se definieron las funciones primarias y secundarias de cada activo dentro del esquema eléctrico del hospital.

Se describió el contexto operacional en el que funcionan: condiciones típicas de carga, régimen de operación, esquemas de redundancia existentes, entorno clínico que soportan y restricciones normativas aplicables.

Resultados que evidencian el logro:

Se elaboraron fichas técnico-funcionales estandarizadas para los activos seleccionados, conteniendo información homogénea y fácil de rastrear.

Se logró una clarificación precisa del papel que cumple cada activo en la continuidad de los servicios clínicos. Esta caracterización sirvió como insumo directo e indispensable para el análisis de fallas del siguiente objetivo.

Cumplimiento del Objetivo 3

“Clasificar la información técnica relevante... incluyendo funciones, fallas funcionales, modos de falla y niveles de criticidad.”

Estrategia empleada:

A partir de las funciones definidas previamente, se identificaron las posibles fallas funcionales, es decir, las condiciones bajo las cuales un activo deja de cumplir su propósito. Para cada falla funcional, se desglosaron los modos de falla específicos, considerando tanto causas técnicas como operativas.

Se desarrollaron análisis del tipo FMEA/FMECA (Análisis de Modos de Fallas y sus Efectos), evaluando las consecuencias de cada modo de falla sobre la operación, la seguridad y los costos. Se calcularon niveles de criticidad utilizando indicadores de riesgo que combinaban probabilidad, severidad y detectabilidad.

Resultados que evidencian el logro:

Se generó un listado estructurado de los modos de falla más críticos para el generador y las UPS, con sus respectivas consecuencias claramente documentadas. Las matrices de criticidad resultantes permitieron priorizar de manera fundamentada aquellos modos de falla que debían ser abordados mediante la metodología RCM.

Cumplimiento del Objetivo 4

“Aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en los activos seleccionados.”

Estrategia empleada:

Se construyeron hojas de análisis RCM tomando como punto de partida las funciones y los modos de falla críticos identificados.

Se aplicó el árbol de decisiones propio del RCM, conforme a los criterios establecidos en las normas SAE JA1011, MIL-STD-2173 y UNE 200001-3-11, para determinar el tipo de tarea de mantenimiento más adecuado en cada caso:

Tareas preventivas basadas en tiempo o uso.

Tareas condicionales (on-condition), ejecutadas al detectar un indicio de degradación.

Tareas de búsqueda de fallas en funciones ocultas (failure-finding).

Propuestas de rediseño o mejora.

La aceptación justificada de una estrategia de "operar hasta la falla" cuando era técnicamente viable.

Se definieron tareas específicas para el generador de 800 kVA y las UPS de quirófanos (por ejemplo, pruebas de transferencia del ATS, pruebas del bypass, monitoreo de impedancia y Estado de Salud -SoH- de baterías, medición de la Distorsión Armónica Total en tensión -THDv-, inspecciones visuales, limpiezas programadas), asignando una frecuencia y un responsable para cada una.

Resultados que evidencian el logro:

Se formuló un plan de mantenimiento basado en RCM, técnicamente justificado, para los activos críticos seleccionados.

Se verificó que el proceso seguido cumplía con los criterios formales que validan un análisis RCM, abordando las preguntas fundamentales, analizando las consecuencias y seleccionando las tareas de manera lógica.

Cumplimiento del Objetivo 5

“Formular una propuesta de implementación del RCM adaptada al entorno hospitalario.”

Estrategia empleada:

Se diseñó un plan de implementación con un horizonte de 12 meses, estructurado en dos fases principales: una fase piloto centrada en los activos ya analizados y una fase posterior de expansión progresiva.

Se definieron los roles y las competencias necesarias: por ejemplo, la figura de un ingeniero de confiabilidad, el jefe de mantenimiento, los técnicos especializados y la coordinación con proveedores externos.

Se planificó la integración de las tareas RCM dentro del Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado (CMMS) del hospital.

Se establecieron indicadores clave de desempeño (KPIs) para el seguimiento, como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), la disponibilidad operacional, el porcentaje de cumplimiento del mantenimiento planificado y la frecuencia de fallas críticas.

Se identificaron los riesgos potenciales durante la implementación (como la disponibilidad limitada de ventanas para pruebas en áreas clínicas, la dotación de recursos o la posible resistencia al cambio) y se plantearon estrategias concretas para mitigarlos.

Resultados que evidencian el logro:

Se produjo una hoja de ruta clara y práctica, que detalla actividades, un cronograma tentativo, responsables asignados y las métricas para el seguimiento.

La propuesta de implementación resultó coherente con la dinámica operativa del hospital y se consideró viable dentro de las capacidades actuales y futuras de la institución.

Cumplimiento del Objetivo 6

“Presentar los resultados obtenidos y las conclusiones sobre el impacto del RCM en la confiabilidad, disponibilidad y resiliencia de la infraestructura.”

Estrategia empleada:

Se sintetizaron los principales hallazgos de cada objetivo y se explicó su relación directa con el objetivo general del proyecto.

Se estableció una comparación entre la situación inicial del hospital (con un mantenimiento predominantemente reactivo o genérico) y el escenario futuro que propone un plan de mantenimiento RCM basado en el análisis de riesgos.

Se analizó el impacto esperado del modelo RCM sobre:

La confiabilidad y la disponibilidad de los sistemas eléctricos críticos.

La reducción del riesgo operativo y la consiguiente mejora en la seguridad del paciente.

El fortalecimiento de la resiliencia de la infraestructura eléctrica ante fallas y contingencias.

Se formularon conclusiones integradoras que resumen el aporte del trabajo y recomendaciones prácticas para asegurar la sostenibilidad del modelo RCM, así como para extender su aplicación a otros activos hospitalarios.

Resultados que evidencian el logro:

Las conclusiones finales demuestran de manera concreta el valor agregado que la metodología RCM puede aportar a la gestión del mantenimiento en el contexto hospitalario.

Las recomendaciones ofrecidas cierran el ciclo metodológico del proyecto y proporcionan una guía orientadora para trabajos futuros de mejora continua.

Síntesis final

De esta forma, el proyecto avanza de manera estructurada desde la identificación y priorización inicial de los activos más críticos, pasando por su análisis detallado, hasta la formulación de un plan de mantenimiento RCM listo para ser implementado y la evaluación de su impacto potencial. Este desarrollo secuencial y articulado garantizó el cumplimiento integral tanto del objetivo general como de cada uno de los objetivos específicos planteados al inicio del trabajo.

Referencias

- Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). Reliability-centered maintenance (Report ADA066579). United States Department of Defense.
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. (2004). RCM: Gateway to world class maintenance. Elsevier.
- Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39.
<https://doi.org/10.1108/13552510210420577>
- Pintelon, L., & Van Puyvelde, F. (2006). Maintenance decision making. Acco.

- Pintelon, L., & Van Puyvelde, F. (2020). Maintenance management: A practical guide. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44784-4>
- Crespo Márquez, A. (2007). The maintenance management framework: Models and methods for complex systems maintenance. Springer.
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An evolutionary perspective. En K. A. H. Kobbacy & D. N. P. Murthy (Eds.), *Complex system maintenance handbook* (pp. 21–48). Springer.
- Salah, A. M., Osman, M. H., & Hosny, O. A. (2018). Performance-based reliability-centered maintenance planning for hospital facilities. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(1), 04017113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001112)
- Shamayleh, A., Awad, M., & Abdulla, M. (2020). Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare. *International Journal of Engineering Business Management*, 12, 1–10. <https://doi.org/10.1177/1847979020921183>
- Fumagalli, L., Macchi, M., & Rapaccini, M. (2019). Applying reliability-centered maintenance in healthcare facilities: A case study approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(2), 197–212. <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2018-0029>
- Geisbush, M., & Ariaratnam, S. (2022). Reliability-centered maintenance (RCM): Literature review of current industry state of practice. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(4), 673–697. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>

- Orozco, W., Duque, E., & Mejía, G. (2017). Gestión de mantenimiento y producción más limpia en servicios de salud. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 19(1), 45–57. <https://doi.org/10.25100/iyc.v19i1.2568>
- Viscaíno-Cuzco, M., Villacrés-Parra, S., Gallegos-Londoño, C., & Negrete-Costales, H. (2019). Evaluación de la gestión del mantenimiento en hospitales del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social de la Zona 3 del Ecuador. *Ingenius*, 22, 59–71. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.06>
- Mutia, D. M., Kihui, J. M., & Maranga, S. M. (2012). Maintenance management of medical equipment in hospitals. *Industrial Engineering Letters*, 2(3), 28–38.
- Arab-Zozani, M., Pezeshki, M., Jahanbin, H., & Tabrizi, J. S. (2021). Assessment of medical equipment maintenance management in hospitals: A systematic review. *BMC Health Services Research*, 21, 482. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06467-6>
- NFPA. (2021). NFPA 99: Health care facilities code (2021 ed.). National Fire Protection Association.
- International Electrotechnical Commission. (2019). IEC/ISO 31010:2019 Risk management—Risk assessment techniques. IEC/ISO.
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO.

- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55001:2014 Asset management—Management systems—Requirements. ISO.
- SAE International. (1999). SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. SAE.
- Department of Defense. (1986). MIL-STD-2173(AS): Reliability-centered maintenance requirements for aircraft, weapons systems and support equipment. U.S. Department of Defense.
- AENOR. (2011). UNE 200001-3-11:2011. Guía para la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Asociación Española de Normalización y Certificación.
- OREDA Participants. (2015). Offshore reliability data handbook (6th ed.). SINTEF.