

**Impacto del mantenimiento predictivo en la durabilidad técnica de la Resonancia
Magnética: Un análisis interpretativo de la evidencia científica**

Carlos Andrés García Vanegas

Malena Guillet Gaviria Giraldo

Lizbe Yulieth Henao Reyes

María Cristina Restrepo Hernández

Andrea Ximena Vélez Londoño

Asesor

Edna Rocío Jamaica Guío

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud – ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2026

Dedicatoria

Este trabajo es resultado del esfuerzo conjunto, la disciplina y la perseverancia de sus autores. Se

dedica especialmente a

Nuestras familias, por constituir el pilar fundamental de nuestras vidas, por su apoyo constante, paciencia y confianza durante cada etapa de este proceso académico en nuestra formación en Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas.

A Dios, por brindarnos la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para superar los desafíos y culminar satisfactoriamente esta investigación.

A nosotros mismos, como equipo de trabajo, por la colaboración, el respeto y el compromiso que permitieron consolidar esta propuesta investigativa enfocada en la eficiencia y durabilidad técnica en resonancia magnética.

Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación:

A la asesora Edna Rocío Jamaica Guio, por su orientación permanente, sus aportes académicos y su acompañamiento en el desarrollo de este análisis sobre mantenimiento predictivo. Su exigencia y retroalimentación fueron determinantes para la calidad del estudio.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y a la Escuela de Ciencias de la Salud (ECISA), por proporcionar los recursos académicos y el entorno formativo necesarios para el desarrollo profesional como Tecnólogos en Radiología e Imágenes Diagnósticas.

A los autores e investigadores consultados, cuyos aportes en mantenimiento predictivo, inteligencia artificial y gestión hospitalaria constituyeron el soporte teórico de esta investigación.

A los docentes que, a lo largo del proceso formativo, contribuyeron al fortalecimiento del criterio técnico y científico de los autores.

Resumen

El mantenimiento de equipos médicos de alta tecnología, como los sistemas de resonancia magnética, es un factor clave en la calidad del servicio de salud, la seguridad del paciente y la eficiencia operativa de las instituciones hospitalarias. Tradicionalmente, muchas organizaciones han implementado estrategias de mantenimiento correctivo, caracterizadas por intervenir los equipos únicamente después de presentarse fallas, lo que genera interrupciones en el servicio, incremento de costos y disminución de la vida útil de los dispositivos (Moubray, 1997). En contraste, el mantenimiento predictivo se fundamenta en el monitoreo continuo de las condiciones operativas mediante sensores, análisis de datos e inteligencia artificial, permitiendo anticipar fallas antes de que ocurran (Zhu et al., 2019), lo que mejora la confiabilidad, reduce los tiempos de inactividad y optimiza la gestión del mantenimiento.

Básicamente, se espera que los resultados del estudio evidencien una mejora significativa en la disponibilidad y rendimiento de los equipos de resonancia magnética al implementar estrategias predictivas, así como una disminución de fallas inesperadas y costos asociados al mantenimiento. Se concluye, que la transición del mantenimiento correctivo al predictivo representa una alternativa más eficiente y sostenible, ya que no solo prolonga la vida útil de los equipos, sino que también garantiza la continuidad y calidad en los servicios de diagnóstico por imágenes, contribuyendo al fortalecimiento de la atención en salud.

Palabras Clave: Mantenimiento predictivo, Mantenimiento correctivo, Resonancia magnética, Confiabilidad operativa, Gestión hospitalaria.

Abstract

The maintenance of high-tech medical equipment, such as magnetic resonance imaging systems, is a key factor in the quality of healthcare services, patient safety, and the operational efficiency of hospital institutions. Traditionally, many organizations have implemented corrective maintenance strategies, characterized by intervening only after failures occur, which leads to service interruptions, increased costs, and reduced equipment lifespan (Moubray, 1997). In contrast, predictive maintenance is based on the continuous monitoring of operating conditions through sensors, data analysis, and artificial intelligence, allowing failures to be anticipated before they occur (Zhu et al., 2019), thereby improving reliability, reducing downtime, and optimizing maintenance management.

Broadly speaking, the expected results of the study are to demonstrate a significant improvement in the availability and performance of magnetic resonance imaging systems through the implementation of predictive strategies, as well as a reduction in unexpected failures and maintenance-related costs. In conclusion, the transition from corrective to predictive maintenance represents a more efficient and sustainable approach, as it not only extends equipment lifespan but also ensures continuity and quality in diagnostic imaging services, ultimately strengthening healthcare delivery.

Keywords: Predictive maintenance, Corrective maintenance, Magnetic resonance imaging (MRI), Operational reliability, Hospital management.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema	11
Justificación	13
Objetivos	15
Objetivo General	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico	16
Ecosistema del Mantenimiento en Radiología.....	17
<i>Mantenimiento Preventivo</i>	18
<i>Mantenimiento Correctivo</i>	18
<i>Mantenimiento Predictivo</i>	19
Fundamentos Físicos de la Resonancia Magnética.....	20
Componentes del Sistema de Resonancia Magnética.....	21
Seguridad y Eventos Adversos en Resonancia Magnética	23
Confiabilidad Operativa en Equipos Médicos	26
Durabilidad Técnica de los Equipos de Resonancia Magnética	28
<i>Calidad del Mantenimiento</i>	28
<i>Condiciones de Operación</i>	29
<i>Calibración Periódica</i>	29
<i>Control Ambiental</i>	29
<i>Estabilidad Eléctrica</i>	30
<i>Reducción del Desgaste de Componentes</i>	30

<i>Mayor Estabilidad Operativa del Sistema</i>	31
<i>Disminución de Reparaciones Mayores</i>	31
El Impacto Estratégico de la Transición al Mantenimiento Predictivo.....	31
<i>Mantenimiento Correctivo</i>	32
<i>Mantenimiento Predictivo</i>	32
Mejora en la Confiabilidad Operativa y el Intervalo P-F	32
<i>Reducción de Tiempos de Inactividad y Costo de Oportunidad</i>	32
<i>Maximización de la Vida Útil y Mitigación de Fallas Secundarias</i>	33
<i>Optimización Financiera y el Retorno de Inversión (ROI)</i>	33
Marco Metodológico.....	35
Tipo de investigación	35
Diseño de la investigación	36
<i>Diseño Bibliográfico</i>	36
<i>Diseño Transversal</i>	37
Resultados	38
Conclusiones	47
Referencias Bibliográficas	50

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Eventos Adversos y Medidas Preventivas RM</i>	25
Tabla 2 <i>Matriz de Impacto: Transición al Predictivo</i>	33
Tabla 3 <i>Eficiencia en el Diagnostico Predictivo en Sistemas Criogénicos</i>	39
Tabla 4 <i>Comparación de Tipos de Mantenimiento en Equipos de Resonancia Magnética</i>	39
Tabla 5 <i>Beneficios Operativos y Financieros del Mantenimiento Predictivo, con Mejora en la Calidad Diagnostica</i>	40
Tabla 6 <i>Análisis de la Transición del Mantenimiento Correctivo al Mantenimiento Predictivo en Equipos de RM</i>	42
Tabla 7 <i>Análisis Comparativo de los Diferentes Autores</i>	44

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Estudio de Neuroimagen del Cerebro en Cortes Axiales</i>	21
Figura 2 <i>Principio de la Resonancia Magnética (RM)</i>	21
Figura 3 <i>Partes del Equipo de Resonancia Magnética</i>	22
Figura 4 <i>Medidas de Seguridad en Sala de Resonancia Magnética con Tapones o Cascos en Oídos del Paciente</i>	24
Figura 5 <i>Bobinas de Radiofrecuencia</i>	24
Figura 6 <i>Impacto Operativo del Mantenimiento Predictivo en Resonancia Magnética</i>	41

Introducción

La gestión del mantenimiento en los equipos médicos, especialmente en equipos de Resonancia Magnética constituye un factor estratégico para garantizar la continuidad operativa, la seguridad del paciente y la calidad de los servicios diagnósticos en los centros hospitalarios. Durante muchos años estos centros se han basado en el mantenimiento correctivo, es decir, en la reparación de un equipo cuando ya ocurrió la falla. Aunque este enfoque permite restablecer a corto plazo la operatividad del equipo, también genera tiempos de inactividad, aumento de costos, reprogramación de pacientes y una disminución en la productividad institucional. (Mobley, 2002).

Los equipos de Resonancia Magnética representan una de las tecnologías más complejas y sensibles, debido a que integran subsistemas avanzados como imanes superconductores, bobinas de radiofrecuencia, gradientes magnéticos y sistemas criogénicos. El funcionamiento adecuado de estos componentes es indispensable para obtener imágenes de alta calidad y mantener condiciones seguras de operación (Westbroock & Talbot, 2018). Es por ello por lo que, cualquier falla técnica pueda afectar directamente la precisión diagnóstica, la disponibilidad del servicio y la vida útil del equipo.

Por lo tanto, el mantenimiento predictivo es una alternativa moderna basada en el monitoreo continuo de variables críticas, análisis de datos y detección tempranas de anomalías, permitiendo anticipar fallas antes de que ocurran, en el que se optimiza los recursos y mejora los indicadores como el MTBF, MTTR y la disponibilidad operativa.

Planteamiento del Problema

En la última década, la radiología digital se ha consolidado como un pilar fundamental del diagnóstico médico, permitiendo la detección de patologías con una precisión sin precedentes. Esta evolución ha transformado las instituciones de salud en entornos altamente dependientes de la disponibilidad y el rendimiento óptimo de sistemas complejos de adquisición de imágenes. No obstante, a medida que la tecnología de los detectores de panel plano y los tubos de rayos X se vuelve más sofisticada, también aumenta su sensibilidad a factores externos y al desgaste interno imperceptible (IAEA, 2022).

En este contexto, los sistemas de radiología enfrentan desafíos significativos debido a la falta de un enfoque proactivo en su mantenimiento. La ausencia de técnicas de monitoreo predictivo y de mantenimiento preventivo puede ocasionar fallos inesperados que interrumpen el servicio, comprometen la calidad de las imágenes diagnósticas y aumentan los costos operativos. Por ello, resulta esencial implementar sistemas de monitoreo basados en sensores y análisis de datos, con el fin de mejorar la estabilidad y calibración de estos equipos y garantizar su correcto funcionamiento.

El mantenimiento predictivo se basa en la evaluación periódica de indicadores que permiten anticipar cuándo un dispositivo requiere intervención, recomendándole evaluaciones mensuales para evitar fallas en los equipos de radiología. Por su parte, el mantenimiento preventivo identifica posibles fallas para corregirlas antes de que se agraven, asegurando el funcionamiento adecuado de los equipos. Un mantenimiento adecuado contribuye a mejorar las condiciones de la maquinaria, estructuras, sistemas y componentes, además de preservar el patrimonio empresarial durante el ciclo de vida del activo, garantizando la seguridad del

personal, la comunidad y la protección del medio ambiente, y ejecutando las actividades con la mayor eficiencia económica posible (Azüero Parra, 2018).

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué impacto tiene la transición de mantenimiento correctivo a predictivo sobre la confiabilidad operativa y la durabilidad técnica de los equipos de Resonancia Magnética? El abordaje del tema se realizará desde un enfoque descriptivo, con el propósito de dar respuesta a dicha pregunta de investigación.

Justificación

Desde una perspectiva de gestión tecnológica en salud, la incorporación de técnicas de monitoreo predictivo basadas en sensores y análisis de datos permite anticipar fallas, optimizar la calibración de los equipos y reducir el tiempo de inactividad, contribuyendo a una operación más segura y eficiente. Asimismo, la implementación del mantenimiento predictivo mediante estas herramientas garantiza la estabilidad y calibración continua de los equipos, disminuyendo significativamente la probabilidad de fallos críticos y minimizando los tiempos de interrupción del servicio, lo cual es fundamental en sistemas donde la disponibilidad permanente es crucial para la atención médica (Azüero Parra, 2018).

En cuanto al impacto en la calidad del servicio, la radiología digital exige altos niveles de precisión diagnóstica. Las fallas derivadas de una inadecuada calibración o mantenimiento pueden generar artefactos en las imágenes, errores diagnósticos o la necesidad de repetir procedimientos, aumentando la exposición del paciente a radiación innecesaria. En este sentido, el uso de técnicas predictivas mejora la eficiencia, seguridad y confiabilidad del servicio de imagenología (Azüero Parra, 2018).

Desde la perspectiva de la eficiencia operativa y los costos, la adopción de estrategias predictivas optimiza el uso de recursos, reduciendo las intervenciones correctivas de emergencia, las cuales suelen ser más costosas y prolongadas. Asimismo, el análisis de datos históricos y tendencias facilita la toma de decisiones basada en evidencia, permitiendo una planificación más efectiva del mantenimiento.

La implementación del mantenimiento predictivo y preventivo no solo implica la revisión periódica de los dispositivos, sino también la limpieza regular del área, la contratación de servicios de mantenimiento preventivo y correctivo, y la elaboración de planes de mantenimiento

con listas de chequeo. Estas estrategias permiten evitar periodos de inactividad del equipo, maximizar su disponibilidad y prevenir reparaciones innecesarias o fallas inesperadas, contribuyendo a mejorar la calidad del servicio y la satisfacción del usuario. El objetivo principal es evaluar el estado actual del mantenimiento en el área de radiología (Azüero Parra, 2018).

Por otro lado, la evolución de la radiología analógica a la digital no ha sido acompañada equitativamente por un desarrollo similar en las estrategias de mantenimiento. Actualmente, muchos departamentos de imagenología operan bajo un modelo de mantenimiento preventivo basado en calendarios, el cual resulta ineficiente al no considerar el estrés real de los componentes.

Finalmente, la adopción de un sistema de monitoreo predictivo basado en sensores y análisis de datos se justifica por la necesidad de transformar los registros de errores y la telemetría de los equipos en información accionable. Según Ghasemi y Pecht (2022), la capacidad de predecir fallos en el tubo de rayos X o en los sistemas de enfriamiento antes de que ocurran permite alcanzar una estabilidad del sistema que el mantenimiento tradicional no puede proporcionar. Este enfoque tecnológico posibilita una calibración dinámica, asegurando que los parámetros físicos del equipo se mantengan dentro de rangos óptimos de operación de manera continua (Azüero Parra, 2018).

Objetivos

Objetivo General

Analizar la transición del mantenimiento correctivo al mantenimiento predictivo en equipos de Resonancia Magnética en centros hospitalarios, y su relación con la confiabilidad operativa, la gestión tecnológica segura y la durabilidad técnica de los equipos.

Objetivos Específicos

Evaluar la eficacia de las herramientas de diagnóstico predictivo descritas en la literatura técnica para el monitoreo de niveles de helio y sistemas de enfriamiento, como estrategia para la prevención de pérdida de criogénicos.

Identificar las características y diferencias entre el mantenimiento correctivo y el mantenimiento predictivo en equipos médicos de alta tecnología.

Determinar los beneficios operativos y financieros derivados de la implementación del mantenimiento predictivo, específicamente en la reducción de los tiempos de inactividad, la maximización de la vida útil de los componentes y la mejora en la calidad diagnóstica.

Marco Teórico

Durante décadas, en numerosos centros hospitalarios la gestión del mantenimiento de los equipos médicos se ha basado principalmente en intervenciones correctivas. Este enfoque consiste en realizar acciones técnicas una vez que el equipo ha presentado una falla con el objetivo de restablecer su funcionamiento. Aunque este método permite solucionar problemas inmediatos, diversos estudios han demostrado que depender exclusivamente de él puede generar consecuencias económicas y operativas importantes. Mobley (2002) explica que los costos asociados al mantenimiento correctivo no se limitan únicamente a la reparación del equipo, sino que también incluyen pérdidas económicas relacionadas con la interrupción del servicio. En otras palabras, cuando un equipo deja de operar, la institución deja de percibir ingresos por los procedimientos que no pueden realizarse durante ese periodo. En el caso de tecnologías de diagnóstico altamente especializadas, como los sistemas de resonancia magnética, los tiempos de inactividad pueden provocar reprogramaciones de pacientes, retrasos en los estudios clínicos y afectaciones en la oportunidad de la atención médica.

Dentro del área de diagnóstico por imágenes, uno de los sistemas más complejos desde el punto de vista tecnológico es la resonancia magnética nuclear. Esta tecnología ocupa un lugar central dentro de la radiología moderna, ya que permite obtener imágenes detalladas de los tejidos blandos del cuerpo humano sin utilizar radiación ionizante. El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en la interacción entre campos magnéticos de alta intensidad y señales de radiofrecuencia, lo cual requiere una infraestructura tecnológica altamente especializada y un funcionamiento coordinado de múltiples subsistemas.

Entre los elementos más importantes se encuentra el imán superconductor, responsable de producir el campo magnético estático conocido como B_0 . Este campo debe mantenerse estable y

homogéneo para asegurar la precisión en la formación de las imágenes. Adicionalmente, los sistemas de resonancia magnética incorporan bobinas de gradiente que permiten modificar el campo magnético en diferentes direcciones con el fin de codificar espacialmente la señal generada durante el proceso de adquisición de imágenes. Asimismo, cuentan con bobinas de radiofrecuencia encargadas de transmitir y recibir las señales electromagnéticas producidas por los núcleos de hidrógeno presentes en los tejidos del cuerpo humano. Otro componente esencial es el sistema criogénico, el cual utiliza helio líquido para mantener el imán a temperaturas extremadamente bajas que hacen posible la superconductividad. Westbrook & Talbot (2018) indican que el funcionamiento adecuado de este sistema depende del monitoreo permanente de variables como el nivel de helio, la presión interna y la velocidad de evaporación del refrigerante.

El seguimiento de estas variables resulta fundamental para garantizar la estabilidad operativa del equipo. Además, su control forma parte de la gestión del ciclo de vida tecnológico del sistema, el cual incluye etapas como la instalación inicial, la calibración del equipo, su operación cotidiana, las actividades de mantenimiento y, finalmente, su reemplazo cuando se alcanza la obsolescencia tecnológica. Según la International Atomic Energy Agency (IAEA, 2021), una adecuada gestión del mantenimiento permite prolongar la vida útil de los equipos médicos y asegurar la continuidad de los servicios de diagnóstico por imágenes dentro de las instituciones de salud.

Ecosistema del Mantenimiento en Radiología

El ecosistema de mantenimiento en un departamento de radiología es un conjunto interconectado de procesos técnicos, normativos y humanos. No se trata solo de reparar máquinas, sino de gestionar activos tecnológicos de alta complejidad para garantizar la seguridad

radiológica y la precisión diagnóstica centrándose en la garantía de la calidad de la imagen y la continuidad del servicio médico, de esta manera podemos desglosar los pilares de este ecosistema. (Organización Mundial de la Salud, 2012; García & García, 2018).

Mantenimiento Preventivo

Es la columna vertebral en radiología. Su objetivo es asegurar que el equipo funcione dentro de las especificaciones de fábrica, evitando desviaciones que degraden la calidad diagnóstica.

Fundamento: Se basa en calendarios preestablecidos (bi-anales o anuales).

Importancia: Según la literatura revisada (UNAD, USAC), el MP es el mecanismo principal para cumplir con las normas de seguridad radiológica y evitar el desgaste prematuro de componentes costosos como los tubos de rayos X o bobinas de radiofrecuencia (Bonilla Palacio et al., 2025; Pérez Santoya et al., 2025).

Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo representa la intervención técnica que se realiza una vez que ocurra una falla funcional en un equipo, este tipo de mantenimiento tiene un carácter reactivo, ya que su objetivo principal es restablecer la operatividad del sistema después de que se ha presentado una avería o mal funcionamiento. El mantenimiento correctivo se fundamenta en la intervención posterior a la falla, que implica la reparación, ajuste o sustitución de componentes defectuosos con el fin de restituir las condiciones normales de funcionamiento del equipo.

En el ámbito radiológico, este tipo de mantenimiento puede evidenciarse en situaciones como la sustitución de un detector plano dañado, la reparación de circuitos electrónicos o la corrección de fallas en el software de la consola de adquisición, las cuales pueden impedir la obtención adecuada de imágenes diagnósticas.

No obstante, cuando el mantenimiento correctivo no está planificado, puede generar tiempos de inactividad del equipo (downtime), lo que repercute directamente en la continuidad del servicio, afectando la programación de pacientes y puede obligar a la derivación externa, aumentando los costos (Armida Bretones, 2012)

Mantenimiento Predictivo

Constituye uno de los enfoques más avanzados dentro de la ingeniería clínica moderna, ya que se basa en el monitoreo continuo del estado y funcionamiento real de los equipos, con el fin de anticipar posibles fallas antes de que estas ocurran, su fundamento radica en la evaluación de la condición real del equipo mediante sensores, sistemas de monitoreo y análisis de datos, integrados en muchos casos a tecnologías como el internet de las cosas (IoT). En el campo de la radiología, el mantenimiento predictivo se aplica en equipos complejos como la resonancia magnética y tomografía computarizada, donde se supervisan continuamente parámetros técnicos como la temperatura del helio líquido en el sistema criogénico, la vibración del motor del gantry, la estabilidad del suministro electrónico o el comportamiento de los sistemas de enfriamiento. (International Atomic Energy Agency, 2022; Organización Mundial de la Salud, 2012).

Una de las principales ventajas de este enfoque es que permite planificar la sustitución de componentes únicamente cuando los sensores indican que su vida útil está próxima a finalizar (Moblely, 2002; Bouslawi et al., 2021), optimizando el uso de repuestos, reduciendo costos de mantenimiento y evitando fallas inesperadas durante la operación clínica.

El mantenimiento predictivo tiene una relación directa con la calidad de la imagen diagnóstica. En sistemas de Resonancia Magnética, el monitoreo constante de parámetros críticos como la homogeneidad, del campo magnético, la integridad de la jaula de Faraday y la temperatura del helio criogénico permite anticipar fallas que degradan la relación señal-ruido,

(SNR) y provocan artefactos en la imagen. Según los estándares de ACR (American College of Radiology 2015), la falta de estabilidad en estos parámetros no solo afecta la precisión diagnóstica, sino que incrementa la tasa de repetición de estudios y el desgaste prematuro de los componentes del gradiente.

De esta manera, el mantenimiento en radiología no debe entenderse únicamente como un proceso técnico o mecánico, sino como un componente esencial del control de calidad en el diagnóstico médico. El éxito de un departamento de radiología depende de la triangulación, donde el mantenimiento es el eje que une la tecnología con la seguridad del paciente.

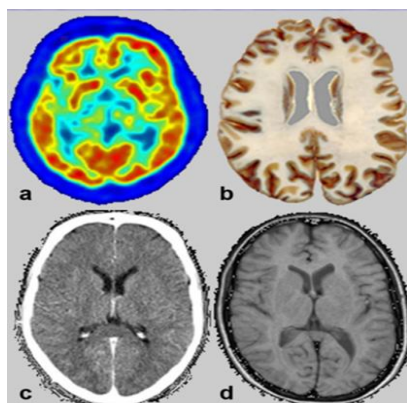
Fundamentos Físicos de la Resonancia Magnética

Las señales de Resonancia Magnética nuclear se originan en la interacción de las ondas de radio con los propios núcleos atómicos. con la ayuda de las ondas electromagnéticas las propiedades magnéticas permiten la producción de imágenes del cuerpo humano que pueden proporcionar información sobre la morfología y la función del organismo humano (Rinck, 2025).

La radiación utilizada para la resonancia magnética es muy diferente de la de rayos X y la radiación gamma, es aproximadamente nueve ordenes de magnitud menor que las de frecuencia correspondientes las de rayos X o gamma y son consideradas biológicamente segura (Rinck, 2025).

Figura 1

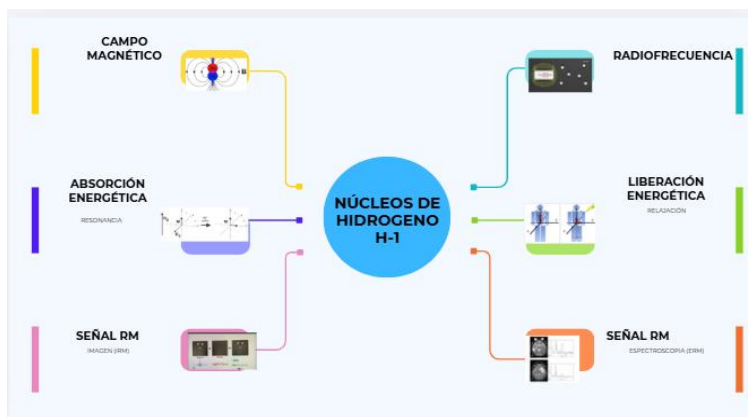
Estudio de Neuroimagen del Cerebro en Cortes Axiales



Nota. Imagen del cerebro. Magnetic Resonance in Medicine. Rinck (2025).

Figura 2

Principio de la Resonancia Magnética (RM)



Nota. Elaboración propia. Introducción biofísica a la Resonancia Magnética. Fuente. Gili, J. (1993)

Componentes del Sistema de Resonancia Magnética

Un sistema de RM está conformado por varios subsistemas interdependientes que permiten la generación y procesamiento de la señal: (Rodríguez Peña, 2019)

Imán Principal: Genera el campo magnético estático (B_0).

Bobinas de radiofrecuencia (RF): Transmiten pulsos electromagnéticos y reciben la señal emitida por los tejidos. (Rodríguez Peña, 2019)

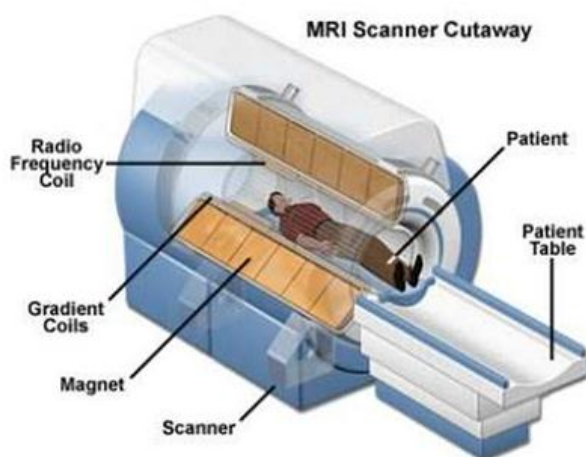
Bobinas de Gradiente: Producen variaciones lineales del campo magnético necesarias para la codificación espacial. (Rodríguez Peña, 2019)

Sistema de Shimming: Corrige inhomogeneidades del campo magnético.

Sistema electrónico de control y procesamiento: Amplifica, digitaliza y reconstruye la señal obtenida. (Rodríguez Peña, 2019)

Figura 3

Partes del Equipo de Resonancia Magnética



Nota. Control de calidad automático para los sistemas de Resonancia Magnética mediante el uso del Fantoma de Fluke. Fuente. Rodríguez Peña (2019).

El adecuado funcionamiento de cada uno de estos componentes es determinante para la calidad diagnóstica.

Formación de la Imagen en RM

La imagen en RM se obtiene mediante la aplicación secuencial de:

Pulso de excitación de radiofrecuencia.

Gradientes magnéticos para codificación espacial.

Lectura de la señal mediante ecos (espín eco, eco de gradiente).

El contraste final depende de los tiempos de relajación T1, T2 y T2*, los cuales varían según las características del tejido (Rodríguez Peña, 2019).

La correcta sincronización entre estos elementos permite el llenado del espacio k y la posterior reconstrucción digital de la imagen.

Seguridad y Eventos Adversos en Resonancia Magnética

Aunque la RM no emplea radiación ionizante, no está exenta de riesgos. Organismos como la Food and Drug Administration (FDA) y la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) han establecido límites de exposición relacionados con:

Intensidad del campo magnético estático.

Campos de gradiente.

Depósito específico de energía (SAR).

Niveles de ruido acústico.

Los gradientes generan vibraciones que pueden alcanzar aproximadamente 80 dB, por lo que es obligatorio el uso de protección auditiva. Asimismo, la radiofrecuencia puede producir calentamiento tisular, especialmente en presencia de objetos metálicos, generando riesgo de quemaduras (Ortega, 2022).

La implementación de protocolos de seguridad es fundamental para proteger al paciente, al personal de salud y al entorno clínico.

Figura 4

Medidas de Seguridad en Sala de Resonancia Magnética con Tapones o Cascos en Oídos del Paciente

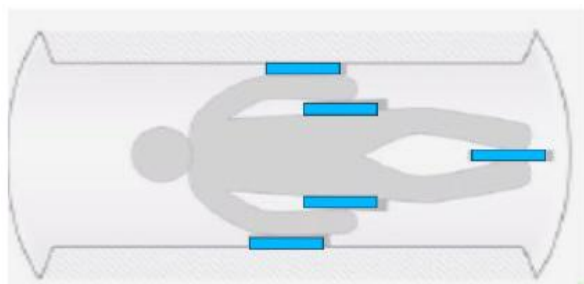


Nota. Plan de seguridad en el área de resonancia magnética. Fuente. Ortega (2022).

La Radiofrecuencia, puede generar calor y es posible que haya apariciones de lesiones térmicas por el calentamiento de elementos metálicos. También es importante evitar el contacto con las bobinas, cables o antenas para evitar quemaduras (Ortega, 2022).

Figura 5

Bobinas de Radiofrecuencia



Nota. Plan de seguridad en el área de resonancia magnética. Fuente. Ortega (2022).

A continuación, se verá un resumen de eventos adversos y medidas preventivas con la técnica de RM.

Tabla 1*Eventos Adversos y Medidas Preventivas RM*

Actividad	Riesgos y Efectos	Medida Preventiva
Efecto de gradientes: Lesión auditiva	Pérdida auditiva transitoria	Usar protector acústico, cascos, tapones en los oídos. Cuidadosa colocación de antenas, bobinas y cables, evitando contacto directo.
Efecto de radiofrecuencia- Lesión térmica	Quemaduras Dolor sobrecalentamiento	Avisar la paciente si calentamiento de tatuajes y colocar suero frío o compresas húmedas. Control de acceso. Correcta señalización: área restringida.
Elementos metálicos externos del paciente	Riesgo efecto misil Lesiones por impacto Personas atrapadas Daños en el imán.	Carteles con material incompatible. Colocación de pijamas o calzas para la prueba, entre otros.
Elementos metálicos interno del paciente incompatible con la RM	Avería del depósito. Movilización del dispositivo. Calentamiento de material. Artefactos en la imagen. Muerte del paciente	Control de acceso. Señalización áreas acceso restringido. consulta de compatibilidad en la entrevista. Valoración por radiólogo responsable. Entre otros.

Actividad	Riesgos y Efectos	Medida Preventiva
Quench: fuga de helio	Riesgo de asfixiar, congelación. Riesgo de incendio.	Correcta instalación y fundamento del conducto de evacuación de gases. Registro periódico de nieves de helio y cortes temporales de corriente.

Nota. Guía para garantizar la seguridad del paciente y del personal durante una RM. Fuente. Plan de seguridad en el área de Resonancia Magnética, Ortega (2022)

Confiabilidad Operativa en Equipos Médicos

La confiabilidad operativa se define como la capacidad de un sistema o equipo para desempeñar su función requerida durante un período determinado bajo condiciones específicas de operación.

En el contexto hospitalario, la confiabilidad de los equipos médicos es crucial porque influye directamente en:

La Continuidad del Servicio Clínico

La continuidad depende de que los activos como equipos biomédicos, sistema de información y suministros, funcionen de acuerdo con lo previsto. La confiabilidad en equipos en los equipos es absoluta una falla inesperada interrumpe el tratamiento y obliga a protocolos de emergencia que consumen tiempo y recursos críticos.

La Calidad del Diagnóstico

La continuidad no es solo estar abierto, si no funcionar correctamente. Un sistema de imagenología como un resonador que falla intermitentemente generar, cuellos de botella que

generan retrasos en el diagnóstico, o repetición de proceso que general pérdida de insumos y tiempo del personal de salud lo que conlleva a la saturación del equipo.

La Seguridad del Paciente

La confiabilidad en el entorno clínico no es un lujo técnico es el escudo que protege al paciente de eventos adversos. Cuando un sistema o equipo falla, la seguridad se rompe y el paciente queda expuesto a errores que pueden ocasionar daños graves al paciente. (Organización Mundial de la Salud, 2012; Cheng et al., 2021). Así, los Indicadores Utilizados Para Evaluar la Confiabilidad Incluyen

MTBF Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre Fallas)

En que consiste: Es el promedio de tiempo que transcurre entre una falla y la siguiente solo se aplica a sistemas que puedan repararse.

Para que sirve: Mide la confiabilidad, Entre más alto sea el MTBF, más confiable es el equipo.

Como se utiliza: Se usa para diseñar planes de mantenimiento preventivo. Si sabes que una pieza suele fallar cada 1,000 horas (MTBF), programarás un cambio a las 800 o 900 horas para evitar el paro (Mobley, 2002).

MTTR Mean Time To Repair – (Tiempo Medio de Reparación)

En que consiste: Es el tiempo promedio que se tarda en volver a poner en funcionamiento un equipo desde que se detecta la falla.

Para que sirve: Mide la mantenibilidad y la eficiencia del equipo técnico. Un MTTR bajo indica que el equipo es fácil de reparar o que el equipo de mantenimiento está muy bien preparado y tiene los repuestos a mano.

Como se utiliza: Para identificar cuellos de botella en el taller (falta de herramientas, manuales confusos o falta de stock de piezas) (Mobley, 2002).

Disponibilidad Operativa

En que consiste: Es el porcentaje de tiempo que un equipo está realmente listo para trabajar en relación con el tiempo total que se esperaba que estuviera disponible.

Para que sirve: Es el indicador de desempeño global. Relaciona la confiabilidad (MTBF) Con la Velocidad de Reparación (MTTR).

Como se utiliza: Si una máquina tiene una disponibilidad del 95%, significa que el 5% del tiempo está detenida por fallas o reparaciones. Los gerentes la usan para decidir si deben comprar maquinaria nueva o cambiar de proveedor.

Las estrategias de mantenimiento predictivo contribuyen a mejorar estos indicadores al identificar problemas antes de que se conviertan en fallas críticas (Mobley, 2002).

El enfoque de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) busca precisamente optimizar la disponibilidad y seguridad de los sistemas mediante estrategias de mantenimiento adecuadas para cada tipo de equipo (Moubrey, 1997).

Durabilidad Técnica de los Equipos de Resonancia Magnética

La durabilidad técnica se refiere a la capacidad de un equipo para mantener sus características funcionales durante su vida útil sin deterioro significativo.

En los equipos de resonancia magnética, la durabilidad depende de varios factores:

Calidad del Mantenimiento

El mantenimiento de alta calidad asegura que los sistemas de soporte vital del imán funcionen sin interrupciones. El componente más costoso es el imán criogénico, Si el mantenimiento del Cold Head (el refrigerador del helio) es deficiente, el helio se evapora. Si el

nivel de helio baja demasiado, el imán puede perder su superconductividad (Quench). Un solo evento de Quench somete a la estructura interna a un estrés térmico y mecánico tan violento que puede reducir años de vida útil o dejar el equipo inservible (American College of Radiology 2015 & Harmonay 2020).

Condiciones de Operación

Se refiere a cómo el personal técnico utiliza el equipo y el volumen de carga de trabajo. Las secuencias de imagen más exigentes como la difusión o la RM funcional, fuerzan a los amplificadores de gradiente a trabajar al límite. Si se operan constantemente secuencias de alto estrés sin permitir periodos de estabilización, los componentes electrónicos sufren fatiga térmica. Esto acelera el fallo de las tarjetas de radiofrecuencia y el desgaste de los cables de las bobinas (García 2018).

Calibración Periódica

La calibración asegura que el equipo opere dentro de los parámetros de diseño del fabricante. Un equipo descalibrado suele "esforzarse" más para obtener la misma calidad de imagen. Por ejemplo, si la homogeneidad del campo es pobre el sistema de gradientes debe compensar de más, generando calor innecesario. La calibración evita el sobre trabajo de los componentes de hardware, manteniendo el consumo energético y el desgaste térmico en niveles óptimos (International Atomic Energy Agency 2022).

Control Ambiental

Este es quizás el factor externo que más impacto tiene en la electrónica del sistema. Un resonador genera una cantidad inmensa de calor que debe ser disipada por un "Chiller" enfriador de agua y aire acondicionado de precisión. Si la temperatura de la sala técnica sube, los componentes semiconductores se degradan exponencialmente, para esto se aplica la regla de

Arrhenius: por cada 10°C de aumento la vida útil de la electrónica se reduce a la mitad. La humedad fuera de rango puede causar corrosión o arcos eléctricos en la jaula de Faraday (Dhillon 2020).

Estabilidad Eléctrica

Es el factor externo más crítico para la supervivencia de la electrónica de potencia en un resonador magnético. A diferencia de un electrodoméstico común, una Resonancia Magnética RM consume grandes cantidades de energía de forma intermitente y violenta para activar los gradientes. Los amplificadores de RF y las tarjetas de adquisición de datos son extremadamente sensibles. Una corriente "sucia" o inestable causa micro daños acumulativos, esto acelera el envejecimiento de los componentes, provocando que fallen años antes de lo previsto por el fabricante. La estabilidad eléctrica actúa como un "escudo" que preserva la integridad física de los circuitos.

Los programas de mantenimiento predictivo contribuyen significativamente a prolongar la vida útil de los equipos, ya que permiten detectar desgaste o anomalías en etapas tempranas, evitando que evolucionen hacia fallas mayores (Moubray 1997; Mobley 2002).

Entre los beneficios del mantenimiento predictivo para la durabilidad técnica se encuentran:

Reducción del Desgaste de Componentes

Evita que una pieza trabaje bajo condiciones de esfuerzo excesivo (fricción, calor o sobrevoltaje) que acorten su vida útil diseñada. Por ejemplo, limpiar los filtros de aire evita que los ventiladores giren a máximas RPM constantemente.

Beneficio: Alarga la vida real del equipo. Si un tubo de rayos X o un gradiente está diseñado para 10 años, un desgaste reducido permite alcanzar o superar esa meta, maximizando la inversión inicial (**ROI**).

Mayor Estabilidad Operativa del Sistema

Se refiere a la consistencia del equipo. Un sistema estable es aquel que no presenta errores aleatorios, reinicios inesperados o variaciones en la calidad de la imagen diagnóstica.

Beneficio: Aumenta la confianza del personal médico. Si el equipo es estable, los radiólogos no tienen que repetir estudios por artefactos en la imagen, lo que mejora el flujo de pacientes y reduce el costo por examen.

Disminución de Reparaciones Mayores

Es atajar el problema cuando sea pequeño, por ejemplo, corregir una fuga de aceite mínima hoy para evitar que el motor se quemara completamente mañana.

Beneficio: Las reparaciones mayores como un *Quench* en RM o el cambio de un compresor principal, son catastróficas para el presupuesto. Al disminuirlas, el flujo de caja de la empresa se mantiene sano y se evita que el equipo quede fuera de servicio por semanas o meses. Por estas razones, cada vez más instituciones hospitalarias están implementando programas de mantenimiento basados en monitoreo continuo para equipos de diagnóstico avanzado (Moubray 1997; Mobley 2002).

El Impacto Estratégico de la Transición al Mantenimiento Predictivo

La transición representa el paso de una gestión basada en el "suceso" (el equipo se detuvo) a una basada en la "condición" (el equipo muestra señales de fatiga). Este cambio se divide en dos enfoques principales:

Mantenimiento Correctivo

Genera un entorno de alta incertidumbre. La organización está sujeta a fallas aleatorias que interrumpen el flujo asistencial.

Mantenimiento Predictivo

Utiliza herramientas de diagnóstico, entre ellas, el análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceites y monitoreo de transitorios eléctricos, para medir el estado real del activo. Aquí, la variable central es el dato preventivo, que permite una toma de decisiones informada (Lozada, 2023).

Mejora en la Confiabilidad Operativa y el Intervalo P-F

Para profundizar en la confiabilidad, es vital introducir el concepto del Intervalo P-F (falla potencial a falla funcional). El mantenimiento predictivo busca detectar la falla potencial (P), que es el primer signo físico de una anomalía. Si se detecta a tiempo, se establece una ventana de semanas o meses antes de la falla funcional (F), donde el equipo deja de operar. Al intervenir en el punto P, la disponibilidad operativa aumenta drásticamente, ya que las reparaciones se realizan por elección y no por emergencia (Armida Bretones, 2012).

Reducción de Tiempos de Inactividad y Costo de Oportunidad

En el entorno hospitalario, el tiempo de inactividad no solo se mide en términos económicos, sino en oportunidad diagnóstica y seguridad del paciente. La transición reduce los paros no planificados que obligan a reprogramar turnos. El impacto real es que el mantenimiento predictivo puede realizarse de forma no invasiva mientras el equipo opera o en breves espacios entre pacientes, eliminando las semanas de espera por repuestos importados que suelen caracterizar al mantenimiento correctivo (Ortega, 2022).

Maximización de la Vida Útil y Mitigación de Fallas Secundarias

Un beneficio crítico es la prevención de la degradación en cascada. Por ejemplo, en un resonador, una pequeña inestabilidad en el sistema de enfriamiento (falla menor) puede provocar que los gradientes operen a mayores temperaturas, degradando el aislamiento de las bobinas (falla mayor). Al corregir la causa raíz detectada por el predictivo, se evita que el activo sufra un envejecimiento acelerado, asegurando que el equipo alcance su vida útil tecnológica de 10 o 15 años con un rendimiento óptimo (Zhun et al, 2019).

Optimización Financiera y el Retorno de Inversión (ROI)

Aunque el mantenimiento predictivo requiere una inversión inicial en sensores, el Costo Total de Propiedad (TCO) disminuye mediante dos vías:

Eficiencia en Repuestos: Se elimina el inventario innecesario. Solo se adquiere lo que el sistema predice que se necesitará próximamente.

Eliminación de Costos de Emergencia: Se evitan los fletes aéreos urgentes, las horas extras de técnicos externos y las penalizaciones por incumplimiento de servicios contratados (Zhun et al, 2019).

Finalmente, la investigación destaca el uso de algoritmos de aprendizaje profundo (*deep learning*) para el pronóstico de salud de los activos. En particular, (Zhun et al, 2019) demostraron que el mantenimiento predictivo en equipos médicos de alta gama puede utilizarse inteligencia artificial para analizar registros de error (logs) y predecir fallas en la cadena de radiofrecuencia con una precisión superior al 90%.

Tabla 2

Matriz de Impacto: Transición al Predictivo

Variable	Estado En Mantenimiento	Estado En Mantenimiento
	Correctivo	Predictivo
Riesgo	Alto (Incertidumbre total)	Bajo (Riesgo controlado)
Costo por Intervención	Muy alto (Emergencia)	Optimizado (Planificado)
Vida Útil del Activo	Reducida por estrés constante	Maximizada por operación óptima
Calidad de Imagen	Variable (Degradación no detectada)	Constante (Calibración basada en datos)
Seguridad del Paciente	Comprometida por fallas súbitas	Alta por monitoreo continuo

Nota. Comparación de dos tipos de mantenimiento para equipos de Resonancia Magnética.

Fuente. Survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches, Zhun et al (2019)

Marco Metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, debido a que se orienta al análisis e interpretación de información teórica y técnica relacionada con los tipos de mantenimiento aplicados a equipos de resonancia magnética, específicamente el mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo. Este enfoque permite comprender las características, ventajas, limitaciones y aplicaciones de cada tipo de mantenimiento dentro del contexto de la ingeniería biomédica (Creswell & Creswell, 2018).

Asimismo, el estudio adopta un carácter documental-interpretativo, fundamentado en la revisión sistemática de literatura científica, normas técnicas y documentos especializados, lo cual facilita la identificación de modelos y buenas prácticas en la gestión del mantenimiento de equipos médicos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Este enfoque resulta pertinente, ya que permite analizar de manera crítica cómo las estrategias de mantenimiento influyen en la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los equipos de resonancia magnética, considerados fundamentales en los servicios de diagnóstico por imagen (World Health Organization, 2017).

Tipo de Investigación

La investigación es de tipo documental, puesto que se basa en la recopilación, análisis y síntesis de información proveniente de fuentes secundarias como artículos científicos, libros especializados y guías técnicas relacionadas con el mantenimiento de equipos biomédicos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Adicionalmente, el estudio se clasifica como:

Descriptivo: debido a que caracteriza los tipos de mantenimiento (preventivo, correctivo y predictivo) aplicados a los equipos de resonancia magnética, detallando sus procedimientos, objetivos y alcances.

Explicativo: ya que analiza la influencia de cada tipo de mantenimiento en el desempeño, vida útil y confiabilidad de los equipos, permitiendo comprender su importancia en la gestión tecnológica en salud (ECRI Institute, 2020).

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es no experimental, dado que no se manipulan variables ni se realizan pruebas en campo, sino que se estudia la información en su contexto teórico (Creswell & Creswell, 2018).

Asimismo, el estudio presenta las siguientes características:

Diseño Bibliográfico

Basado en la revisión y análisis de fuentes documentales actualizadas relacionadas con el mantenimiento en equipos de resonancia magnética. Se realizó la búsqueda en repositorios académicos y técnicos de alto impacto, tales como IEEE Xplore, PubMed/MEDLINE, ScienceDirect y el repositorio institucional de la UNAD, Se emplearon términos normalizados (MeSH y DeCS) y palabras técnicas específicas: "Predictive maintenance", "Magnetic Resonance Imaging", "Healthcare engineering", "Deep learning in radiology" e "Internet of Things (IoT)" así como se consideraron publicaciones en español e inglés, dada la alta concentración de literatura técnica sobre ingeniería clínica en este último idioma, también se estableció un marco temporal de los últimos 7 años (2019-2026) para asegurar que las tecnologías mencionadas (como IA y algoritmos de Zhu et al.) sean vigentes.

Diseño Transversal

La recopilación y análisis de la información se realiza en un período determinado, sin seguimiento a lo largo del tiempo (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Este diseño permite estructurar el conocimiento existente sobre mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo, facilitando la comparación de sus aplicaciones y la identificación de estrategias más eficientes en el contexto biomédico.

Resultados

En la presente investigación literaria, titulada “Impacto del Mantenimiento Predictivo en la Durabilidad Técnica de la Resonancia Magnética: Un Análisis Interpretativo de la Evidencia Científica”, se evidenció que los equipos altamente especializados, como la Resonancia Magnética, requieren un seguimiento y control constantes. Esto permite prolongar su vida útil y aporta beneficios como la seguridad del paciente, la reducción de costos de mantenimiento y la prevención de fallas inesperadas durante el proceso de atención (Mobley, 2002, Bouslawi et al, 2021).

El análisis comparativo de los autores citados permitió identificar coincidencias y diferencias respecto a la evolución de las estrategias de mantenimiento aplicadas a equipos de Resonancia Magnética. En este sentido, Mobley y Moubray coinciden en que el mantenimiento correctivo es el enfoque menos eficiente, ya que actúa después de la falla, generando incertidumbre operativa, mayores costos y tiempos de inactividad.

Por otro lado, con relación al mantenimiento predictivo, Zhu, Bouslawi, destacan el uso de sensores, Big Data e inteligencia artificial para anticipar fallas, coinciden que herramientas como monitoreo de helio, análisis vibracional y revisión de logs permiten detectar anomalías tempranas, reducir emergencias técnicas y optimizar repuestos y costos.

Finalmente, existe un consenso general entre los autores en que la transición del mantenimiento correctivo al predictivo representa una mejora estratégica para los hospitales.

En la siguiente tabla se mostrarán las herramientas predictivas identificadas para la Resonancia Magnética, se distingue que el monitoreo de helio líquido, sensores térmicos, análisis de vibración, control eléctrico y el seguimiento de sistemas de enfriamiento, permiten detectar anomalías tempranas y prevenir eventos críticos como la pérdida de criogénicos o quench.

1er Objetivo Específico. Evaluar la eficacia de las herramientas de diagnóstico predictivo descritas en la literatura técnica para el monitoreo de niveles de helio y sistemas de enfriamiento, como estrategia para la prevención de pérdida de criogénicos.

Tabla 3

Eficiencia en el Diagnostico Predictivo en Sistemas Criogénicos

Herramienta	Variable Monitoreada	Beneficio Principal	Fuente de Información
Sensor de nivel de Helio	Volumen Criogénico	Prevenir fuga de helio	Zhu et al. (2019)
Sensores Térmicos	Temperatura interna	Protección electrónica	Zhu et al. (2019)
Análisis vibracional	Motores y compresores	Detección de desgaste	Zhu et al. (2019)
Monitoreo eléctrico	Voltaje y armónicos	Evita daños por sobrecarga	Zhu et al. (2019)
Software analítico IA	Logs de error	Predicción de fallas futuras	Zhu et al. (2019)

Nota. En la tabla se identifican las herramientas predictivas en equipos de Resonancia Magnética. Elaboración propia.

2do Objetivo Específico. Identificar las características y diferencias entre el mantenimiento correctivo y el mantenimiento predictivo en equipos médicos de alta tecnología.

Tabla 4

Comparación de Tipos de Mantenimiento en Equipos de Resonancia Magnética

Tipo de mantenimiento	Momento de intervención	Ventajas	Desventajas	Impacto en el servicio	Fuente de Información
Correctivo	Después de la falla	Restablece e el funcionamiento	Altos costos, tiempos de inactividad, interrupcion	Negativo: genera retrasos y reprogramacio	Organización Mundial de la Salud. (2012)

Predictivo	Antes de la falla (según datos reales)	Reduce costos, anticipa fallas, optimiza recursos	Requiere inversión tecnológica	Alto: maximiza continuidad del servicio	Organización Mundial de la Salud. (2012)

Nota. La tabla presenta la comparación de dos tipos de mantenimiento, en el que se observa las ventajas, desventajas y el impacto que se tiene en el servicio de RM. Elaboración propia

En este sentido, el mantenimiento predictivo resulta más beneficioso para los centros hospitalarios en comparación con el mantenimiento correctivo. Aunque este último interviene cuando ya se han presentado fallas en los equipos, puede generar retrasos en los procesos de atención, así como un aumento en los costos debido a la reposición de repuestos.

3er Objetivo Específico. Determinar los beneficios operativos y financieros derivados de la implementación del mantenimiento predictivo, en la reducción de los tiempos de inactividad, la maximización de la vida útil de los componentes y la mejora en la calidad diagnóstica.

Tabla 5

Beneficios Operativos y Financieros del Mantenimiento Predictivo, con Mejora en la Calidad Diagnostica

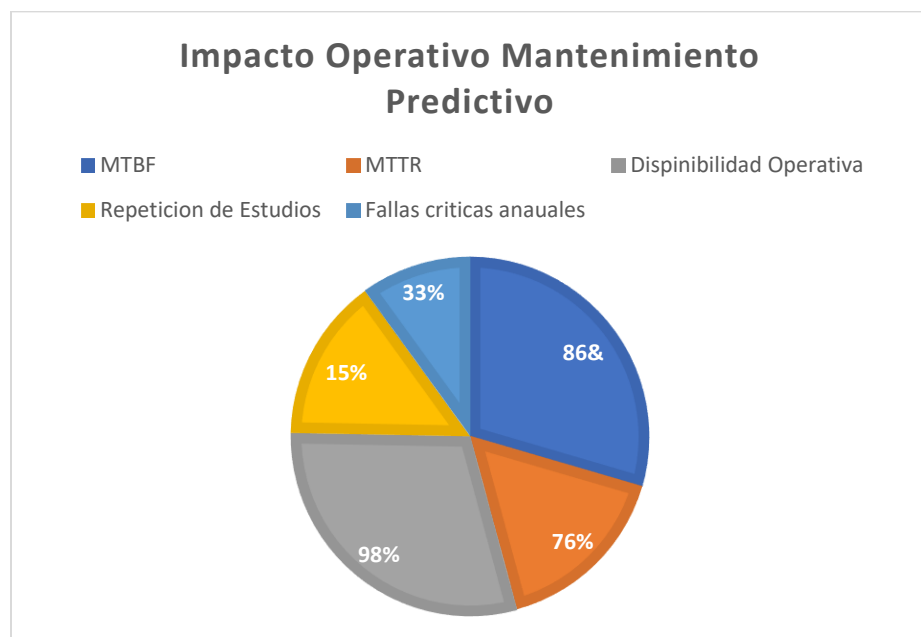
Indicador	Situación tradicional	Mantenimiento Predictivo	Fuente de Información
MTBF (Tiempo Medio entre Fallos)	Medio	Alto	Industrial Press, Moubray (1997) y Mobley (2002)
MTTR (Tiempo Medio de Reparación)	Alto	Bajo	Industrial Press, Moubray (1997) y Mobley (2002)

Disponibilidad Operativa	85% - 90%	95% - 98%	Industrial Press, Moubray (1997) y Mobley (2002)
Repetición de Estudios	Frecuente	Baja	Industrial Press, Moubray (1997) y Mobley (2002)
Fallas Críticas Anuales	Moderadas	Reducidas	Industrial Press, Moubray (1997) y Mobley (2002)

Nota. En la tabla evidenciada se demuestra que el mantenimiento predictivo optimiza el desempeño técnico y operativo de los equipos médicos, fortaleciendo la continuidad asistencial y calidad en el servicio. Elaboración propia.

Figura 6

Impacto Operativo del Mantenimiento Predictivo en Resonancia Magnética



Nota. Representación gráfica elaborada a partir de los resultados de la tabla 5. Fuente. Moubray (1997) y Mobley (2002)

En la figura se observa que el método tradicional resulta menos beneficioso para los centros hospitalarios. La disponibilidad operativa en la situación tradicional se encuentra entre el 85 % y el 90 %, mientras que con el mantenimiento predictivo aumenta a un rango entre el 95 % y el 98 %, representando una mejora significativa.

Asimismo, en el modelo tradicional es frecuente la repetición de estudios, mientras que con el mantenimiento predictivo esta situación disminuye considerablemente. De igual manera, se evidencia que las fallas críticas anuales se reducen con la aplicación del mantenimiento predictivo en comparación con el método tradicional. Moubray (1997)

Objetivo General. Analizar la transición del mantenimiento correctivo al mantenimiento predictivo en equipos de Resonancia Magnética en centros hospitalarios, y su relación con la confiabilidad operativa, la gestión tecnológica segura y la durabilidad técnica de los equipos.

Tabla 6

Análisis de la Transición del Mantenimiento Correctivo al Mantenimiento Predictivo en Equipos de RM

Dimensión de Análisis	Mantenimiento Correctivo	Mantenimiento Predictivo	Impacto de la Transición	Fuente de Información
Enfoque de intervención	Actúa después de la falla	Actúa antes de la falla mediante Monitoreo continuo	Disminuye interrupciones inesperadas	Moubray (1997) y Mobley (2002)
Confiabilidad Operativa	Baja continuidad por fallas imprevistas	Mayor estabilidad y disponibilidad del equipo	Incremento del MTBF y reducción del MTTR	Moubray (1997) y Mobley (2002)

			Mayor	
Gestión tecnológica segura	Riesgo de eventos súbitos y errores operativos	Vigilancia Permanente de parámetros críticos	Mayor seguridad para paciente, el personal médico y equipo	Moubray (1997) y Mobley (2002)
Durabilidad técnica	Mayor desgaste por operación bajo falla	Conservación de componentes mediante acciones tempranas	Prolongación de la vida útil del sistema	Moubray (1997) y Mobley (2002)
Calidad diagnóstica	Posibles artefactos y variabilidad en imagen	Parámetros estables y mejor rendimiento	Imágenes más consistentes y confiabilidad	Moubray (1997) y Mobley (2002)
Costos institucionales	Altos costos por emergencias y paros no programados	Costos planificados y mejor uso de recursos	Optimización financiera	Moubray (1997) y Mobley (2002)
Planificación del mantenimiento	Reactiva y no programada	Estratégica y basada en datos	Mejor gestión administrativa	Moubray (1997) y Mobley (2002)

Nota. En la tabla se evidencia una comparación entre el mantenimiento correctivo y el predictivo en distintas dimensiones operativas, mostrando las ventajas claras del modelo predictivo.

Elaboración propia

Se observa en el análisis de la transición, que el mantenimiento correctivo actúa después de que ocurra una falla del equipo, en el que se genera interrupciones, hay mayor costo y menor confiabilidad operativa, mientras que el mantenimiento predictivo permite anticipar dichas fallas

mediante monitoreo continuo, mejorando la disponibilidad del equipo, la seguridad tecnológica y la calidad diagnóstica.

Asimismo, favorece la conservación técnica de los componentes, optimiza los costos institucionales y facilita una planificación estratégica del mantenimiento. Finalmente, la transición hacia el mantenimiento predictivo representa una mejora significativa en la eficiencia operativa y administrativa de los centros hospitalarios. Mobley (2002)

Tabla 7

Análisis Comparativo de los Diferentes Autores

Autor	Enfoque Principal	Mantenimiento Preventivo / Correctivo	Mantenimiento Predictivo
ACR (2015)	Calidad y Estándar: Manual Técnico para RM.	Establecer rutinas escritas de Control de Calidad (QC) y mantenimiento preventivo para asegurar la imagen.	No se enfoca en el “predictivo” por datos, sino en la verificación constante de parámetros técnicos.
Angulo León (2020)	Gestión Normativa: Resolución 3100 de 2019.	Se centra en el cumplimiento de la norma para la habilitación de servicios de salud. Prioriza el preventivo programado.	Lo ve como una meta de gestión tecnológica avanzada para optimizar la vida útil del equipo médico.
Anisetti et al. (2015)	Innovación Tecnológica: Datadriven approach.	Considera que el preventivo y correctivo son insuficientes y	Defensor Central: Propone el uso de algoritmos y Big Data para anticipar

		costosos para la complejidad medica actual.	fallos antes de que ocurran.
Armida Bretones et al. (2012)	Seguridad Laboral: Protección en radiaciones.	El mantenimiento se ve como una herramienta de seguridad y prevención de riesgos físicos para el personal.	No profundiza en el predictivo; su prioridad es la estanqueidad y seguridad de entorno mediante revisiones fijas.
Azuero Parra (2018)	Optimización de Recursos: Sistemas digitales.	Analiza como el paso de lo analógico a lo digital exige un preventivo más técnico y menos mecánico.	Propone el mantenimiento como un plan de optimización de recursos que roza la filosofía del predictivo.
Banguero Pinzón et al. (2024)	Análisis de Fallas: Critica al sistema actual.	Reporta que la falta de mantenimiento preventivo dispara los costos y tiempo de inactividad por correctivos.	Sugiere que la transición a modelos más rigurosos evitaría la crisis de disponibilidad de equipos.
Bonilla Palacio et al. (2025)	Calidad de Imagen: RX Digital.	El mantenimiento preventivo es la herramienta principal para evitar el ruido y artefactos en la imagen digital.	Lo plantea como el siguiente paso necesario para garantizar la continuidad del servicio sin interrupciones.

Bouslawi et al. (2021)	Health 4.0: Revisión de técnicas modernas.	Señala que el preventivo tradicional no considera la variabilidad del uso real en hospitales.	Analiza el uso de Machine Learning para predecir fallas en componente críticos de equipos médicos.
Cheng, Li & McElmurry (2021)	Flujo de Pacientes: Impacto operativo.	Documenta como el mantenimiento correctivo (downtime) colapsa las salas de urgencias y retrasa diagnósticos.	Enfatiza que el predictivo es vital para la eficiencia del flujo de pacientes y la reducción de esperas.
Delgado Ospino (2024)	Control Técnico: Parámetros de RX.	El fallo en el preventivo (falta de calibración) degrada la calidad diagnóstica, obligando a repetir tomas.	Se enfoca en la estabilidad técnica como paso previo a una gestión predictiva automatizada.
Dhillon (2020)	Confiabilidad: Ingeniería de sistemas	Analiza la “Mantenibilidad”. El preventivo debe ser diseñado desde la fabricación del equipo.	Propone modelos matemáticos de fiabilidad que son la base para decidir cuándo intervenir (predictivo).
Fernández/ 4D Medica (2026)	IA y Modernización: Visión futura.	Considera el preventivo como un requisito mínimo, pero insuficiente para	Enfoque en IA: El mantenimiento predictivo permite una “Salud Digital”

		la complejidad de la IA actual.	del equipo mediante sensores inteligentes.
IAEA (2022)	Seguridad Nuclear: Protocolos globales.	Estándar de oro para el preventivo. El correctivo debe minimizarse por el riesgo de sobreexposición a radiación.	Utiliza el monitoreo de dosis y parámetros como una forma de vigilancia predictiva del estado del tubo de rayos X.
Lozada (2023)	Gestión Industrial: Estrategias.	Compara costos: El correctivo es e veces más caro que el preventivo.	Presenta el predictivo como la estrategia de optimización total de activos fijos.
Medina Peña et al. (2026)	Eficiencia del Servicio: Tiempos críticos.	Muestra el impacto económico negativo de depender de acciones correctivas en servicios de alta demanda.	Propone el paso al predictivo para eliminar los “tiempos muertos” que afectan la rentabilidad y al paciente.
Moley (2002)	Ingeniería Industrial: Base teórico del mantenimiento.	Define el correctivo como “gestión de crisis”. El preventivo se basa en estadísticas de tiempo (MTBF).	Padre del Concepto: Expone que el predictivo usa monitoreo de condición para eliminar desmontajes innecesarios del preventivo.

Nota. en la siguiente tabla se comparan los puntos de vista de los diferentes autores mencionados respecto a lo que ha sido la evolución del mantenimiento correctivo y preventivo al mantenimiento predictivo. Elaboración propia.

Conclusiones

En conclusión, el mantenimiento correctivo, aunque es útil para resolver fallas inmediatas, resulta siendo poco eficiente como estrategia principal en equipos de alta complejidad como la RM, debido a los costos elevados, las interrupciones del servicio que se genera, afectando la programación de pacientes, la seguridad del paciente por repeticiones de estudios, viéndose obligados a la derivación externa. (Armida Bretones, 2012)

Por otro lado, el mantenimiento predictivo es benéfica para los centros hospitalarios debido a la evolución tecnológica, permitiendo anticipar fallas mediante monitoreos continuos de parámetros críticos, reduciendo tiempos de inactividad, mejorando la planificación técnica, aumento de tiempo medio entre fallas (MTBF) y disminución del tiempo medio de reparación (MTTR), mejorando la calidad en el diagnóstico, ya que el control permanente de variables técnicas reduce artefactos en la imagen, minimiza la repetición de estudios y mejora la precisión clínica. Esto hace que se fortalezca la eficiencia operativa, la seguridad del paciente y la sostenibilidad tecnológica de los centros hospitalarios.

A partir del análisis de la evidencia recolectada, se concluye que la calidad del mantenimiento asegura que los sistemas de soporte vital del imán funcionen sin interrupciones, ya que el imán es uno de los componentes más costosos del equipo y necesita mantenerse a temperatura extremadamente bajas mediante helio líquido para conservar la superconductividad, condición necesaria para generar el campo magnético estable requerido en los estudios diagnósticos, ya que si su mantenimiento es inadecuado o presenta fallas, el helio comienza a evaporarse más rápido de lo normal y disminuye su nivel dentro del equipo.

La revisión de la literatura permite concluir que el mantenimiento predictivo representa una evolución significativa frente a los modelos tradicionales, al transformar un enfoque reactivo

en uno proactivo basado en datos, lo que mejora la confiabilidad operativa de los equipos de resonancia magnética.

Finalmente, existe un consenso entre los autores en que la implementación de estrategias predictivas reduce los tiempos de inactividad, optimiza los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil de los equipos, impactando positivamente la eficiencia de los servicios de imagenología, en el que se evidencia que el mantenimiento predictivo tiene una relación directa con la calidad diagnóstica, ya que permite mantener la estabilidad de parámetros críticos del equipo, reduciendo la aparición de artefactos y la repetición de estudios.

Referencias Bibliográficas

- American College of Radiology. (2015). *Magnetic resonance imaging quality control manual*. ACR. <https://edge.sitecorecloud.io/americancoldf5f-acrorgf92a-productioncb02-3650/media/ACR/Files/Clinical/Quality-Control-Manuals/MRI-Quality-Control-Manual.pdf>
- Angulo León, Y. D. (2020). *Manual de gestión de la tecnología en la Clínica Universidad de La Sabana, teniendo como referencia la Resolución 3100 de 2019* [Trabajo de grado, Universidad del Rosario]. <https://repository.urosario.edu.co/items/2a4a7862-c075-41fa-acc8-2c09b742c221>
- Anisetti, S., Ardagna, C. A., Bellandi, V., Damiani, E., & Rebecani, D. (2015). *Predictive maintenance of medical devices: A data-driven approach*. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 19(4). <https://repository.udistrital.edu.co/items/171faf35-9758-4126-b5fa-95b8718e49b6>
- Armida Bretones, R. M., Barbero del Palacio, P., Uribe Llopis, P., Valle Roble, M., Mínguez Martínez, M., & Caso Pita, C. (2012). *Normas básicas de seguridad durante el manejo de equipos de radiaciones no ionizantes*. Medicina y Seguridad del Trabajo, 58(226), 67–78. https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=s0465546x2012000100008&script=sci_arttext
- Azuero Parra, D. F. (2018). *Plan de mantenimiento y optimización de recursos para los sistemas de digitalización de rayos X y mamografía para la ciudad de Cuenca* [Trabajo de grado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7741>
- Banguero Pinzón, W., Campo Ibarra, A. F., Granada Morales, L. V., Granada Barrios, L. M., Monsalve Carreño, G. E., & Jamaica Guio, E. R. (2024). *Aumento de las acciones correctivas en los equipos de radiología convencional por falta de mantenimiento*

preventivo [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].
<https://repository.unadedu.co/handle/10596/66392>

Bonilla Palacio, L. F., Muñoz Cruz, A. P., Ortigón Valencia, J. S., Penagos Sierra, V. P., & Rincón Hoyos, I. V. (2025). *Mantenimiento preventivo de equipos de RX para mejorar la calidad de las imágenes de radiología digital* (Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia). <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65866>

Bouslawi, H., Al-Ahmari, A., & El-Haik, Y. (2021). Predictive maintenance in healthcare: A review of techniques and applications for medical equipment. *International Journal of Quality & Reliability Management*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/62012>

Cheng, J., Li, W., & McElmurry, K. (2021). Impact of medical equipment downtime on patient flow in emergency departments. *Journal of Clinical Engineering*, 46(2), 85–92.
https://journals.lww.com/jcejournal/abstract/2021/04000/impact_of_medical_equipment_downtime_on_patient.5.aspx

Contreras, J. S., González, B. C., & Mosquera, D. (2024). Contribución de la radiología digital al mejoramiento de la calidad en servicios de imagenología. *Revista Nova*, 22(32), 124–145.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10264873>

Delgado Ospino, P. M. (2024). *Calidad deficiente en las imágenes radiológicas por falta de control de parámetros técnicos en el mantenimiento preventivo del equipo de rayos X* [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/62830/pmdelgadoo.pdf>

Dhillon, B. S. (2020). *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. CRC Press.

<https://www.routledge.com/Maintainability-Maintenance-and-Reliability-for-Engineers/Dhillon/p/book/9780367574741>

Fernández, L. D. (2026, enero 19). *La importancia del mantenimiento de equipos médicos*.

<https://4dmedica.ai/es/la-importancia-del-mantenimiento-de-equipos-medicos/>

García, J., & García, M. (2018). *Gestión del mantenimiento hospitalario y tecnología médica*.

Editorial Médica Panamericana. <https://www.medicapanamericana.com/es/libro/gestion-del-mantenimiento-hospitalario-y-tecnologia-medica>

Gili, J. (1993). *Introducción biofísica a la resonancia magnética*. Centre Diagnòstic Pedralbes.

<https://vetcomunicaciones.com.ar/uploadsarchivos/libro.gili.pdf>

Harmonay, V. (2020, mayo 22). *MRI: Preventative maintenance made easy*. Atlantis Worldwide.

<https://info.atlantisworldwide.com/blog/mri-maintenance>

International Atomic Energy Agency. (2022). *Quality control in digital radiology: Standard protocols and impact on patient safety*. IAEA.

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2021_web.pdf

Ira. (2025, febrero 25). *Mantenimiento preventivo de equipos de radiodiagnóstico*. IRE Rayos X.

<https://www.irerayosx.com/mantenimiento-preventivo-de-equipos-de-radiodiagnostico/>

Lozada, P. (2023). *Gestión de mantenimiento industrial y estrategias predictivas*. Universidad Politécnica Salesiana.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27105/1/UPSCT011235.pdf>

Medina Peña, C. P., Serna Trullo, E. A., Bermúdez Pinto, K. A., Zapata Domínguez, P. A., &

Osorio Polindara, V. (2026). *Tiempos críticos en radiología digital: Un estudio sobre el impacto de las fallas de equipos en la eficiencia del servicio* [Trabajo de grado,

Universidad Nacional Abierta y a Distancia].

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/78131>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://books.google.com.co/books?id=SjqXzxpAzSQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press. <https://es.scribd.com/document/399048691/1-Libro-RCM-J-Moubray-pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2012). *Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos: Guía de recursos de dispositivos médicos de la OMS*. OMS. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/0d0dc761-44f8-49a7-a210-e02a50f6f152/content>

Ortega, M. J. G., Sánchez, A. M. V., Mora, M. D. P. P., & Sánchez, J. M. (2022). *plan de seguridad en el área de resonancia magnética*. <https://www.piper.espacioseram.com/index.php/seram/article/view/8401>

Pérez Santoya, A. P., Almagro Mata, A., Ballesteros Pacheco, A. S., Villareal Hernández, R. A., & Castro De Janon, W. M. (2025). *Falta de un modelo preventivo de mantenimiento de equipos específicos basados en datos históricos de calibración y rendimiento del sistema en Colombia* (Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia). <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/68664>

Tapia, S., Aguilera, G., Rojas, L., & García, J. (2024). *Mantenimiento predictivo basado en machine learning: Una revisión sistemática de la literatura y perspectivas en la Industria 4.0*. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 15(4), 63–93. <https://doi.org/10.65093/aci.v15.n4.2024.3>

- Tirado Kulieva, V. A., Gonzales Arévalo, E. G., Flores Castillo, B. E., Juárez Calderón, L. A., Rivera Gutiérrez, E. T., Seminario Sanz, R. S., & Castro Silupú, W. (2024). Sensores inteligentes empleados en el mantenimiento predictivo de equipos y máquinas: Una revisión sistemática de la literatura. *Revista de Investigación Científica de la UNF – Aypate*, 2(1), 89–98. <https://doi.org/10.57063/ricay.v2i1.31>
- Wang, Y., & Ni, J. (2021). Sensor-based predictive maintenance for complex electronic systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(5), 1245–1260. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-020-01614-2>
- Zhu, T., Ran, Y., Zhou, X., & Wen, Y. (2019). *A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1912.07383>