

**Análisis documental del impacto del mantenimiento predictivo en la disponibilidad operativa y la vida útil de los equipos de radiología digital**

Lizeth Natalia Peña Ledesma

José Leonardo Hernández Ledesma

Karen Tatiana Bonilla Martínez

Tania Rocio Valencia Rojas

William Fernando Ramírez Cruz

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**

Dedicamos este trabajo al esfuerzo, la constancia y el compromiso que hicieron posible culminar esta etapa de formación académica. A nuestras familias y seres queridos, quienes brindaron apoyo, motivación y acompañamiento durante el desarrollo de este proceso, siendo fundamentales para alcanzar esta meta.

Asimismo, dedicamos este trabajo al fortalecimiento de nuestros conocimientos y competencias profesionales en el área de radiología e imágenes diagnósticas, reafirmando nuestro compromiso con calidad, la seguridad del paciente y la mejora continua en los servicios de salud.

### **Agradecimientos**

Los integrantes del presente trabajo expresan su más sincero agradecimiento a la tutora Edna

Rocio Jamaica Guio, por su acompañamiento, orientación y apoyo académico durante el desarrollo de esta investigación. Sus recomendaciones, observaciones y disposición constante fueron fundamentales para fortalecer el proceso investigativo y la construcción del documento final.

De igual manera, agradecemos a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD y el Diplomado de Profundización en Control de la calidad en Radiología Digital, por brindar los espacios académicos y formaticos que contribuyen al fortalecimiento de nuestros conocimientos y competencias profesionales.

Asimismo, agradecemos el compromiso, la responsabilidad y el trabajo colaborativo de cada uno de los integrantes del equipo, ya que el esfuerzo conjunto, la dedicación y el apoyo mutuo fueron fundamentales para el desarrollo y culminación satisfactoria de este proceso académico.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de manera directa o indirecta aportaron apoyo y motivación durante el desarrollo de este proceso académico.

## Resumen

La radiología digital constituye un pilar fundamental en el diagnóstico médico moderno, y su buen funcionamiento depende principalmente de la disponibilidad operativa y el adecuado mantenimiento de los equipos. En los enfoques tradicionales existen el mantenimiento correctivo y preventivo, pero estos presentan limitaciones al no permitir la detección oportuna de fallas, lo que puede generar tiempos de inactividad, deterioro en la calidad de imagen y un aumento innecesario en la dosis al paciente.

Este estudio analiza el impacto del mantenimiento predictivo en la disponibilidad operativa y la vida útil de los equipos de radiología digital. Mediante un enfoque cualitativo basado en la revisión literaria científica, normativa internacional y fuentes técnicas especializadas, se examinan parámetros críticos como la estabilidad del generador, el rendimiento del detector y los indicadores de exposición, así como la incidencia de herramientas de monitoreo y analítica de datos.

Los resultados evidencian que el mantenimiento predictivo permite anticipar fallas, optimizar el desempeño técnico de los equipos y mejorar la continuidad del servicio radiológico. Asimismo, contribuye a la preservación de la calidad de la imagen y al cumplimiento del principio de ALARA en protección radiológica.

En conclusión, la implementación de estrategias de monitoreo predictivo representa una alternativa eficiente y sostenible para la gestión tecnológica en la radiología digital con un impacto muy positivo en la seguridad del paciente, la calidad diagnóstica y la optimización de recursos institucionales.

**Palabras Clave:** radiología digital, mantenimiento predictivo, disponibilidad operativa, calidad de imagen, protección radiológica.

## Abstract

Digital radiology is a fundamental pillar in modern medical diagnosis, and its proper functioning mainly depends on the operational availability and adequate maintenance of equipment. Traditional approaches include corrective and preventive maintenance; however, these present limitations as they do not allow for the timely detection of failures, which can lead to downtime, deterioration in image quality, and an unnecessary increase in patient dose.

This study analyzes the impact of predictive maintenance on the operational availability and service life of digital radiology equipment. Using a qualitative approach based on the review of scientific literature, international regulations, and specialized technical sources, critical parameters such as generator stability, detector performance, and exposure indicators are examined, as well as the impact of monitoring tools and data analytics.

The results show that predictive maintenance allows for the anticipation of failures, optimization of technical performance, and improvement in the continuity of radiological services. It also contributes to preserving image quality and complying with the ALARA principle in radiation protection.

In conclusion, the implementation of predictive monitoring strategies represents an efficient and sustainable alternative for technological management in digital radiology, with a positive impact on patient safety, diagnostic quality, and the optimization of institutional resources.

**Keywords:** digital radiology, predictive maintenance, operational availability, image quality, radiation protection.

## Contenido

Introducción .....	11
Planteamiento del Problema .....	13
Justificación .....	16
Objetivos .....	18
Objetivo General .....	18
Objetivos Específicos.....	18
Marco Teórico .....	19
Fundamentos de la Radiología Digital.....	19
Evolución de la Radiología Convencional a la Radiología Digital .....	19
Sistemas de Radiografía Computarizada y Radiografía Digital Directa .....	22
Detectores Digitales y Eficiencia Cuántica de Detección.....	24
Parámetros Físicos de la Calidad de Imagen en Radiología Digital.....	24
<i>Resolución Espacial</i> .....	25
<i>Resolución de Contraste</i> .....	25
<i>Relación Señal-Ruido (SNR)</i> .....	27
Artefactos en Radiología Digital y su Relación con el Mantenimiento del Sistema .....	28
<i>Píxeles Defectuosos (Dead Pixels o Hot Pixels)</i> .....	29
<i>Artefactos de Líneas o Bandas</i> .....	30
<i>Artefacto de Ghosting (Imagen Residual)</i> .....	31
<i>Artefactos por Descalibración (Flat-Field)</i> .....	32
<i>Artefactos Electrónicos o de Ruido Estructural</i> .....	33
Relación entre Artefactos y Mantenimiento Predictivo .....	33

Bases Teóricas Conceptuales .....	34
Radiología Digital y Complejidad Tecnológica .....	34
Disponibilidad Operativa en Equipos Biomédicos .....	35
Enfoques de Mantenimiento en Equipos Biomédicos .....	36
<i>Mantenimiento Correctivo</i> .....	37
<i>Mantenimiento Preventivo</i> .....	37
<i>Mantenimiento Predictivo</i> .....	37
Modelos de Monitoreo Predictivo y Analítica Avanzada.....	39
Parámetros Técnicos Críticos en el Monitoreo Predictivo .....	39
<i>Degradación de la Capa Hemirreductora (HVL)</i> .....	40
<i>Estabilidad del Generador</i> .....	40
<i>Calibración del Detector (Flat-Fielding)</i> .....	41
Software de Gestión de Dosis (Dose Tracking).....	41
Telemetría y Diagnóstico Remoto .....	42
Vida Útil de los Sistemas de Radiología Digital.....	43
Control de Calidad y Monitoreo del Desempeño en Radiología Digital .....	44
Pruebas de Aceptación y Pruebas de Constancia .....	44
Indicadores de Exposición (Exposure Index, EI) .....	45
Análisis de Rechazo de Imágenes.....	46
Evidencia Científica del Impacto del Mantenimiento Predictivo en Radiología Digital..	46
Relación Entre Mantenimiento Predictivo y Disponibilidad Operativa .....	47
Impacto del Monitoreo Predictivo en La Vida Útil de Los Equipos.....	47
Implicaciones en Calidad de Imagen y Seguridad Radiológica.....	48

Marco Metodológico.....	50
Fases de la Investigación .....	51
<i>Selección y Búsqueda</i> .....	51
<i>Análisis de la Información</i> .....	52
Análisis de Resultados .....	53
Conclusiones .....	56
Referencias Bibliográficas .....	58

**Lista de Tablas**

**Tabla 1.** *Comparación de los Enfoques de Mantenimiento en Sistemas de Radiología*

*Digital* ..... 38

**Tabla 2** *Comparación de Modelos de Mantenimiento en Radiología Digital* ..... 54

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Esquema del Funcionamiento del Tubo de Rayos Catódicos</i> .....	19
<b>Figura 2.</b> <i>Flujo de Trabajo Radiología Convencional</i> .....	20
<b>Figura 3.</b> <i>Flujo de Trabajo en Radiología Digital</i> .....	21
<b>Figura 4.</b> <i>Equipo de Radiología Digital Directa</i> .....	22
<b>Figura 5.</b> <i>Resolución Espacial</i> .....	25
<b>Figura 6.</b> <i>Resolución de Contraste</i> .....	26
<b>Figura 7.</b> <i>Relación Señal Ruido</i> .....	27
<b>Figura 8.</b> <i>Artefacto de Pixel Muerto</i> .....	30
<b>Figura 9.</b> <i>Artefacto de Líneas en Radiografía de Columna Cervical</i> .....	31
<b>Figura 10.</b> <i>Artefacto Fantasma de Fémur en Radiografía de Tórax</i> .....	32
<b>Figura 11.</b> <i>Defecto por Calibración de Flat</i> .....	32
<b>Figura 12.</b> <i>Artefacto Electrónico</i> .....	33

## Introducción

En las últimas décadas, la radiología digital ha emergido como uno de los fundamentos esenciales del diagnóstico médico, gracias a su habilidad para ofrecer imágenes de alta calidad, mejorar los tiempos de respuesta y reforzar los procesos de atención clínica. La incorporación de sistemas digitales en los servicios de imágenes diagnósticas ha propiciado una evolución notable en la captura, procesamiento y almacenamiento de la información radiológica, promoviendo una práctica médica más eficiente y precisa.

No obstante, el correcto funcionamiento de estos sistemas depende directamente de la puesta en marcha de estrategias de mantenimiento que aseguren su estabilidad operativa, el mantenimiento de la calidad de imagen y la seguridad radiológica del paciente.

Tradicionalmente, los enfoques de mantenimiento correctivo y preventivo han sido los más empleados en la gestión de equipos biomédicos; sin embargo, las crecientes demandas tecnológicas y operativas han puesto de manifiesto limitaciones asociadas con la detección temprana de fallos y la optimización de los recursos institucionales.

En este marco, el mantenimiento predictivo aparece como una alternativa innovadora apoyada en el monitoreo continuo de variables técnicas y en el análisis de datos operativos, lo que permite prever fallos antes de que impacten en el funcionamiento de los equipos. Este enfoque mejora la disponibilidad operativa de los sistemas de radiología digital y ayuda a extender la vida útil de componentes críticos como el tubo de rayos X, el detector digital y el generador de alta tensión.

De igual manera, parámetros físicos como la relación señal-ruido (SNR), la eficiencia cuántica de detección (DQE) y la estabilidad del kilovoltaje (kVp) afectan directamente la calidad diagnóstica y la dosis de radiación que se administra al paciente. Por esta razón, el

monitoreo constante de estos indicadores es un aspecto clave dentro de los procesos de control de calidad y en el cumplimiento del principio ALARA.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es desarrollar un análisis documental sobre la influencia del mantenimiento predictivo en la disponibilidad operativa y la duración de los equipos de radiología digital, mediante la revisión de la literatura científica y técnica correspondiente a la gestión tecnológica, el control de calidad y los modelos de mantenimiento aplicados en radiología. A través de este análisis, se procura evidenciar la relevancia de implementar estrategias predictivas dirigidas a potenciar la eficiencia operativa, la calidad diagnóstica y la seguridad del paciente en los servicios de imágenes diagnósticas.

## Planteamiento del Problema

En el contexto contemporáneo de la medicina diagnóstica, la radiología digital constituye uno de los pilares fundamentales para la toma de decisiones clínicas oportunas y seguras. La disponibilidad operativa de estos sistemas no representa únicamente un requisito técnico, sino una condición indispensable para garantizar la continuidad asistencial, la precisión diagnóstica y la protección radiológica del paciente. Organismos internacionales como la International Atomic Energy Agency y el American College of Radiology han resaltado la importancia de implementar programas estructurados de control de calidad y mantenimiento sistemático que aseguren la estabilidad funcional de los equipos de imagenología médica.

No obstante, pese a los avances en digitalización y automatización tecnológica, múltiples instituciones de salud continúan adoptando enfoques tradicionales de mantenimiento fundamentados en cronogramas preestablecidos, correspondientes al mantenimiento preventivo, o en intervenciones correctivas posteriores a la falla. Aunque estos modelos cumplen con requerimientos básicos de revisión periódica, presentan limitaciones significativas para anticipar deterioros progresivos en componentes críticos como el tubo de rayos X, los detectores digitales o los sistemas electrónicos de procesamiento.

El mantenimiento correctivo, al ejecutarse únicamente después de que ocurre la falla, genera tiempos prolongados de inactividad no planificada y afecta la continuidad del servicio. Por su parte, el mantenimiento preventivo, basado en intervalos fijos de intervención, puede resultar ineficiente al programar revisiones en equipos que aún se encuentran en condiciones óptimas de funcionamiento, sin considerar su comportamiento dinámico ni el desgaste real de sus componentes (Carvalho et al., 2019). En consecuencia, estos enfoques tradicionales no siempre permiten una gestión eficiente del ciclo de vida tecnológico.

Paradójicamente, los sistemas de radiología digital generan de manera continua grandes volúmenes de datos técnicos, tales como registros de uso, variaciones térmicas, cargas eléctricas, eventos de error y parámetros de desempeño. Esta información podría ser analizada mediante modelos de monitoreo predictivo orientados a la detección temprana de anomalías y a la estimación de la vida útil remanente de los componentes. Sin embargo, en muchos contextos institucionales estos datos permanecen subutilizados, lo que evidencia una brecha entre la capacidad tecnológica instalada y su aprovechamiento efectivo para la gestión estratégica del mantenimiento.

Las consecuencias de esta situación incluyen el incremento de los tiempos de inactividad, la interrupción de agendas diagnósticas, la sustitución prematura de componentes de alto costo y la degradación progresiva de la calidad de imagen, manifestada en aumento del ruido o aparición de artefactos. En escenarios más críticos, pueden producirse descalibraciones no detectadas oportunamente que obliguen a repetir estudios y, por ende, incrementen innecesariamente la dosis de radiación al paciente (Si et al., 2020).

En este contexto emerge el mantenimiento predictivo como una alternativa fundamentada en el análisis continuo de variables operativas mediante sensores, algoritmos de aprendizaje automático y sistemas de análisis de datos en tiempo real. Diversos estudios han demostrado que los modelos predictivos permiten anticipar degradaciones funcionales antes de que se manifiesten como fallas críticas, optimizando la disponibilidad operativa y prolongando la vida útil de los equipos (Si et al., 2020).

En este escenario, surge la necesidad de investigar con rigor académico el siguiente interrogante: ¿Cuál es el impacto de la implementación de modelos de monitoreo predictivo en la

disponibilidad operativa y la vida útil de los sistemas de radiología digital?

## Justificación

La presente investigación reviste pertinencia en múltiples dimensiones, tanto técnicas como asistenciales, económicas y académicas, en la medida en que aborda un aspecto crítico para la sostenibilidad y calidad de los servicios de radiología digital.

Desde el ámbito técnico, permite analizar la viabilidad de integrar modelos de mantenimiento basados en la condición operativa real del equipo, superando los esquemas tradicionales que no consideran el comportamiento dinámico de los sistemas digitales. El monitoreo predictivo se perfila como una estrategia capaz de optimizar la estabilidad funcional y prolongar la vida útil de componentes críticos, reduciendo la ocurrencia de fallas imprevistas y los costos asociados a reparaciones de emergencia. En radiología digital, variables como la temperatura del tubo de rayos X, la estabilidad del generador de alta tensión y el rendimiento del detector plano pueden ser monitoreadas en tiempo real, lo que permite identificar posibles desviaciones antes de que impacten de manera significativa la calidad de imagen.

En el plano asistencial, una mayor disponibilidad operativa impacta directamente la continuidad del servicio diagnóstico, disminuyendo cancelaciones de estudios y retrasos en la toma de decisiones clínicas. Asimismo, la detección temprana de fallas técnicas contribuye a preservar la calidad de imagen y a garantizar el cumplimiento del principio de optimización en protección radiológica, minimizando repeticiones innecesarias y exposiciones adicionales para el paciente.

Desde la perspectiva económica e institucional, la implementación de estrategias predictivas favorece una gestión más eficiente de los recursos al reducir los tiempos de inactividad y extender el ciclo de vida de activos tecnológicos de alto valor. Esto resulta

especialmente relevante en entornos hospitalarios donde la sostenibilidad financiera depende en gran medida del uso adecuado y continuo de los equipos biomédicos.

Finalmente, en el ámbito académico y profesional, esta investigación fortalece el rol del tecnólogo en radiología como actor activo en los procesos de control de calidad y gestión tecnológica, trascendiendo la mera operación del equipo para participar en el análisis de datos técnicos y en la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

De esta manera, el estudio no solo responde a una necesidad operativa del sector salud, sino que contribuye al desarrollo de prácticas más seguras, sostenibles y técnicamente fundamentadas en los servicios de radiología digital.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar la incidencia del mantenimiento predictivo en la maximización de la disponibilidad operativa y la extensión de la vida útil de los sistemas de radiología digital, fundamentado en la revisión de literatura científica y normativa técnica vigente.

### **Objetivos Específicos**

Analizar los parámetros técnicos y operativos que intervienen en los procesos de degradación funcional de los sistemas de radiología digital.

Comparar los enfoques de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo en relación con la disponibilidad operativa, la calidad de imagen y la seguridad radiológica.

Describir el papel del monitoreo predictivo y la analítica de datos en la optimización del desempeño y como se organiza el tiempo de vida útil de los equipos radiológicos.

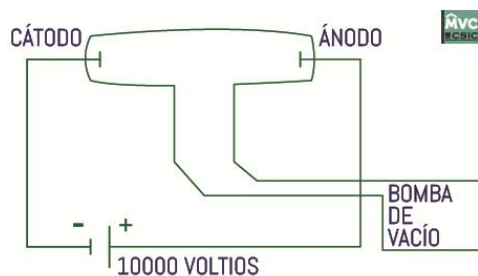
## Marco Teórico

### Fundamentos de la Radiología Digital

La radiología digital constituye el soporte tecnológico sobre el cual se fundamenta la práctica diagnóstica contemporánea. Comprender sus principios físicos, su evolución histórica y los componentes que integran estos sistemas resulta esencial para analizar su desempeño operativo y los factores que inciden en la calidad de imagen. En este contexto, el estudio de la arquitectura tecnológica de la radiografía digital permite identificar cómo la estabilidad funcional de sus elementos se relaciona directamente con la necesidad de estrategias de mantenimiento más avanzadas y basadas en condición.

#### Figura 1.

*Esquema del Funcionamiento del Tubo de Rayos Catódicos*



*Nota.* El aire a presión atmosférica es un buen aislante para conseguir que salte una chispa entre dos electrodos. Es necesario aplicar unos 1000 voltios por milímetro. Cuando la presión del gas se disminuye al máximo, el tubo permanece oscuro y sólo se observa una luminosidad misteriosa en la región opuesta al cátodo. Fuente. López Sancho & Moreno Gómez (2007)

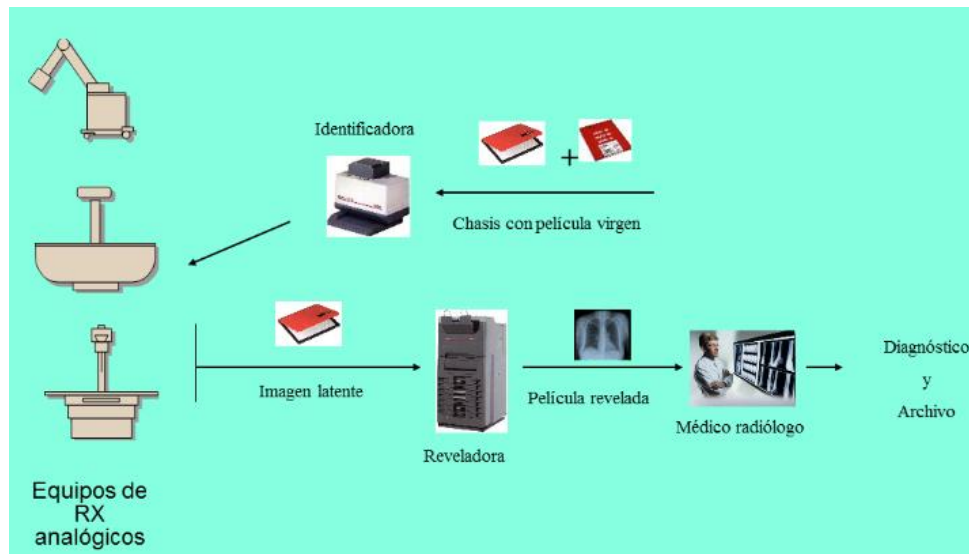
### Evolución de la Radiología Convencional a la Radiología Digital

El advenimiento de la radiología digital representa una de las transformaciones tecnológicas más significativas en la historia de la imagen diagnóstica. Mientras que la radiografía convencional se fundamentaba en sistemas película-pantalla, cuya respuesta estaba

determinada por una curva característica no lineal y un rango dinámico limitado, los sistemas digitales introdujeron detectores capaces de registrar un espectro mucho más amplio de exposiciones (Bushberg et al., 2021).

## Figura 2.

### *Flujo de Trabajo Radiología Convencional*

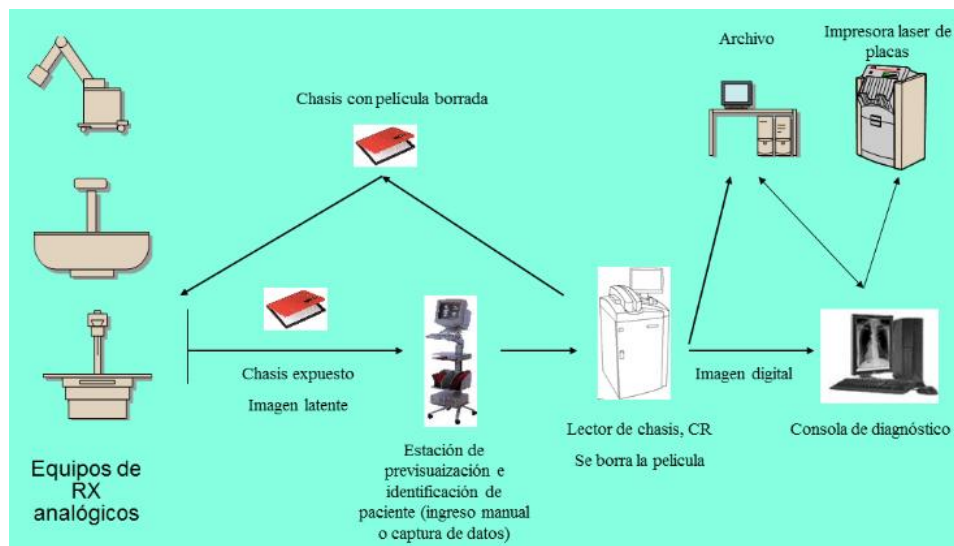


*Nota.* Los sistemas de radiología convencional requerían del uso de sustancias químicas y la adaptación de un cuarto oscuro para poder procesar las imágenes. Fuente IntegralMed (2020)

Sin embargo, la radiología digital reemplaza los sistemas analógicos por detectores digitales capaces de convertir la radiación en señales electrónicas procesables.

Según Bushberg et al. (2021), la estabilidad del sistema depende de la interacción entre el generador de rayos X, el tubo de rayos X, el detector digital y el software de procesamiento.

La degradación progresiva de cualquiera de estos componentes puede afectar la calidad diagnóstica antes de generar una falla total.

**Figura 3.***Flujo de Trabajo en Radiología Digital*

*Nota.* La transición a radiología digital favoreció aspectos como la interoperabilidad y la gestión de imágenes en los servicios de radiología. Fuente. IntegralMed (2020)

Esta transición no constituyó únicamente un cambio en el soporte físico de la imagen, sino una modificación profunda en la cadena de adquisición, procesamiento, almacenamiento y visualización. En los sistemas digitales, la señal radiográfica es convertida en datos numéricos susceptibles de procesamiento algorítmico, lo que permite optimizar contraste, brillo y resolución mediante herramientas de post-procesamiento (Seibert et al., 2018).

Sin embargo, esta amplia latitud de exposición, aunque ventajosa desde el punto de vista operativo, introdujo nuevos desafíos en términos de control de calidad y optimización de dosis, dado que una imagen técnicamente sobreexpuesta puede aparentar una calidad diagnóstica aceptable tras su procesamiento digital (IAEA, 2022).

## Sistemas de Radiografía Computarizada y Radiografía Digital Directa

En el contexto de la radiología digital, es fundamental distinguir entre Radiografía Computarizada (CR) y Radiografía Digital Directa (DR), puesto que sus principios físicos condicionan el comportamiento del sistema y su desempeño operativo.

La radiografía computarizada emplea placas de fósforo fotoestimulable que almacenan energía tras la exposición a rayos X. Posteriormente, un láser estimula la placa para liberar la señal luminosa que será digitalizada (Bushberg et al., 2021). Aunque esta tecnología facilitó la transición desde sistemas analógicos, presenta limitaciones relacionadas con ruido electrónico y eficiencia cuántica.

### Figura 4.

#### *Equipo de Radiología Digital Directa*



*Nota.* El avance más significativo de la radiología digital directa es el proceso de transformación de los rayos X, mejorando la resolución espacial y reduciendo la dispersión de la señal. Fuente. Intemed (2025)

Por su parte, la radiografía digital directa utiliza detectores de panel plano (Flat Panel Detectors, FPD), los cuales pueden operar mediante conversión indirecta (usualmente con

yoduro de cesio) o conversión directa (con selenio amorfo). En la conversión indirecta, los rayos X se transforman primero en luz y posteriormente en señal eléctrica; en la conversión directa, la radiación se convierte directamente en carga eléctrica, lo que mejora la resolución espacial y reduce la dispersión lateral de la señal (Samei & Peck, 2014).

Estas diferencias tecnológicas influyen directamente en parámetros como la eficiencia cuántica de detección (DQE), el ruido estructural y la estabilidad del sistema, elementos que serán determinantes al analizar la necesidad de programas avanzados de mantenimiento y monitoreo.

En los sistemas de radiografía computarizada (CR), el proceso de formación de la imagen se desarrolla en varias etapas. Inicialmente, los rayos X interactúan con una placa de fósforo fotoestimulable que almacena la energía de la radiación incidente en forma de electrones atrapados en estados de energía metaestables. Posteriormente, durante el proceso de lectura, un láser estimula la placa liberando esta energía en forma de luz visible, la cual es captada por un fotomultiplicador que convierte la señal luminosa en una señal eléctrica. Finalmente, esta señal es digitalizada mediante un conversor analógico-digital y procesada por el sistema informático para generar la imagen diagnóstica.

En contraste, en los sistemas de radiografía digital directa (DR) el proceso ocurre de manera prácticamente inmediata. Los detectores de panel plano transforman la radiación en señal eléctrica sin necesidad de una etapa intermedia de lectura. En los sistemas de conversión indirecta, los rayos X se transforman primero en luz mediante un centellador, generalmente yoduro de cesio, y posteriormente en señal eléctrica mediante fotodiodos. En los sistemas de conversión directa, la radiación se convierte directamente en carga eléctrica mediante materiales

fotoconductores como el selenio amorfo. Esta señal es posteriormente amplificada, digitalizada y procesada por el software del sistema para producir la imagen final (Bushberg et al., 2021).

### **Detectores Digitales y Eficiencia Cuántica de Detección**

La Eficiencia Cuántica de Detección (Detective Quantum Efficiency, DQE) constituye una de las métricas más relevantes para evaluar el rendimiento de un detector digital. Este parámetro expresa la capacidad del sistema para convertir los fotones incidentes en señal útil, preservando la relación señal-ruido (SNR) (Bushberg et al., 2021).

Un detector con alto DQE permite obtener imágenes diagnósticas con menor dosis de radiación, ya que aprovecha de manera más eficiente los fotones incidentes. En contraste, una degradación progresiva del detector que sea por envejecimiento, daño en píxeles o alteraciones electrónicas, puede disminuir la DQE y comprometer la calidad de imagen, obligando indirectamente a aumentar la exposición para compensar la pérdida de señal (Seibert et al., 2018).

En este sentido, la estabilidad del detector no solo constituye un asunto técnico, sino un componente esencial de la seguridad radiológica y de la optimización de dosis en el entorno clínico.

### **Parámetros Físicos de la Calidad de Imagen en Radiología Digital**

La calidad de imagen en radiología digital se encuentra determinada por una serie de parámetros físicos que describen el desempeño técnico del sistema. Estos indicadores no solo permiten evaluar la capacidad diagnóstica del equipo, sino que también constituyen variables sensibles ante procesos de degradación progresiva. En consecuencia, el análisis de estos parámetros resulta fundamental para comprender cómo las estrategias de mantenimiento influyen

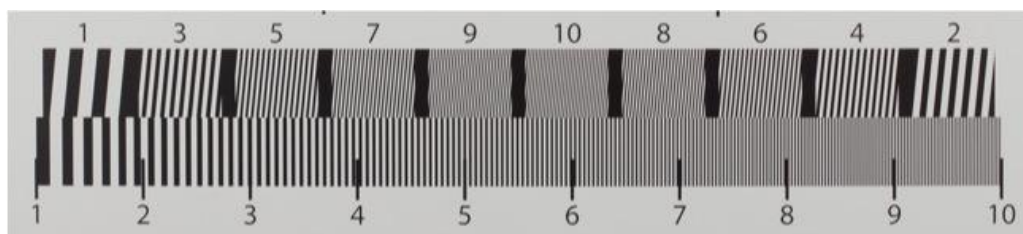
en la estabilidad funcional y en la optimización de la dosis radiológica. Entre los más relevantes se encuentran

### ***Resolución Espacial***

La resolución espacial describe la capacidad del sistema para diferenciar estructuras pequeñas y próximas entre sí. Se cuantifica mediante la Función de Transferencia de Modulación (MTF), la cual evalúa cómo el sistema preserva el contraste a distintas frecuencias espaciales (Samei & Peck, 2014).

### **Figura 5.**

#### ***Resolución Espacial***



*Nota.* La resolución espacial está determinada por la borrosidad. Al aumentar la borrosidad o disminuir la distancia que separa dos estructuras físicamente diferentes, éstas empiezan a aparecer juntas. Fuente. Sociedad Española de Radiología Médica, SERAM. (2012)

### ***Resolución de Contraste***

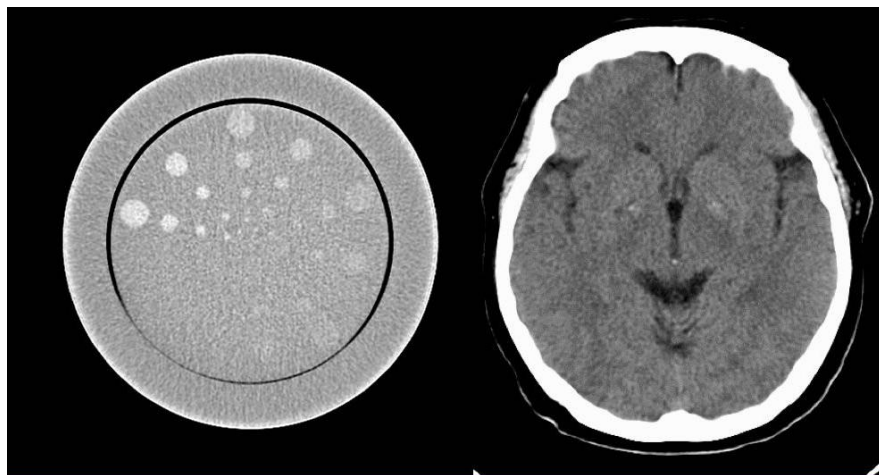
La resolución de contraste se refiere a la capacidad del sistema de imagen para diferenciar estructuras que presentan pequeñas variaciones en coeficiente de atenuación. En radiología digital, este parámetro depende tanto de factores físicos relacionados con la interacción de los rayos X con los tejidos como del procesamiento electrónico y algorítmico posterior a la adquisición.

A diferencia de los sistemas película-pantalla, la radiografía digital dispone de un rango dinámico amplio, lo que permite registrar un espectro más extenso de exposiciones sin pérdida

inmediata de información. Sin embargo, esta ventaja tecnológica introduce el riesgo de “sobreexposición silenciosa”, fenómeno en el cual una imagen técnicamente sobreexpuesta mantiene apariencia diagnóstica aceptable tras el post-procesamiento, aunque implique incremento innecesario de dosis al paciente (Bushberg et al., 2021).

### **Figura 6.**

#### *Resolución de Contraste*



*Nota.* La resolución de contraste es útil para distinguir estructuras con densidad similar. Actualmente es crucial en el entorno de la tomografía. Fuente. Sociedad Española de Enfermedades Cardíacas (2024)

Desde el punto de vista físico, la resolución de contraste está influenciada por, el kilovoltaje (kVp), que determina la energía del haz y, por tanto, el contraste radiográfico, la filtración total del sistema y la estabilidad de la capa hemirreductora (HVL), la eficiencia cuántica de detección (DQE) del panel digital, y los algoritmos de procesamiento aplicados por el software.

Una variación no detectada en el kVp o en la filtración del tubo puede modificar el espectro energético del haz, alterando el contraste intrínseco de la imagen. De igual manera,

fallas progresivas en el generador de alta tensión pueden generar fluctuaciones en el potencial aplicado, produciendo inconsistencias en la calidad diagnóstica.

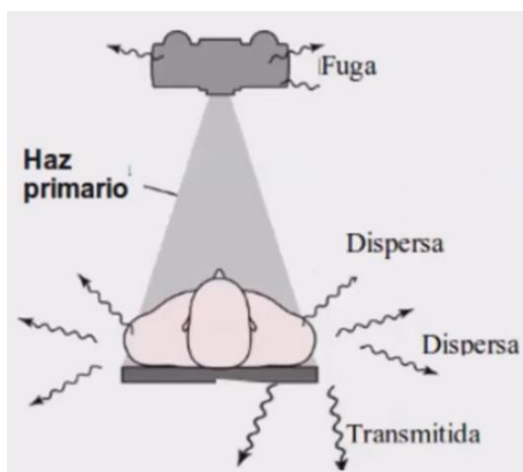
En este sentido, la estabilidad del contraste no depende exclusivamente del operador, sino de la integridad eléctrica y electrónica del sistema. El mantenimiento predictivo adquiere relevancia al permitir el monitoreo continuo de parámetros como estabilidad del generador, rendimiento térmico del tubo y comportamiento del detector, evitando desviaciones progresivas que afecten la diferenciación tisular y puedan conducir a repeticiones innecesarias.

### ***Relación Señal-Ruido (SNR)***

La relación señal-ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR) representa la proporción entre la señal útil generada por los fotones detectados y las fluctuaciones aleatorias que constituyen el ruido. En radiología digital, la calidad de imagen se encuentra directamente condicionada por esta relación, dado que una disminución de la SNR se traduce en pérdida de detalle fino y menor capacidad de discriminación estructural.

### **Figura 7.**

#### *Relación Señal Ruido*



*Nota.* La relación señal ruido está relacionada con la capacidad de discriminación de las estructuras. Fuente. Schaefer-Prokop & Uffmann (2019)

El ruido en sistemas digitales puede clasificarse en, ruido cuántico, derivado de la naturaleza estadística de la interacción de los fotones con el detector, ruido electrónico, generado por los circuitos de amplificación y conversión analógica-digital, ruido estructural, asociado a irregularidades físicas del detector o defectos en píxeles.

La SNR aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada del número de fotones detectados, lo que implica que, en condiciones ideales, un incremento de dosis mejora la relación señal-ruido. Sin embargo, el principio de optimización radiológica exige obtener la máxima calidad diagnóstica con la mínima dosis razonablemente posible, por lo que la eficiencia del sistema resulta determinante (IAEA, 2018).

Una degradación progresiva del detector, la aparición de píxeles defectuosos o la inestabilidad del generador pueden alterar la señal útil o incrementar el ruido electrónico, disminuyendo la SNR sin que la falla sea inmediatamente evidente. En tales casos, el operador podría compensar inconscientemente aumentando parámetros de exposición, generando incremento dosimétrico acumulativo.

El mantenimiento predictivo permite identificar tendencias anómalas en el comportamiento del detector y en los registros eléctricos del generador antes de que la disminución de la SNR comprometa significativamente la calidad de imagen. El monitoreo continuo de métricas de desempeño facilita intervenciones oportunas orientadas a preservar la estabilidad técnica y evitar deterioro progresivo del rendimiento diagnóstico.

### **Artefactos en Radiología Digital y su Relación con el Mantenimiento del Sistema**

Los artefactos en radiología digital corresponden a estructuras o patrones presentes en la imagen que no representan anatomía real del paciente, sino alteraciones derivadas del sistema de adquisición, procesamiento o almacenamiento. Su aparición puede comprometer la calidad

diagnóstica, inducir interpretaciones erróneas o generar repeticiones innecesarias, incrementando la dosis al paciente (Bushberg et al., 2021).

A diferencia de los sistemas convencionales, en los entornos digitales los artefactos suelen estar asociados a fallas electrónicas, defectos del detector o descalibraciones progresivas que pueden pasar inadvertidas si no se implementan programas sistemáticos de control de calidad.

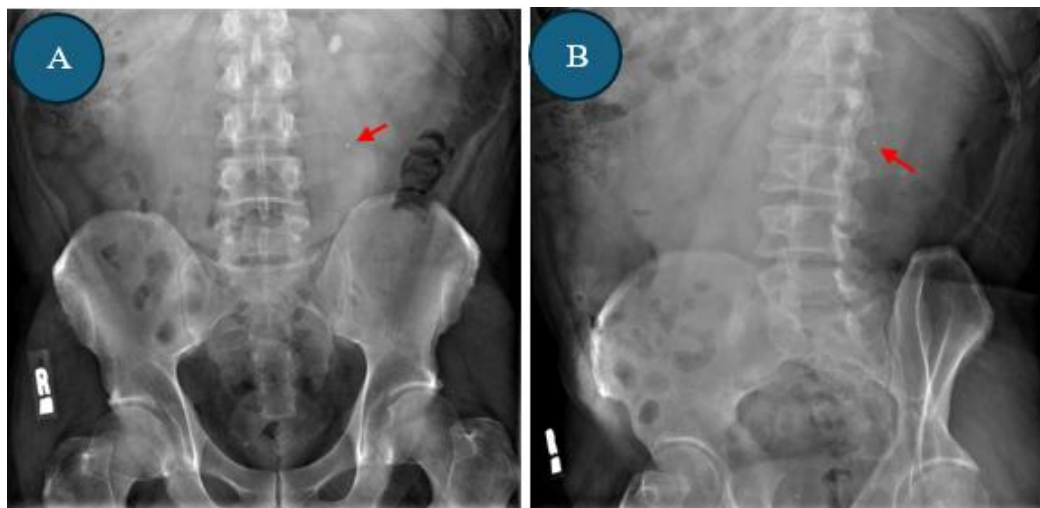
Entre los artefactos más comunes se encuentran:

### ***Píxeles Defectuosos (Dead Pixels o Hot Pixels)***

Se producen cuando uno o varios elementos del detector pierden su capacidad de respuesta adecuada ante la radiación incidente. Un píxel muerto no genera señal, mientras que un píxel caliente produce señal constante independientemente de la exposición. Estos defectos pueden originarse por envejecimiento del panel, daño electrónico o fallas en la matriz de transistores (Seibert et al., 2018).

Cuando no se corrigen mediante algoritmos de compensación o calibración (flat-fielding), pueden manifestarse como puntos brillantes u oscuros persistentes en la imagen.

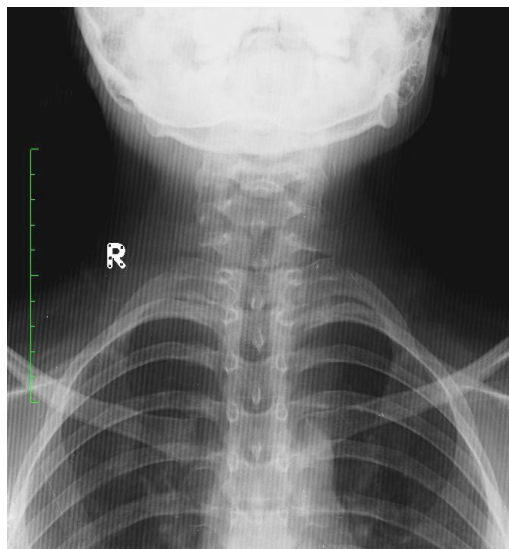
En la imagen A y B Hay una gran lesión calcificada sobre el riñón izquierdo. También hay un artefacto redondo, pero está fijo y en el mismo punto o píxel en las dos imágenes, por lo que es un píxel muerto o quemado el que causa este artefacto.

**Figura 8.***Artefacto de Pixel Muerto*

*Nota.* La imagen A corresponde a una radiografía de abdomen en vista anteroposterior y la imagen B a una vista oblicua derecha. Fuente. Radiopaedia.org.

*Artefactos de Líneas o Bandas*

Las líneas verticales u horizontales pueden aparecer debido a fallas en columnas o filas del detector, problemas en circuitos de lectura o conexiones defectuosas. En sistemas DR, este fenómeno suele relacionarse con alteraciones en la matriz de transistores de película delgada (TFT). Su presencia recurrente puede indicar deterioro progresivo del panel plano (Bushberg et al., 2021).

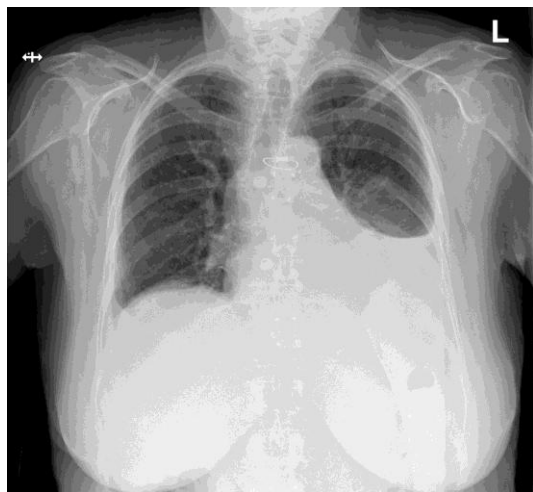
**Figura 9.***Artefacto de Líneas en Radiografía de Columna Cervical*

*Nota.* Se observa un artefacto de líneas de cuadrícula (rayas verticales alternas). Fuente.

Radiopedia.org

***Artefacto de Ghosting (Imagen Residual)***

Más frecuente en sistemas de radiografía computarizada (CR), ocurre cuando la placa de fósforo fotoestimulable no libera completamente la energía almacenada tras una exposición previa. Esto genera una imagen residual superpuesta en estudios posteriores. Puede producirse por insuficiente borrado de la placa o por exposición previa a altas dosis (IAEA, 2018).

**Figura 10.***Artefacto Fantasma de Fémur en Radiografía de Tórax*

*Nota.* En la proyección frontal, hay un artefacto fantasma con un fémur proximal izquierdo que se proyecta sobre el tórax izquierdo. Fuente. Radiopedia.org

***Artefactos por Descalibración (Flat-Field)***

El flat-fielding es un proceso de calibración que corrige variaciones de sensibilidad entre los píxeles del detector. Cuando esta calibración no se realiza periódicamente, pueden aparecer patrones de no uniformidad, sombreado o variaciones de brillo que afectan la homogeneidad de la imagen (ACR, 2023).

**Figura 11.***Defecto por Calibración de Flat*

*Nota.* Los defectos por calibración afectan en gran medida la homogeneidad de la imagen.

Fuente. Parra (2009)

La falta de mantenimiento preventivo o predictivo puede favorecer la aparición progresiva de este tipo de artefactos.

### ***Artefactos Electrónicos o de Ruido Estructural***

Alteraciones en el generador de alta tensión, fluctuaciones en el kilovoltaje (kVp) o inestabilidad en el suministro eléctrico pueden generar incremento de ruido electrónico o patrones irregulares en la señal. Estos artefactos suelen estar relacionados con desgaste de componentes internos del generador o del tubo de rayos X.

### **Figura 12.**

#### ***Artefacto Electrónico***



*Nota.* El artefacto electrónico está comúnmente ligado a defectos de los generadores. Fuente. Radiopedia.org

### **Relación entre Artefactos y Mantenimiento Predictivo**

La presencia sostenida o creciente de artefactos no debe interpretarse únicamente como un evento aislado de calidad de imagen, sino como un posible indicador temprano de deterioro del sistema. En este sentido, el monitoreo continuo de parámetros operativos, junto con el análisis de tendencias en la aparición de defectos del detector, permite anticipar fallas mayores antes de que se traduzcan en inactividad del equipo.

El mantenimiento predictivo, apoyado en registros de desempeño y telemetría del sistema, facilita la detección temprana de desviaciones en la uniformidad del detector, estabilidad del generador y comportamiento térmico del tubo, reduciendo tiempos de inactividad y optimizando la vida útil del equipo.

Por tanto, la gestión adecuada de artefactos no solo mejora la calidad diagnóstica, sino que constituye un componente esencial dentro de las estrategias modernas de control de calidad y gestión tecnológica en radiología digital.

### **Bases Teóricas Conceptuales**

El análisis del mantenimiento predictivo en radiología digital requiere un abordaje conceptual que integre fundamentos de ingeniería, gestión hospitalaria y física médica. Más allá de los aspectos técnicos, resulta necesario examinar los marcos teóricos que sustentan la disponibilidad operativa, la gestión del ciclo de vida tecnológico y los modelos contemporáneos de mantenimiento basado en condición. Esta sección desarrolla los conceptos que permiten estructurar la relación entre monitoreo predictivo, desempeño operativo y sostenibilidad tecnológica.

### **Radiología Digital y Complejidad Tecnológica**

La radiología digital constituye una evolución sustancial respecto a los sistemas analógicos convencionales, al integrar detectores de panel plano, generadores de alta frecuencia, estaciones de procesamiento y sistemas de almacenamiento y comunicación de imágenes (PACS). Esta transformación tecnológica ha optimizado la calidad diagnóstica y reducido los tiempos de adquisición y procesamiento de imágenes.

Según la International Atomic Energy Agency (IAEA, 2018), los sistemas digitales requieren programas estructurados de aseguramiento de la calidad que incluyan verificación

periódica del desempeño, monitoreo de parámetros técnicos y control sistemático de los detectores. De igual manera, el American College of Radiology (ACR, 2022) enfatiza que la estabilidad funcional de los componentes electrónicos y del procesamiento digital es determinante para mantener estándares diagnósticos adecuados.

Bushberg et al. (2021) señalan que los sistemas modernos de radiografía digital presentan una arquitectura electrónica compleja cuya degradación puede ser progresiva y difícil de identificar mediante inspecciones convencionales. Esta complejidad tecnológica exige estrategias de mantenimiento más sofisticadas que superen los modelos tradicionales.

### **Disponibilidad Operativa en Equipos Biomédicos**

La disponibilidad operativa se define como el porcentaje de tiempo en que un equipo permanece funcional y apto para el uso clínico. Este indicador depende del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio de reparación (MTTR).

La World Health Organization (WHO, 2011) establece que la gestión eficiente del mantenimiento de equipos médicos es un componente esencial para garantizar continuidad asistencial y seguridad del paciente. En concordancia, la IAEA (2018) sostiene que la falta de programas sistemáticos de mantenimiento impacta negativamente la confiabilidad tecnológica y la calidad del servicio diagnóstico.

En este sentido, el monitoreo predictivo permite intervenir antes de que el desgaste acumulado provoque daño irreversible, extendiendo la vida funcional del equipo (Lee et al., 2019).

En radiología digital, una disminución en la disponibilidad operativa no solo afecta la productividad institucional, sino que puede generar retrasos diagnósticos y sobrecarga en otros sistemas del servicio.

## **Enfoques de Mantenimiento en Equipos Biomédicos**

El mantenimiento en equipos biomédicos ha evolucionado desde enfoques reactivos hacia modelos estratégicos orientados a la gestión del riesgo tecnológico y la optimización del desempeño operativo. En sistemas de radiología digital, donde convergen componentes electromecánicos, electrónicos y de procesamiento digital, el mantenimiento no solo busca evitar fallas, sino preservar la estabilidad de parámetros críticos que inciden directamente en la calidad diagnóstica (Jardine et al., 2006).

El mantenimiento correctivo, aunque necesario ante fallas imprevistas, representa el modelo menos eficiente en entornos hospitalarios de alta demanda. La intervención posterior a la avería puede generar interrupciones prolongadas del servicio, afectación en la agenda diagnóstica y posibles desviaciones en la calidad de imagen antes de la falla total del sistema.

El mantenimiento preventivo, basado en cronogramas periódicos definidos por horas de uso o recomendaciones del fabricante, permite reducir la probabilidad de fallas catastróficas. No obstante, su limitación radica en que no siempre considera la condición real del equipo, pudiendo generar intervenciones innecesarias o no detectar degradaciones progresivas entre periodos programados (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018).

En el contexto actual, el mantenimiento basado en condición (Condition-Based Maintenance, CBM) y el mantenimiento predictivo representan enfoques más avanzados. Estos modelos utilizan indicadores operativos como estabilidad del kilovoltaje (kVp), variaciones térmicas del ánodo, registros de carga del tubo de rayos X y comportamiento del detector para anticipar posibles fallas. En radiología digital, pequeñas desviaciones en estos parámetros pueden afectar progresivamente la relación señal-ruido, la resolución de contraste y la uniformidad de la imagen antes de generar una interrupción evidente.

Por tanto, el enfoque de mantenimiento adoptado influye directamente en la calidad de imagen, la seguridad radiológica y la vida útil de los equipos.

### ***Mantenimiento Correctivo***

El mantenimiento correctivo se realiza posterior a la aparición de una falla. Aunque representa una intervención necesaria cuando ocurre un daño inesperado, este enfoque genera tiempos prolongados de inactividad, cancelación de estudios diagnósticos y mayores costos asociados a reparaciones urgentes. Además, puede comprometer la calidad de imagen antes de que la falla sea evidente (Carvalho et al., 2019).

### ***Mantenimiento Preventivo***

El mantenimiento preventivo se basa en cronogramas periódicos establecidos por el fabricante o por normativas institucionales. Incluye revisiones técnicas, calibraciones y reemplazo programado de componentes. Si bien reduce la probabilidad de fallas críticas, no siempre considera el estado real del equipo, lo que puede generar intervenciones innecesarias o, por el contrario, no detectar deterioros entre periodos programados (IAEA, 2018).

### ***Mantenimiento Predictivo***

El mantenimiento predictivo se fundamenta en el monitoreo continuo de variables como temperatura del ánodo, estabilidad del kilovoltaje (kVp), carga del tubo y rendimiento del detector. Mediante el análisis de tendencias y modelos algorítmicos, permite anticipar fallas antes de que se manifiesten como eventos críticos (Si et al., 2020).

En radiología digital, este enfoque resulta particularmente relevante, dado que pequeñas desviaciones en la estabilidad eléctrica o en la sensibilidad del detector pueden afectar progresivamente la relación señal-ruido, la resolución de contraste y la uniformidad de la imagen, incluso antes de producir una interrupción total del servicio.

Desde una perspectiva de gestión tecnológica, el mantenimiento predictivo no solo mejora la disponibilidad operativa, sino que contribuye a prolongar la vida útil de componentes de alto costo y a reducir exposiciones innecesarias derivadas de repeticiones técnicas.

**Tabla 1.**

*Comparación de los Enfoques de Mantenimiento en Sistemas de Radiología Digital*

<b>Tipo</b>	<b>Momento</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Calidad</b>	<b>Vida útil</b>	<b>Costos</b>
<b>Correctivo</b>	Después de la falla.	Baja disponibilidad por tiempos de inactividad no planificados.	Puede haber deterioro progresivo antes de detectarse.	Reduce la vida útil por desgaste no controlado.	Altos y no planificados.
<b>Preventivo</b>	En intervalos programados.	Mejora moderadamente la disponibilidad.	Mantiene estabilidad si el cronograma es adecuado.	Prolonga parcialmente la vida útil.	Costos planificados, pero no optimizados.
<b>Predictivo</b>	Antes de la falla, basado en monitoreo.	Alta disponibilidad operativa.	Detecta desviaciones tempranas que afectan contraste, SNR y uniformidad	Maximiza la vida útil al intervenir según condición real.	Optimización de costos a largo plazo.

*Nota.* Autoría propia. Aunque actualmente el mantenimiento predictivo ha cobrado relevancia, la mayoría de las instituciones basan el mantenimiento en la programación por fechas y corrección de fallas.

## **Modelos de Monitoreo Predictivo y Analítica Avanzada**

El monitoreo predictivo se fundamenta en el análisis continuo de datos operativos generados por el propio sistema. Los equipos modernos de radiología digital registran variables como número de exposiciones, carga acumulada del tubo, temperatura del ánodo, estabilidad del generador, indicadores de exposición (EI) y eventos de error. Estos datos pueden ser procesados mediante modelos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático orientados a detectar patrones anómalos (Carvalho et al., 2019).

Desde el punto de vista técnico, los modelos predictivos aplican técnicas como análisis de tendencias, regresión multivariable y redes neuronales para estimar la probabilidad de falla y el tiempo restante de vida útil (Remaining Useful Life, RUL) (Si et al., 2020). En radiología digital, esto permite identificar degradación progresiva del detector, detectar inestabilidad en el generador de alta tensión, anticipar desgaste del tubo de rayos X y reconocer incrementos anómalos en la tasa de rechazo de imágenes.

La integración de telemetría y diagnóstico remoto por parte del fabricante fortalece estos modelos, permitiendo supervisión continua del desempeño del equipo y generación de alertas tempranas ante desviaciones técnicas.

En términos de calidad diagnóstica, el monitoreo predictivo reduce la probabilidad de deterioro silencioso del contraste, aumento progresivo del ruido o aparición recurrente de artefactos, contribuyendo a la optimización de dosis y a la continuidad asistencial.

### **Parámetros Técnicos Críticos en el Monitoreo Predictivo**

En los sistemas de radiología digital, el mantenimiento predictivo se apoya en la supervisión continua de parámetros técnicos cuya estabilidad resulta determinante para la calidad diagnóstica y la protección radiológica. La detección temprana de desviaciones en estos

indicadores permite intervenir antes de que se produzcan fallas críticas o incrementos innecesarios de dosis.

### ***Degradación de la Capa Hemirreductora (HVL)***

La Capa Hemirreductora (Half-Value Layer, HVL) representa el espesor de material necesario para reducir a la mitad la intensidad del haz de rayos X. Este parámetro refleja la calidad energética del haz y está directamente relacionado con la filtración total del tubo (Bushberg et al., 2021).

Si la filtración inherente o añadida del tubo se deteriora por desgaste o daño físico, el haz puede contener mayor proporción de fotones de baja energía. Estos fotones contribuyen a aumentar la dosis en piel del paciente sin mejorar la información diagnóstica. Por ello, la monitorización periódica de la HVL permite identificar fallas en la filtración y prevenir exposiciones innecesarias (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018).

### ***Estabilidad del Generador***

El generador de alta tensión controla parámetros esenciales como el kilovoltaje (kVp), el miliamperaje (mA) y el tiempo de exposición (ms). Variaciones en estos parámetros, derivadas del desgaste de componentes electrónicos o fluctuaciones en el suministro eléctrico, pueden alterar la consistencia del haz (Bushberg et al., 2021).

Una inestabilidad en el kVp puede modificar el contraste radiográfico, mientras que variaciones en el tiempo de exposición pueden aumentar el ruido cuántico o producir imágenes subexpuestas, obligando a repetir el estudio. El monitoreo predictivo permite analizar tendencias en la exactitud y reproducibilidad del generador, reduciendo repeticiones técnicas y optimizando la dosis.

### ***Calibración del Detector (Flat-Fielding)***

El flat-fielding es un procedimiento de calibración que corrige las variaciones de sensibilidad entre los píxeles del detector digital. Con el tiempo, pueden aparecer píxeles defectuosos, pérdida de uniformidad o disminución progresiva de la eficiencia cuántica de detección (DQE) (Seibert et al., 2018).

Cuando no se realiza una calibración adecuada, estas alteraciones se manifiestan como artefactos estructurales o patrones de no uniformidad en la imagen. El mantenimiento predictivo permite detectar incrementos anómalos en píxeles defectuosos antes de que afecten significativamente la interpretación diagnóstica.

### **Software de Gestión de Dosis (Dose Tracking)**

Los sistemas de gestión de dosis constituyen herramientas informáticas diseñadas para registrar, analizar y optimizar la exposición a radiación en los procedimientos de diagnóstico por imágenes. Estos programas recopilan automáticamente información proveniente de los equipos de radiología digital, como parámetros de exposición, indicadores de dosis y características del estudio realizado, permitiendo generar bases de datos que facilitan el seguimiento sistemático de las prácticas radiológicas.

A partir del análisis de estos datos, el software puede identificar desviaciones en los protocolos establecidos, detectar exposiciones superiores a los niveles de referencia diagnósticos y generar alertas cuando se presentan variaciones significativas en los parámetros de adquisición. De esta manera, estas plataformas contribuyen a la implementación del principio de optimización en protección radiológica, permitiendo ajustar los protocolos técnicos y reducir exposiciones innecesarias tanto para el paciente como para el personal de salud.

Entre los sistemas de gestión de dosis más utilizados en instituciones hospitalarias se encuentran plataformas como Radimetrics (Bayer), DoseWatch (GE Healthcare) y DoseWise (Philips Healthcare), las cuales integran herramientas de análisis estadístico, generación de reportes automáticos y monitoreo continuo del desempeño de los equipos. La implementación de estos sistemas facilita la supervisión de tendencias de exposición, el control de calidad de los procedimientos y el soporte a programas de mejora continua en los servicios de radiología (Seeram, 2019; IAEA, 2018).

### **Telemetría y Diagnóstico Remoto**

La telemetría en sistemas de radiología digital consiste en la transmisión continua y automatizada de datos técnicos del equipo hacia plataformas de supervisión remota, generalmente administradas por el fabricante o por el departamento de ingeniería biomédica institucional. Esta tecnología permite el monitoreo en tiempo real de variables críticas asociadas al desempeño del sistema.

Uno de los componentes más relevantes dentro de este esquema es el tubo de rayos X. La telemetría posibilita supervisar parámetros como la carga térmica acumulada del ánodo, el número total de exposiciones, los ciclos de calentamiento y enfriamiento, y la estabilidad de la corriente del filamento. El calentamiento excesivo del ánodo puede generar microfisuras, desgaste prematuro o incluso falla catastrófica del tubo si no se controla adecuadamente (Bushberg et al., 2021).

Asimismo, el monitoreo continuo de la carga del tubo permite identificar patrones de uso que superen las especificaciones recomendadas por el fabricante, anticipando la necesidad de intervención antes de que se produzca una avería que interrumpa el servicio clínico.

Desde la perspectiva del mantenimiento predictivo, la telemetría facilita la detección temprana de desviaciones en el comportamiento del generador o del tubo, reduciendo tiempos de inactividad no planificados y optimizando la planificación de reemplazos. Esta capacidad resulta especialmente relevante en entornos hospitalarios de alta demanda, donde la indisponibilidad del equipo impacta directamente la continuidad diagnóstica.

Además, el diagnóstico remoto permite al fabricante analizar códigos de error, variaciones eléctricas y eventos inusuales sin necesidad de desplazamiento inmediato, acortando tiempos de respuesta técnica y disminuyendo costos operativos (Carvalho et al., 2019).

En conjunto, la telemetría no solo fortalece la gestión del mantenimiento, sino que contribuye indirectamente a preservar la calidad de imagen y a prolongar la vida útil del sistema, al intervenir oportunamente sobre componentes sometidos a mayor estrés térmico y eléctrico.

### **Vida Útil de los Sistemas de Radiología Digital**

La vida útil de un sistema de radiología digital no se limita a la durabilidad física de sus componentes, sino que está determinada por la estabilidad funcional y la capacidad del equipo para mantener parámetros de calidad diagnóstica dentro de rangos aceptables.

Componentes críticos como el tubo de rayos X presentan una vida útil asociada a la carga térmica acumulada, número de exposiciones y condiciones de enfriamiento. De manera similar, los detectores digitales pueden experimentar degradación progresiva de píxeles, pérdida de sensibilidad o alteraciones en la eficiencia cuántica de detección (DQE) con el tiempo (Bushberg et al., 2021).

Factores que influyen en la vida útil incluyen intensidad y frecuencia de uso, condiciones ambientales (temperatura y humedad), estabilidad del suministro eléctrico y calidad del programa de mantenimiento implementado.

La literatura evidencia que los modelos predictivos permiten extender la vida útil al intervenir componentes en función de su condición real y no únicamente por cronograma fijo (Jardine et al., 2006). Esto evita tanto el reemplazo prematuro como el desgaste excesivo no detectado.

Desde la perspectiva institucional, prolongar la vida útil sin comprometer la calidad de imagen implica optimización de recursos financieros y reducción del riesgo clínico. En este sentido, el mantenimiento predictivo se posiciona como un elemento estratégico dentro de la gestión tecnológica hospitalaria moderna.

### **Control de Calidad y Monitoreo del Desempeño en Radiología Digital**

La estabilidad funcional de los sistemas de radiología digital no depende únicamente de la calidad intrínseca de sus componentes, sino de la implementación sistemática de programas de control de calidad orientados a garantizar el desempeño óptimo del equipo a lo largo de su ciclo de vida. Diversos organismos internacionales han establecido lineamientos técnicos que enfatizan la necesidad de realizar pruebas periódicas y análisis continuos para preservar la calidad de imagen y la seguridad radiológica (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018; American College of Radiology [ACR], 2022).

### **Pruebas de Aceptación y Pruebas de Constancia**

Las pruebas de aceptación constituyen evaluaciones técnicas realizadas tras la instalación de un equipo nuevo o posterior a una intervención mayor. Su finalidad es verificar que el sistema cumple con las especificaciones del fabricante y con los estándares normativos vigentes antes de su puesta en servicio clínico (IAEA, 2018).

Por su parte, las pruebas de constancia son evaluaciones periódicas orientadas a comprobar que el desempeño del equipo se mantiene estable en el tiempo. Estas pruebas

incluyen la verificación de parámetros como exactitud del kilovoltaje (kVp), reproducibilidad del tiempo de exposición, linealidad de la dosis, uniformidad del detector y calibración del sistema (ACR, 2023).

La ausencia de un programa estructurado de pruebas de constancia puede permitir la degradación progresiva de componentes críticos sin detección oportuna, lo que incrementa el riesgo de pérdida de calidad diagnóstica y aumento innecesario de dosis al paciente.

### **Indicadores de Exposición (Exposure Index, EI)**

En radiología digital, el Indicador de Exposición (EI) representa un parámetro numérico que estima la cantidad de radiación que alcanza el detector durante una adquisición. A diferencia de los sistemas analógicos, donde la densidad óptica reflejaba indirectamente la exposición, en los sistemas digitales la imagen puede ajustarse mediante postprocesamiento, lo que hace indispensable contar con un indicador cuantitativo objetivo (IAEA, 2018).

Los indicadores de exposición (Exposure Index, EI) son parámetros numéricos que reflejan la cantidad de radiación que alcanza el detector durante la adquisición de la imagen radiográfica. Estos valores permiten evaluar si la técnica empleada se encuentra dentro de los rangos adecuados para obtener una imagen diagnóstica con una dosis apropiada para el paciente.

En los sistemas de radiografía digital, el EI se utiliza como una herramienta de control que ayuda al personal de radiología a verificar la consistencia de los parámetros de exposición aplicados en cada estudio. Valores excesivamente altos pueden indicar sobreexposición, mientras que valores demasiado bajos pueden asociarse a imágenes con alto nivel de ruido, lo que compromete la calidad diagnóstica. Por esta razón, el seguimiento sistemático de los indicadores de exposición constituye una práctica fundamental dentro de los programas de control de calidad y optimización de dosis en radiología digital (Bushberg et al., 2012; Seibert & Morin, 2011).

## **Análisis de Rechazo de Imágenes**

El análisis de rechazo de imágenes consiste en la evaluación sistemática de estudios repetidos o descartados debido a fallas técnicas o calidad insuficiente. Este indicador constituye una herramienta clave para la mejora continua, ya que permite identificar tendencias relacionadas con errores de posicionamiento, parámetros inadecuados o deficiencias del equipo (ACR, 2023).

En sistemas digitales, el análisis de rechazo adquiere mayor relevancia debido a la posibilidad de que imágenes técnicamente inadecuadas sean procesadas y aparenten aceptabilidad diagnóstica. Un incremento sostenido en la tasa de repetición puede ser indicativo de problemas en la calibración del detector, inestabilidad del generador o fallas emergentes en el tubo de rayos X.

Integrado dentro de un enfoque de monitoreo predictivo, el análisis de rechazo no solo evalúa el desempeño del operador, sino que también permite detectar deterioros técnicos antes de que se traduzcan en fallas críticas o interrupciones del servicio.

## **Evidencia Científica del Impacto del Mantenimiento Predictivo en Radiología Digital**

Una vez establecidos los fundamentos teóricos, resulta pertinente revisar la evidencia científica que respalda la aplicación de modelos de mantenimiento predictivo en sistemas tecnológicos complejos. La literatura especializada ofrece aportes relevantes sobre la relación entre monitoreo basado en datos, disponibilidad operativa y prolongación de la vida útil de los equipos. En esta sección se analizan estudios y lineamientos institucionales que permiten sustentar el posible impacto de estas estrategias en el contexto específico de la radiología digital.

## **Relación Entre Mantenimiento Predictivo y Disponibilidad Operativa**

En el contexto hospitalario contemporáneo, la disponibilidad operativa constituye un indicador crítico de desempeño tecnológico. Su disminución no solo genera afectaciones administrativas, sino que repercute directamente en la continuidad asistencial y en la oportunidad diagnóstica.

La World Health Organization (WHO, 2011) establece que los programas de mantenimiento estructurados reducen tiempos de inactividad y fortalecen la confiabilidad del equipamiento médico. Sin embargo, los esquemas preventivos tradicionales, basados exclusivamente en calendarios, no siempre permiten anticipar fallas incipientes.

Mobley (2002) sostiene que el mantenimiento predictivo, al fundamentarse en el monitoreo continuo de variables operativas, permite intervenir antes de que se produzca la avería, reduciendo significativamente el tiempo medio de reparación (MTTR). Esta reducción impacta directamente el índice de disponibilidad operativa.

Carvalho et al. (2019) demostraron que los modelos de machine learning aplicados a sistemas industriales complejos mejoran la predicción de eventos de fallo, incrementando la estabilidad operativa. Si bien su estudio no se limita al ámbito biomédico, sus hallazgos resultan extrapolables a sistemas de radiología digital debido a su arquitectura electrónica avanzada.

En consecuencia, la implementación de modelos predictivos podría incrementar el tiempo medio entre fallas (MTBF) y disminuir interrupciones no planificadas, optimizando así la continuidad del servicio radiológico.

## **Impacto del Monitoreo Predictivo en La Vida Útil de Los Equipos**

La vida útil de un sistema de radiología digital no depende exclusivamente del tiempo cronológico de uso, sino del comportamiento dinámico de sus componentes críticos.

Bushberg et al. (2021) explican que el tubo de rayos X y los detectores digitales experimentan desgaste progresivo relacionado con ciclos térmicos y cargas eléctricas acumulativas. Este deterioro puede no ser evidente en inspecciones superficiales, pero se manifiesta en alteraciones de desempeño.

Jardine et al. (2006) argumentan que el mantenimiento basado en condición permite identificar patrones anómalos asociados al envejecimiento funcional, posibilitando intervenciones oportunas que previenen fallas catastróficas.

Por su parte, Si et al. (2020) desarrollaron modelos estadísticos para estimar la vida útil remanente (Remaining Useful Life – RUL), los cuales permiten proyectar el momento óptimo de sustitución de componentes. Este enfoque resulta particularmente pertinente en radiología digital, donde la sustitución intempestiva de un tubo o detector implica elevados costos institucionales.

Así, el monitoreo predictivo no solo reduce eventos de fallo súbito, sino que favorece una gestión estratégica del ciclo de vida tecnológico, prolongando la funcionalidad diagnóstica del sistema.

### **Implicaciones en Calidad de Imagen y Seguridad Radiológica**

El aseguramiento de la calidad en radiología digital exige estabilidad técnica permanente. La IAEA (2018) señala que desviaciones no detectadas en parámetros técnicos pueden traducirse en degradación de imagen, incremento de ruido y presencia de artefactos.

El American College of Radiology (ACR, 2022) enfatiza que el control continuo de desempeño es indispensable para evitar repeticiones innecesarias y exposiciones adicionales al paciente.

En este sentido, la falta de detección temprana de descalibraciones podría generar aumento de dosis por repetición de estudios o por compensaciones automáticas del sistema. El

mantenimiento predictivo, al identificar variaciones térmicas o eléctricas anómalas, contribuiría a preservar la estabilidad dosimétrica y la calidad diagnóstica.

De esta manera, la implementación de modelos predictivos no solo posee implicaciones técnicas y económicas, sino también clínicas y éticas, al incidir en la seguridad del paciente.

### **Marco Metodológico**

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, ya que se fundamenta en la revisión, análisis e interpretación de información proveniente de fuentes documentales, tales como literatura científica, normativa internacional y documentos técnicos relacionados con la radiología digital y los modelos de mantenimiento aplicados a estos sistemas.

No obstante, el estudio se apoya en datos cuantitativos reportados en la literatura, como indicadores de disponibilidad operativa, tiempos de falla de vida útil de los equipos, lo cual permite complementar el análisis interpretativo con evidencia objetiva previamente documentada.

El tipo de investigación es descriptivo – correlacional, ya que, en primera instancia, se describe las características de los enfoques de mantenimiento en sistemas de radiología digital y, posteriormente, se analiza la relación existente entre la implementación del mantenimiento predictivo y variables como la disponibilidad operativa, la calidad de la imagen y la vida útil de los equipos.

El diseño de la investigación no es solo experimental de corte transversal debido a que no se manipulan variables, sino que estas se analizan en su contexto natural a partir de información existente en un momento determinado.

La recolección de la información se realiza mediante una revisión documental, que incluye artículos científicos indexados, guías técnicas y normativas internacionales, libros especializados en física médica e ingeniería biomédica y reportes técnicos sobre mantenimiento en equipos de radiología digital.

Para el análisis de la información, se emplea una estrategia de revisión crítica, orientada a identificar patrones, tendencias y relaciones entre los modelos de mantenimiento y el desempeño operativo de los equipos.

Este enfoque metodológico permite abordar de manera integral la problemática planteada, garantizando rigor académico y coherencia con los objetivos del estudio, al tiempo que facilita la integración de conocimientos provenientes de la física médica, la ingeniería biomédica y la gestión tecnológica en salud.

## **Fases de la Investigación**

### ***Selección y Búsqueda***

La fase de selección y búsqueda de la información se desarrolló mediante una revisión documental sistemática, orientada a identificar literatura científica y técnica relacionada con la radiología digital y los modelos de mantenimiento, con énfasis en el mantenimiento predictivo.

Para ello, se consultaron bases de datos académicas reconocidas, tales como Scopus, PubMed, ScienceDirect y Google Scholar, así como herramientas de apoyo para la exploración bibliográfica.

La estrategia de búsqueda se realizó mediante el uso de palabras clave en español e inglés, combinadas con operadores booleanos (AND, OR), entre las que se destacan: radiología digital (digital radiology), mantenimiento predictivo (predictive maintenance), disponibilidad operativa (operational availability), calidad de imagen (image quality) y equipos biomédicos (biomedical equipment).

Se seleccionaron artículos científicos originales, revisiones sistemáticas, documentos técnicos y normativas internacionales, priorizando fuentes con rigor académico y pertinencia temática.

En cuanto al idioma, se incluyeron publicaciones en español e inglés. El rango de fechas considerado comprendió entre 2015 y 2025, con el fin de garantizar la actualidad de la información, aunque se incorporaron algunas referencias clásicas por su relevancia teórica.

### ***Análisis de la Información***

Posterior a la fase de búsqueda, se llevó a cabo un proceso de selección y análisis crítico de la información recopilada. En total, se seleccionaron aproximadamente 25 artículos que cumplían con los criterios establecidos y aportaban evidencia relevante para el desarrollo del estudio.

El análisis se realizó teniendo en cuenta aspectos como la pertinencia del contenido frente al problema de investigación, el rigor metodológico de las fuentes, la relación directa con la radiología digital y los modelos de mantenimiento, así como la evidencia sobre disponibilidad operativa, calidad de imagen y vida útil de los equipos.

Se establecieron como criterios de inclusión, estudios relacionados con el mantenimiento en equipos de radiología digital, publicaciones sobre mantenimiento predictivo, preventivo o correctivo, documentos en español o inglés y fuentes académicas con respaldo científico.

Por su parte, los criterios de exclusión incluyeron artículos sin indexación o respaldo académico, publicaciones con información incompleta o poco clara, estudios no relacionados con equipos de diagnóstico por imágenes y documentos duplicados o desactualizados sin relevancia teórica.

Este proceso permitió depurar la información y garantizar la calidad de las fuentes seleccionadas, facilitando la identificación de tendencias y relaciones entre los modelos de mantenimiento y el desempeño operativo de los sistemas de radiología digital.

## Análisis de Resultados

El análisis de la literatura científica evidencia que los modelos tradicionales de mantenimiento en radiología digital presentan limitaciones importantes en la gestión eficiente de los equipos. El mantenimiento correctivo, al actuar únicamente después de la ocurrencia de fallas, se asocia con interrupciones inesperadas del servicio y altos costos operativos, lo cual afecta directamente la disponibilidad operativa de los sistemas (Mobley, 2002).

Por su parte, el mantenimiento preventivo, basado en intervenciones programadas, permite reducir parcialmente la frecuencia de fallas; sin embargo, no garantiza la detección de anomalías entre los intervalos establecidos, lo que limita su efectividad en entornos de alta demanda tecnológica (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018).

En contraste, el mantenimiento predictivo introduce un enfoque basado en la condición operativa del equipo, apoyado en el monitoreo continuo de variables técnicas y el análisis de datos. Según Carvalho et al. (2019) y Si et al. (2020), este modelo permite identificar patrones de degradación antes de que se conviertan en fallas críticas, optimizando la planificación del mantenimiento y reduciendo los tiempos de inactividad.

Desde el punto de vista técnico, autores como Bushberg et al. (2021) destacan que parámetros como la relación señal-ruido (SNR), la eficiencia cuántica de detección (DQE) y la estabilidad del kilovoltaje (kVp) son altamente sensibles al deterioro progresivo de los componentes. La variación de estos indicadores puede afectar la calidad de la imagen diagnóstica y aumentar la dosis al paciente si no se detecta oportunamente.

En este sentido, el monitoreo continuo de dichos parámetros permite preservar la calidad de imagen y contribuir al cumplimiento del principio ALARA, al evitar la repetición de estudios innecesarios (IAEA, 2018).

Adicionalmente, la evidencia reportada por la World Health Organization (2011) indica que los programas de mantenimiento estructurados mejoran la confiabilidad del equipamiento médico y reducen los tiempos de inactividad, lo cual se ve fortalecido con la incorporación de modelos predictivos basados en datos.

No obstante, a pesar de los beneficios demostrados, la implementación del mantenimiento predictivo enfrenta desafíos importantes. Entre estos se destacan la necesidad de inversión en infraestructura tecnológica, la capacitación del talento humano y la transformación de los modelos organizacionales tradicionales, aspectos que limitan su adopción en algunos contextos institucionales.

En síntesis, los resultados evidencian que el mantenimiento predictivo no solo mejora la disponibilidad operativa de los equipos, sino que también impacta positivamente la calidad de la imagen diagnóstica, la seguridad del paciente y la eficiencia en la gestión tecnológica de los servicios de radiología.

Con el fin de sintetizar los hallazgos identificados en la literatura, se presenta la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Comparación de Modelos de Mantenimiento en Radiología Digital*

<b>Tipo de mantenimiento</b>	<b>Característica</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Impacto en radiología</b>	<b>Fuente</b>
<b>Correctivo</b>	Se ejecuta después de la ocurrencia de una falla.	No requiere planificación previa.	Genera altos costos, tiempos de inactividad prolongados y fallas inesperadas.	Baja disponibilidad operativa, afectación en la continuidad del servicio y riesgo en la calidad diagnóstica.	Mobley (2002); WHO (2011)
<b>Preventivo</b>	Basado en intervenciones programadas	Reduce la frecuencia de fallas y	No permite detectar fallas incipientes ni	Mejora parcial en la disponibilidad,	IAEA (2018); Bushberg

	según intervalos de tiempo o uso.	mejora la estabilidad operativa.	condiciones reales del equipo.	pero con limitaciones en la optimización de recursos.	et al. (2021)
<b>Predictivo</b>	Basado en el monitoreo continuo de variables técnicas y análisis de datos.	Permite anticipar fallas, optimiza recursos y mejorar la toma de decisiones	Requiere inversión tecnológica, capacitación y cambio organizacional	Alta disponibilidad operativa, estabilidad en la calidad de imagen y reducción de dosis al paciente.	Carvalho et al. (2019); Si et al. (2020); IAEA (2018)

---

*Nota.* Elaboración propia con base en Mobley (2002), International Atomic Energy Agency

(2018), Bushberg et al. (2021), Carvalho et al. (2019) y Si et al. (2020).

Como se observa en la Tabla 2, el mantenimiento predictivo presenta ventajas significativas frente a los modelos correctivo y preventivo, especialmente en términos de disponibilidad operativa y seguridad del paciente.

## Conclusiones

El análisis documental muestra que el mantenimiento predictivo es un cambio importante en la gestión tecnológica de los servicios de radiología digital. Este enfoque se aleja de los modelos tradicionales que solo reaccionan a fallas y se centra en la anticipación, el monitoreo constante y el análisis sistemático de datos. Esta evolución no solo mejora los procesos de mantenimiento, sino que también redefine la gestión hospitalaria, donde la disponibilidad operativa de los equipos se vuelve clave para la continuidad y calidad de la atención en salud.

Los hallazgos indican que la calidad de la imagen diagnóstica no solo depende de los avances en tecnología digital, sino también de la estabilidad funcional de todos sus componentes a lo largo del tiempo. El monitoreo constante de parámetros físicos como la relación señal-ruido (SNR), la eficiencia cuántica de detección (DQE), la estabilidad del kilovoltaje (kVp) y otros indicadores de rendimiento permite identificar el deterioro progresivo que puede afectar la precisión diagnóstica y aumentar la exposición innecesaria a radiación ionizante. Por lo tanto, el mantenimiento predictivo se vuelve crucial para mejorar la seguridad del paciente y cumplir con los principios de protección radiológica.

La revisión de la literatura científica destaca que usar estrategias predictivas ayuda a optimizar los recursos de las instituciones. Esto incluye reducir paradas no programadas, disminuir costos por fallas críticas y extender la vida útil de componentes valiosos.

Sin embargo, la implementación de estos modelos enfrenta desafíos relacionados con la inversión en tecnología, la capacitación del personal y la persistencia de estructuras organizativas tradicionales que complican la integración de herramientas analíticas en la gestión hospitalaria. La adopción del mantenimiento predictivo va más allá del ámbito operativo y técnico. Implica un cambio en la cultura institucional y en cómo se aborda el control de calidad en la radiología

digital. Integrar tecnologías de monitoreo, análisis inteligente y gestión basada en evidencia fortalece la toma de decisiones y promueve una administración más eficiente, sostenible y centrada en la mejora continua de los servicios de diagnóstico por imagen.

Por último, los hallazgos sugieren que el mantenimiento predictivo es una necesidad creciente en los sistemas de salud actuales, especialmente en contextos donde la calidad diagnóstica, la seguridad radiológica y la sostenibilidad tecnológica son pilares fundamentales de la atención médica.

Desde esta perspectiva, el tecnólogo en radiología deja de ser solo un recurso operativo y se convierte en un actor clave en la gestión tecnológica, la garantía de calidad y la implementación de estrategias que fortalecen la eficiencia y seguridad en los servicios de imágenes diagnósticas.

### Referencias Bibliográficas

American College of Radiology. (2022). *Quality control manual for digital radiography*.

<https://www.acr.org/>

Bastos, A. L., & Nogueira, M. D. S. (2025). Image quality in diagnostic radiology: A guide to methodologies for radiologists. *Radiologia Brasileira*, 58, e20240088.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12013331/>

Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2021). *The essential physics of medical imaging* (4th ed.). Wolters Kluwer.

Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>

IntegralMed. (28 de 09 de 2020). *IntegralMed Equipamiento Biomédico*.

<https://integralmed.com.ar/monitores-para-diagnostico-en-imagenologia-medica/>

Intemed. (2025). *Intemed Innovaciones para la Salud*.

<https://www.intemed.com.ar/producto/detector-inalambrico-careray-digitalizacion-directa-para-equipos-analogicos/>

International Atomic Energy Agency. (2018). *Quality assurance programme for digital radiology*. <https://www.iaea.org/publications>

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>

- Lee, J., Bagheri, B., & Jin, C. (2019). Introduction to cyber manufacturing and predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 38, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026>
- López Sancho, J., & Moreno Gómez, E. (2007). *Museo Virtual de la Ciencia del CSIC. Sala de la Radiactividad*. <https://museovirtual.csic.es/coleccion/amaniel/radiactividad/radio1.htm>
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Elsevier.
- Parra, E. (2009). La Digitalización no es Todo. *Imágenes Médicas*, 1-2. <https://imagenes-medicas.blogspot.com/2009/03/repite-placa-la-digitalizacion-no-es.html>
- Samei, E., & Peck, D. J. (2014). *Hendee's physics of medical imaging*. Wiley-Blackwell.
- Seeram, E. (2019). *Digital Radiography: Physical Principles and Quality Control*.
- Seibert, J. A., Morin, R. L., & Boone, J. M. (2018). *Quality control in diagnostic imaging*. Medical Physics Publishing.
- Schaefer-Prokop, C., & Uffmann, M. (2019). DR and CR: Recent advances in technology. *European Journal of Radiology*, 194-201. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2009.05.055>
- Si, X.-S., Wang, W., Hu, C.-H., & Zhou, D.-H. (2020). Remaining useful life estimation – A review on the statistical data-driven approaches. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.018>
- Sociedad Española de Enfermedades Cardíacas. (2024). *Ecocardio.com*. Obtenido de Biblioteca de Preguntas Básicas de Imagen Cardíaca: <https://ecocardio.com/documentos/biblioteca-preguntas-basicas/preguntas-al-radiologo/tecnica-metodologia-tomografia-computarizada/que-es-resolucion-espacial-y-resolucion-contraste.html>
- World Health Organization. (2011). *Medical equipment maintenance programme overview*. <https://www.who.int/publications>