

**Análisis documental del monitoreo en tiempo real de la radiación en radiología digital
mediante tecnologías IOT como estrategia para fortalecer la protección radiológica**

Alexander Prieto Pineda

Gina Liseth Quiñonez Hernández

Camilo Arley Agudelo Celis

Angela Isabel Martínez Gómez

Yeison Julián González Moncayo

Asesor

Edna Roció Jamaica Guío

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias de la Salud

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnosticas

2026

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por guiarnos y darnos la fortaleza necesaria para culminar este proceso académico. Asimismo, expresamos nuestro sincero agradecimiento a los docentes y tutores del Diplomado de Profundización en Control de la Calidad en Radiología Digital por su orientación, acompañamiento y valiosos conocimientos durante el desarrollo de esta investigación.

De igual manera, agradecemos a nuestras familias por su apoyo, comprensión y motivación constante, los cuales fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Finalmente, reconocemos el aporte de los autores, investigadores y organizaciones científicas cuyos estudios y lineamientos permitieron fortalecer el desarrollo teórico de este trabajo, contribuyendo a ampliar nuestra visión sobre la protección radiológica y la implementación de tecnologías IoT en radiología digital.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo principalmente a Dios, por brindarnos la vida, la sabiduría y la fortaleza para superar cada desafío presentado durante este proceso académico.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante, siendo un pilar fundamental en el cumplimiento de nuestras metas profesionales y personales.

Asimismo, dedicamos esta investigación a todos los profesionales del área de la salud y la radiología, quienes diariamente trabajan comprometidos con la seguridad del paciente y el fortalecimiento de prácticas clínicas más seguras y de calidad.

Resumen

La radiología digital constituye una herramienta esencial en el diagnóstico médico actual; sin embargo, el uso de radiación ionizante implica riesgos que requieren un control constante y adecuado. En muchos servicios de radiología, el monitoreo de la dosis aún se realiza de forma retrospectiva, lo que limita la posibilidad de actuar de manera inmediata ante exposiciones elevadas. Frente a esta problemática, el presente estudio tuvo como propósito analizar el potencial de las tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo en tiempo real de la radiación en radiología digital, mediante una revisión documental de literatura científica y normativa especializada.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo descriptivo-analítico, utilizando información proveniente de artículos científicos, documentos técnicos y normativas internacionales relacionadas con protección radiológica, dosimetría y sistemas inteligentes. Los resultados muestran que los sistemas tradicionales presentan limitaciones importantes en la trazabilidad y supervisión oportuna de la dosis, mientras que las soluciones basadas en IoT facilitan la integración de sensores, redes inalámbricas y plataformas digitales que permiten un seguimiento continuo de la exposición radiológica.

Diversos estudios evidencian que el monitoreo en tiempo real favorece la reducción de la dosis ocupacional y mejora la toma de decisiones durante los procedimientos diagnósticos (Murat et al., 2021; Miyoshi et al., 2025). En conclusión, la implementación de tecnologías IoT representa una alternativa innovadora para fortalecer la protección radiológica, optimizar el cumplimiento del principio ALARA y avanzar hacia sistemas de control de calidad más eficientes y preventivos en radiología digital.

Palabras Clave: Radiología digital, Protección radiológica, Dosimetría en tiempo real, Monitoreo de radiación, Principio ALARA

Abstract

Digital radiography is an essential tool in modern medical diagnosis; however, the use of ionizing radiation involves risks that require constant and appropriate control. In many radiology services, radiation dose monitoring is still performed retrospectively, which limits the possibility of taking immediate action when high exposure levels occur. In response to this issue, the present study aimed to analyze the potential of Internet of Things (IoT)-based technologies for real-time radiation monitoring in digital radiology through a documentary review of scientific literature and specialized regulations.

The research was conducted under a qualitative descriptive-analytical approach, using information obtained from scientific articles, technical documents, and international regulations related to radiation protection, dosimetry, and intelligent systems. The findings show that traditional systems present significant limitations in dose traceability and timely supervision, whereas IoT-based solutions facilitate the integration of sensors, wireless networks, and digital platforms that enable continuous monitoring of radiation exposure.

Several studies have shown that real-time monitoring contributes to reducing occupational radiation dose and improves decision-making during diagnostic procedures (Murat et al., 2021; Miyoshi et al., 2025). In conclusion, the implementation of IoT technologies represents an innovative alternative to strengthen radiation protection, optimize compliance with the ALARA principle, and advance toward more efficient and preventive quality control systems in digital radiology.

Keywords: Digital radiology, Radiation protection, Real-time dosimetry, Radiation monitoring, ALARA principle.

Tabla de contenido

Introducción.....	12
Planteamiento del Problema.	14
Justificación.....	17
Objetivos.....	20
Objetivo General.....	20
Objetivos Específicos.....	20
Marco Teórico.....	21
Fundamentos de la Radiología en Unidades Críticas.....	21
<i>Radiografía Portátil en Unidades de Cuidados Intensivos.....</i>	<i>21</i>
<i>Producción de Rayos X en Equipos Portátiles</i>	<i>21</i>
<i>Radiación de Dispersión y Efecto Compton</i>	<i>22</i>
Protección Radiológica y Normativa Internacional	23
<i>Principio ALARA.....</i>	<i>23</i>
<i>Límites de Dosis y Niveles de Referencia Diagnóstica.....</i>	<i>24</i>
Comparación entre la Normatividad Internacional y la Normativa Colombiana en Protección Radiológica	25
<i>Barreras de Protección y sus Limitaciones</i>	<i>28</i>
Dosimetría Tradicional y Dosimetría Activa	29
<i>Dosímetros Pasivos.....</i>	<i>29</i>
<i>Dosímetros Electrónicos Personales</i>	<i>29</i>

<i>Impacto Psicológico de la Retroalimentación Inmediata</i>	30
Tecnología LoT Aplicada al Monitoreo Radiológico	31
<i>Arquitectura de Sistemas LoT Médicos</i>	31
<i>Protocolos de Comunicación Inalámbrica</i>	31
<i>Interoperabilidad y Seguridad de los Datos</i>	32
Eficacia del Monitoreo Activo para la Reducción de Dosis	32
Marco Metodológico.....	34
Enfoque de la Investigación	34
Tipo de Investigación	34
Diseño de la Investigación	35
Método de Investigación	36
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información.....	36
Fases del Desarrollo de la Investigación.....	37
<i>Identificación del Problema</i>	37
<i>Revisión de la Literatura</i>	37
<i>Análisis Crítico de la Información</i>	38
<i>Integración Conceptual</i>	38
<i>Interpretación de Resultados</i>	38
<i>Elaboración del Informe Final</i>	38
Resultados.....	39

Discusión.....	46
Conclusiones.....	47
Bibliografía.....	50

Lista de Tabla

Tabla 1 <i>Normativa Internacional y Nacional sobre Protección Radiológica</i>	27
Tabla 2 <i>Comparación entre Dosimetría Tradicional y Monitoreo en Tiempo Real.....</i>	41
Tabla 3 <i>Comparación Literatura Aporte Principal – Resultado Relevante</i>	41
Tabla 4 <i>Comparación Internacional sobre la Implementación de Tecnologías IoT para el Monitoreo Radiológico en Tiempo Real.</i>	43

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Efecto Compton</i>	23
---	----

Introducción

La radiología digital se ha consolidado como una herramienta fundamental dentro de los servicios de diagnóstico por imágenes, debido a la rapidez, precisión y calidad que ofrece en la obtención de estudios médicos. Su implementación ha permitido optimizar la detección temprana de enfermedades, el seguimiento clínico y la toma de decisiones terapéuticas, favoreciendo una atención más eficiente y oportuna para los pacientes. Además, el desarrollo de las tecnologías de la información ha fortalecido los procesos de almacenamiento, transferencia y acceso a las imágenes médicas, facilitando la integración de los diferentes componentes del flujo de trabajo en radiología, desde la adquisición de imágenes hasta la comunicación entre profesionales de la salud.

No obstante, el uso de radiaciones ionizantes continúa representando un desafío importante en términos de seguridad, tanto para los pacientes como para el personal sanitario. Aunque existen lineamientos y normativas orientadas a minimizar la exposición, como el principio ALARA, en muchos entornos clínicos el control dosimétrico aún se realiza de manera posterior a los procedimientos, lo que limita la posibilidad de identificar e intervenir de forma inmediata ante posibles eventos de sobreexposición. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer los mecanismos de monitoreo y control dentro de los programas de calidad en imagenología.

En respuesta a estas necesidades, las tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) han surgido como una alternativa innovadora para mejorar la gestión de la protección radiológica. La incorporación de sensores inteligentes, dispositivos móviles, redes inalámbricas y plataformas digitales permite recopilar y analizar información en tiempo real, favoreciendo un seguimiento más preciso de las dosis de radiación durante los procedimientos diagnósticos.

Asimismo, estas herramientas contribuyen a optimizar la comunicación entre sistemas, fortalecer la toma de decisiones clínicas y promover una cultura preventiva enfocada en la seguridad radiológica.

De igual manera, los avances tecnológicos han permitido ampliar las posibilidades de la radiología digital hacia escenarios como la teleradiología, la teleconsulta y el intercambio seguro de imágenes médicas mediante plataformas en la nube. Ejemplo de ello son las soluciones desarrolladas para compartir estudios e informes radiológicos de manera más eficiente y accesible, permitiendo incluso una mayor participación de los pacientes en el manejo de su información médica.

El presente trabajo tiene como propósito analizar el potencial de las tecnologías IoT aplicadas al monitoreo en tiempo real de la radiación en radiología digital, a partir de la revisión de literatura científica y normativa relacionada con el tema. Con ello, se busca aportar elementos que contribuyan al fortalecimiento de los procesos de control de calidad, la optimización de la protección radiológica y la mejora de la seguridad en la práctica clínica

Planteamiento del Problema

La protección radiológica en la práctica clínica contemporánea se fundamenta en el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), el cual establece que la exposición a radiación ionizante debe mantenerse tan baja como sea razonablemente posible, sin comprometer la calidad diagnóstica. En este contexto, los Niveles de Referencia Diagnóstica (DRLs) constituyen herramientas esenciales para la optimización de dosis, ya que permiten identificar desviaciones en la práctica clínica habitual (ICRP, 2017; IAEA, 2018).

No obstante, en muchos servicios de radiología digital y tomografía computarizada, el cálculo y análisis de la dosis administrada al paciente continúa realizándose de manera retrospectiva. Es decir, la cuantificación de parámetros como el CTDI_{vol}, DLP o producto dosis-área (DAP) suele evaluarse después de finalizado el estudio, lo que limita la posibilidad de intervención inmediata en caso de superación de los umbrales establecidos (Rehani & Frush, 2019; IAEA, 2018).

Adicionalmente, la información dosimétrica suele registrarse de forma manual o fragmentada en diferentes sistemas, como equipos de imagen, RIS, PACS o registros físicos, lo cual dificulta la trazabilidad de la dosis acumulada del paciente, la identificación oportuna de desviaciones respecto a los DRLs y la implementación de estrategias correctivas inmediatas (Rehani & Frush, 2019; Ahmad et al., 2021).

Esta situación genera una brecha entre los lineamientos normativos de protección radiológica y la práctica operativa diaria. Sin sistemas de monitoreo en tiempo real, el profesional en radiología carece de herramientas que le permitan reaccionar durante la adquisición de la imagen ante un incremento inesperado de la dosis. En consecuencia, el

principio ALARA se aplica principalmente como una recomendación conceptual y no como un mecanismo dinámico de control automatizado (ICRP, 2017; IAEA, 2018).

En este escenario, la integración de tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) representa una oportunidad estratégica para fortalecer la gestión de calidad en radiología digital. Los sistemas IoT permiten la interconexión entre equipos de imagenología, plataformas RIS/PACS y bases de datos hospitalarias, facilitando la monitorización continua de parámetros dosimétricos y la generación de alertas automáticas cuando se superan los niveles de referencia diagnóstica (Ahmad et al., 2021; Lin et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que los sistemas de monitoreo en tiempo real contribuyen a mejorar la trazabilidad de la dosis, optimizar la toma de decisiones clínicas y reducir la exposición ocupacional del personal sanitario mediante mecanismos de retroalimentación inmediata (Murat et al., 2021; Hattori et al., 2023; Miyoshi et al., 2025).

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías aún enfrenta desafíos relacionados con la interoperabilidad entre sistemas hospitalarios, la infraestructura tecnológica necesaria y la seguridad de la información transmitida mediante redes digitales, aspectos que continúan siendo objeto de investigación y desarrollo en el ámbito internacional (Ahmad et al., 2021; Zimmaro et al., 2024).

Esta realidad plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el impacto potencial de la integración de tecnologías IoT en la reducción de riesgos radiológicos mediante sistemas de monitoreo en tiempo real y alertas automáticas de superación de niveles de referencia diagnóstica en servicios de radiología digital?

De esta manera, el problema no solo radica en la existencia de riesgos asociados a la sobreexposición, sino en la ausencia de mecanismos tecnológicos que permitan transformar la gestión de la dosis de un enfoque reactivo a uno preventivo y predictivo.

Justificación

La optimización de la dosis en radiología digital constituye un eje fundamental de la gestión de calidad y de la seguridad del paciente. Organismos internacionales como la Comisión Internacional de Protección Radiológica han enfatizado que la vigilancia continua de la exposición médica es una responsabilidad ética y técnica de los servicios de radiología, debido al incremento sostenido del uso de tecnologías de imagen y al consecuente aumento de la dosis colectiva a la población (ICRP, 2017). En este contexto, los Niveles de Referencia Diagnóstica (DRLs) no solo funcionan como indicadores comparativos, sino como herramientas dinámicas de mejora continua orientadas a la prevención de exposiciones innecesarias.

Sin embargo, múltiples estudios han demostrado que la gestión dosimétrica basada en registros retrospectivos limita la capacidad de intervención oportuna y reduce la efectividad de los programas de optimización. La literatura señala que la ausencia de sistemas automatizados de seguimiento en tiempo real impide identificar desviaciones durante el procedimiento, lo que debilita la aplicación operativa del principio ALARA y favorece la variabilidad en la práctica clínica (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018). Esta situación resulta especialmente crítica en entornos de alta carga asistencial, donde la supervisión manual de parámetros dosimétricos se vuelve impracticable.

La integración de plataformas digitales inteligentes, particularmente aquellas basadas en arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT), representa una evolución necesaria hacia modelos predictivos de control de calidad. Los sistemas IoT permiten la captura automática de datos dosimétricos, su análisis en tiempo real y la generación de alertas cuando se superan los DRLs, fortaleciendo la trazabilidad de la dosis acumulada del paciente y facilitando la toma de decisiones clínicas inmediatas. Investigaciones recientes destacan que los sistemas de monitoreo

dosimétrico automatizado reducen la variabilidad en la exposición, mejoran la estandarización de protocolos y promueven una cultura institucional de seguridad radiológica (Rehani & Frush, 2019).

Además, desde el ámbito de la gestión hospitalaria, la interoperabilidad entre los equipos de imagenología y plataformas como RIS, PACS y HIS representa un componente clave en los procesos de modernización tecnológica del sector salud (European Society of Radiology, 2019). La integración de estos sistemas permite centralizar y analizar la información dosimétrica de manera más eficiente, favoreciendo el seguimiento continuo de la exposición radiológica y una mejor trazabilidad de los procedimientos realizados (Rehani & Frush, 2019; Ahmad et al., 2021). Asimismo, contar con herramientas tecnológicas capaces de monitorear y registrar la dosis en tiempo real contribuye al fortalecimiento de la seguridad del paciente, optimiza los procesos de control y facilita el cumplimiento de los estándares de calidad y protección radiológica establecidos por las entidades regulatorias (International Atomic Energy Agency, 2018). En consecuencia, la incorporación de soluciones basadas en tecnologías IoT no debe entenderse únicamente como un avance tecnológico complementario, sino como una estrategia necesaria para fortalecer los programas de aseguramiento de la calidad y promover prácticas más seguras, eficientes y preventivas en los servicios de radiología digital (Ahmad et al., 2021; Lin et al., 2021).

Además, esta investigación se justifica por su contribución a la transición desde un modelo reactivo de control dosimétrico hacia un sistema preventivo, automatizado y basado en datos (Ahmad et al., 2021; Lin et al., 2021). Analizar el impacto de la integración de tecnologías IoT en la monitorización en tiempo real permitirá generar evidencia para fortalecer las políticas de protección radiológica, mejorar la seguridad del paciente y promover estándares avanzados de

calidad en radiología digital (International Atomic Energy Agency, 2018; Rehani & Frush, 2019). La relevancia del estudio radica no solo en su valor técnico, sino también en su aporte al fortalecimiento de prácticas médicas más seguras y responsables frente a la exposición a radiación ionizante, en concordancia con los principios internacionales de protección radiológica (International Commission on Radiological Protection, 2017).

Objetivos

Objetivo General

Analizar, a partir de una revisión documental, el uso de tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo en tiempo real de la dosis de radiación en radiología digital.

Objetivos Específicos

Describir los fundamentos de la protección radiológica y los riesgos asociados a la exposición a radiación en entornos clínicos.

Analizar las limitaciones de los sistemas tradicionales de monitoreo de dosis frente a los sistemas de medición en tiempo real.

Examinar, desde la literatura científica, las aplicaciones de las tecnologías IoT en el monitoreo radiológico en tiempo real.

Marco Teórico

Fundamentos de la Radiología en Unidades Críticas

Radiografía Portátil en Unidades de Cuidados Intensivos

La radiología diagnóstica constituye una herramienta esencial para el seguimiento clínico de pacientes hospitalizados, especialmente en áreas críticas como las unidades de cuidados intensivos (UCI). En estos entornos, la radiografía portátil se convierte en una técnica fundamental debido a que muchos pacientes presentan condiciones clínicas que impiden su traslado hacia salas de radiología convencionales, como ventilación mecánica, inestabilidad hemodinámica o múltiples dispositivos de soporte vital. Por esta razón, los equipos de rayos X portátiles permiten realizar estudios directamente al lado del paciente, facilitando diagnósticos oportunos y el seguimiento de patologías torácicas, posicionamiento de dispositivos médicos y evolución de enfermedades pulmonares (Luna et al., 2024).

No obstante, el uso de radiografía portátil en la UCI presenta desafíos particulares relacionados con el entorno físico y las condiciones operativas. A diferencia de las salas de radiología convencionales, estos espacios no cuentan con blindaje estructural diseñado para contener la radiación, lo que incrementa la posibilidad de exposición ocupacional al personal sanitario. Asimismo, las limitaciones de espacio, la presencia de múltiples profesionales de la salud y la necesidad de realizar estudios con alta frecuencia generan un escenario en el que el control de la radiación dispersa se vuelve fundamental para garantizar la seguridad radiológica (Seeram, 2019).

Producción de Rayos X en Equipos Portátiles

La generación de rayos X en los equipos portátiles se basa en principios físicos similares a los utilizados en sistemas radiológicos convencionales. En estos dispositivos, la radiación se

produce dentro de un tubo de rayos X mediante la aceleración de electrones desde el cátodo hacia el ánodo cuando se aplica una diferencia de potencial elevada, generalmente medida en kilovoltaje pico (kVp). Al impactar contra el material del ánodo, los electrones liberan energía en forma de radiación electromagnética, generando el espectro de rayos X utilizado para la obtención de imágenes diagnósticas (Seeram, 2019).

El espectro energético producido depende de parámetros técnicos como el kVp y el miliamperaje por segundo (mAs), los cuales influyen directamente en la penetración de la radiación y en la dosis administrada al paciente. En equipos portátiles, estos parámetros deben ajustarse cuidadosamente para garantizar una calidad de imagen adecuada sin incrementar innecesariamente la exposición radiológica (Martin et al., 2020).

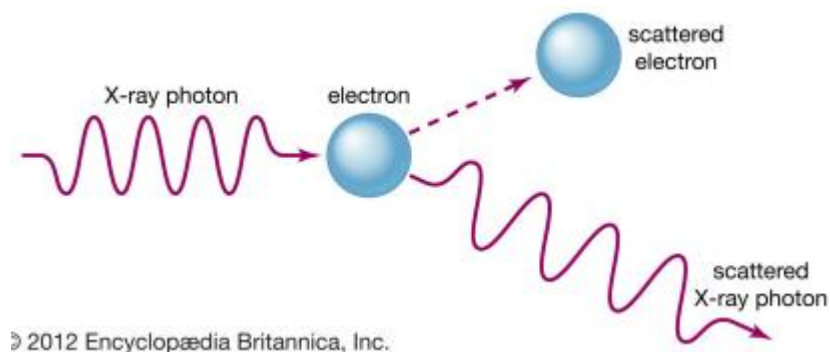
Radiación de Dispersión y Efecto Compton

Uno de los principales riesgos asociados al uso de rayos X en entornos hospitalarios es la radiación dispersa. Este fenómeno ocurre cuando los fotones de rayos X interactúan con la materia, particularmente con los tejidos del paciente, desviando su trayectoria original y liberando energía en diferentes direcciones. El proceso físico responsable de la mayor parte de esta dispersión en el rango energético utilizado en radiología diagnóstica es el efecto Compton (Martin, 2020).

En el efecto Compton, un fotón incidente colisiona con un electrón débilmente ligado, transfiriéndole parte de su energía y cambiando su dirección de propagación. Como resultado, el fotón dispersado puede dirigirse hacia el personal médico cercano al paciente, convirtiéndose en la principal fuente de exposición ocupacional durante los procedimientos radiológicos. Este fenómeno es particularmente relevante en estudios portátiles, donde la proximidad del personal al paciente aumenta la probabilidad de exposición a la radiación secundaria (Seeram, 2019).

Figura 1

Efecto Compton



Nota. Cuando un fotón de rayos X incide sobre un electrón, parte de su energía se destina a moverlo. Arthur Holly Compton demostró que la longitud de onda del fotón dispersado aumenta. El fotón incidente interactúa con un electrón, produciendo un fotón dispersado y un electrón expulsado. Adaptado de principios de interacción de la radiación con la materia (Martin, 2020; Seeram, 2019). Fuente. Britannica Editors (2025).

Protección Radiológica y Normativa Internacional

Principio ALARA

La protección radiológica en medicina se fundamenta en el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), el cual establece que todas las exposiciones a radiación ionizante deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, considerando factores sociales, económicos y técnicos. Este principio constituye uno de los pilares fundamentales en la gestión de la seguridad radiológica en entornos médicos (International Commission on Radiological Protection, 2017).

En el contexto de las unidades de cuidados intensivos, la aplicación del principio ALARA implica adoptar medidas destinadas a minimizar la exposición tanto del paciente como del personal sanitario. Estas medidas incluyen la optimización de los parámetros técnicos de los

equipos radiológicos, el uso adecuado de barreras de protección y la implementación de sistemas de monitoreo que permitan identificar situaciones de riesgo en tiempo real (International Atomic Energy Agency, 2018).

Límites de Dosis y Niveles de Referencia Diagnóstica

Las organizaciones internacionales han establecido recomendaciones específicas para controlar la exposición a radiación ionizante en medicina. La International Commission on Radiological Protection propone límites de dosis ocupacional para trabajadores expuestos, generalmente fijados en un promedio de 20 mSv por año durante un periodo de cinco años, sin exceder 50 mSv en un solo año (International Commission on Radiological Protection, 2017).

Además de los límites ocupacionales, la protección radiológica moderna incorpora el concepto de niveles de referencia diagnóstica (DRLs), los cuales representan valores orientativos utilizados para optimizar las prácticas radiológicas. Estos niveles no constituyen límites estrictos, sino indicadores que permiten identificar situaciones en las que las dosis utilizadas superan los valores habituales para determinados procedimientos, lo que sugiere la necesidad de revisar los protocolos técnicos (International Commission on Radiological Protection, 2017).

Las guías internacionales de seguridad radiológica también destacan la importancia de sistemas de seguimiento y auditoría clínica para garantizar el cumplimiento de estos estándares. En este sentido, la European Society of Radiology enfatiza que los programas de auditoría clínica permiten evaluar continuamente la calidad y seguridad de los procedimientos radiológicos, facilitando la identificación de oportunidades de mejora en la práctica clínica (European Society of Radiology, 2019).

Comparación entre la Normatividad Internacional y la Normativa Colombiana en Protección Radiológica

La protección radiológica en el ámbito médico se fundamenta en principios y recomendaciones desarrollados por organismos internacionales especializados, los cuales orientan la regulación y las prácticas seguras en el uso de radiaciones ionizantes. Entre las entidades más influyentes en este campo se encuentran la International Commission on Radiological Protection (ICRP) y el International Atomic Energy Agency (IAEA), cuyas directrices han servido de base para la formulación de normativas nacionales en diferentes países, incluido Colombia.

A nivel internacional, la ICRP establece los principios fundamentales de protección radiológica, los cuales se basan en tres pilares: justificación, optimización y limitación de dosis. El principio de justificación establece que cualquier procedimiento que implique el uso de radiación ionizante debe generar un beneficio mayor que el riesgo asociado a la exposición. Por su parte, el principio de optimización promueve que las dosis de radiación se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible, siguiendo el enfoque conocido como ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Finalmente, el principio de limitación de dosis establece valores máximos de exposición permitidos para trabajadores ocupacionalmente expuestos y para el público en general (Vaño et al., 2017).

En el ámbito de la radiología médica, la ICRP también introduce el concepto de niveles de referencia diagnóstica (Diagnostic Reference Levels, DRLs), los cuales constituyen herramientas importantes para evaluar y optimizar las dosis utilizadas en los procedimientos de diagnóstico por imagen. Estos niveles permiten identificar prácticas en las que las dosis administradas superan los valores habituales, facilitando la implementación de medidas de

mejora en los protocolos radiológicos y contribuyendo a la reducción de la exposición innecesaria a la radiación (International Commission on Radiological Protection ICRP (2017)).

De manera complementaria, el IAEA desarrolla guías técnicas orientadas a fortalecer la seguridad radiológica en el uso médico de la radiación ionizante. Entre estas se encuentra el documento *Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation*, el cual establece recomendaciones para garantizar la protección de pacientes, trabajadores y público durante la realización de procedimientos diagnósticos y terapéuticos. Estas guías incluyen aspectos relacionados con la capacitación del personal, el monitoreo dosimétrico, la implementación de programas de protección radiológica y el control de calidad de los equipos de imagen (International Atomic Energy Agency, 2018).

En el contexto colombiano, las recomendaciones internacionales han sido incorporadas a través de diferentes instrumentos normativos emitidos por el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. Una de las principales regulaciones en esta materia es la Resolución 482 de 2018, la cual establece los lineamientos para el uso de equipos generadores de radiación ionizante en el sector salud, así como los requisitos para el licenciamiento de las prácticas médicas que utilizan radiaciones ionizantes. Esta normativa también define las condiciones necesarias para la prestación de servicios de protección radiológica, incluyendo la implementación de programas de control de calidad, monitoreo de dosis y capacitación del personal que opera este tipo de equipos (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

Adicionalmente, la normativa colombiana incorpora elementos relacionados con la vigilancia sanitaria, el cumplimiento de estándares técnicos y la adopción de medidas de seguridad orientadas a proteger tanto al personal de salud como a los pacientes y al público en general (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018). En este sentido, la regulación nacional

se encuentra alineada con los principios establecidos por organismos internacionales como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), aunque adapta dichas recomendaciones a las condiciones específicas del sistema de salud colombiano y a los mecanismos de control establecidos por las autoridades sanitarias del país (International Commission on Radiological Protection, 2017; International Atomic Energy Agency, 2018; Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

En términos generales, puede afirmarse que la normativa colombiana adopta los principios fundamentales de protección radiológica promovidos a nivel internacional, especialmente en lo relacionado con la optimización de la dosis, el monitoreo dosimétrico del personal ocupacionalmente expuesto y la implementación de programas de protección radiológica en las instituciones de salud (International Commission on Radiological Protection, 2017; International Atomic Energy Agency, 2018; Ministerio de Salud y Protección Social, 2018). Esta articulación entre normativas internacionales y regulaciones nacionales contribuye a fortalecer las prácticas de seguridad en radiología y a garantizar un uso responsable de las radiaciones ionizantes en el ámbito médico (International Atomic Energy Agency, 2018; Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

Tabla 1

Normativa Internacional y Nacional sobre Protección Radiológica

Aspecto	Normativa Internacional	Normativa Colombiana
Principios de protección radiológica	ICRP establece justificación, optimización y limitación de dosis	Adoptados en la regulación sanitaria nacional

Control de dosis	Uso de niveles de referencia diagnóstica (DRLs)	Programas de control de calidad y supervisión
Seguridad ocupacional	Monitoreo dosimétrico del personal expuesto	Programas de protección radiológica obligatorios
Regulación institucional	Guías técnicas de seguridad radiológica	Licenciamiento y vigilancia sanitaria por autoridades nacionales

Nota. La tabla presenta una comparación entre los principales lineamientos internacionales en protección radiológica y su adopción en el contexto normativo colombiano, evidenciando la alineación del país con estándares globales en seguridad radiológica. Fuente. Elaboración propia con base en International Commission on Radiological Protection (2017), International Atomic Energy Agency (2018) y Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia (Resolución 482 de 2018).

Barreras de Protección y sus Limitaciones

Las medidas tradicionales de protección radiológica incluyen el uso de barreras físicas como delantales de plomo, protectores tiroideos y pantallas móviles. Estos dispositivos están diseñados para absorber una parte significativa de la radiación dispersa, reduciendo la dosis recibida por el personal sanitario (International Atomic Energy Agency, 2018).

Sin embargo, en entornos como las UCI estas barreras presentan limitaciones prácticas. El espacio reducido, la movilidad constante del personal y la necesidad de acceso inmediato al paciente pueden dificultar el uso adecuado de los elementos de protección. Además, la radiación dispersa puede alcanzar al personal desde múltiples direcciones, lo que reduce la eficacia de las

barreras cuando no se combinan con otras estrategias de protección, como el control de la distancia y el monitoreo continuo de la dosis (World Health Organization, 2016).

Dosimetría Tradicional y Dosimetría Activa

Dosímetros Pasivos

La dosimetría personal es una herramienta esencial para evaluar la exposición ocupacional a radiación ionizante. Tradicionalmente, esta medición se ha realizado mediante dosímetros pasivos, entre los que destacan los dosímetros termoluminiscentes (TLD) y los dosímetros de película.

Los TLD funcionan mediante cristales que almacenan energía cuando son expuestos a radiación. Posteriormente, al ser calentados en un laboratorio especializado, liberan esa energía en forma de luz, cuya intensidad es proporcional a la dosis recibida. Por su parte, los dosímetros de película utilizan una emulsión fotográfica sensible a la radiación, la cual se oscurece en función de la dosis acumulada (International Atomic Energy Agency, 2018).

Aunque estos sistemas han sido ampliamente utilizados durante décadas, presentan una desventaja importante: las lecturas se realizan de manera diferida, generalmente con periodicidad mensual o trimestral. Esto significa que el personal sanitario no recibe información inmediata sobre su exposición, lo que limita la posibilidad de corregir comportamientos de riesgo durante los procedimientos radiológicos (Vano et al., 2017).

Dosímetros Electrónicos Personales

Ante estas limitaciones, han surgido los dosímetros electrónicos personales (EPD), dispositivos capaces de medir la dosis de radiación en tiempo real. Estos equipos utilizan sensores electrónicos que registran continuamente la radiación ambiental y proporcionan

retroalimentación inmediata al usuario mediante pantallas digitales o alarmas sonoras (Hattori et al., 2023).

La evidencia científica ha demostrado que el uso de dosimetría en tiempo real puede contribuir significativamente a la reducción de la exposición ocupacional. En estudios realizados en laboratorios de cardiología intervencionista, el monitoreo activo permitió al personal identificar zonas con mayor dispersión de radiación y modificar su posición durante los procedimientos, reduciendo así la dosis recibida (Murat et al., 2021).

Además, investigaciones recientes han demostrado el valor clínico de los sistemas de dosimetría en tiempo real para mejorar la seguridad radiológica en procedimientos complejos, al proporcionar información inmediata que facilita la toma de decisiones durante la práctica clínica (Miyoshi et al., 2025).

Impacto Psicológico de la Retroalimentación Inmediata

Un aspecto relevante del monitoreo en tiempo real es su impacto en el comportamiento del personal sanitario. Cuando los profesionales reciben información inmediata sobre la radiación que están recibiendo, tienden a adoptar estrategias de protección más efectivas, como aumentar la distancia respecto al paciente o modificar su posición durante el procedimiento.

Este fenómeno, conocido como retroalimentación conductual, ha sido identificado como un factor clave para reducir la exposición ocupacional. Al visualizar su dosis acumulada en tiempo real, los trabajadores desarrollan una mayor conciencia sobre los riesgos radiológicos y adoptan prácticas más seguras en su actividad cotidiana (Rehani & Frush, 2019).

Tecnología LoT Aplicada al Monitoreo Radiológico

Arquitectura de Sistemas LoT Médicos

El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a una red de dispositivos físicos interconectados capaces de recopilar, transmitir y procesar datos a través de sistemas digitales. En el ámbito de la salud, esta tecnología permite integrar sensores médicos, sistemas de comunicación inalámbrica y plataformas de análisis de datos para mejorar la monitorización clínica (Ahmad et al., 2021).

La arquitectura de un sistema IoT aplicado al monitoreo radiológico generalmente incluye cuatro componentes principales:

Sensores Dosimétricos: encargados de medir la radiación en tiempo real.

Nodos de Transmisión Inalámbrica: que envían los datos a través de redes de comunicación.

Servidores de Procesamiento: donde la información es almacenada y analizada.

Interfaces de Visualización: que permiten a los usuarios acceder a los datos mediante dispositivos como computadoras, tablets o teléfonos móviles.

El desarrollo de sensores compactos y de bajo consumo energético ha permitido crear dosímetros inalámbricos capaces de integrarse en plataformas IoT para monitoreo continuo de radiación (Kanjheri et al., 2025).

Protocolos de Comunicación Inalámbrica

Para transmitir la información recopilada por los sensores dosimétricos, los sistemas IoT utilizan diferentes protocolos de comunicación inalámbrica. Entre los más utilizados se encuentran Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi y Zigbee, los cuales ofrecen distintas ventajas en términos de consumo energético, alcance y velocidad de transmisión de datos (Ahmad et al., 2021).

BLE es especialmente útil en dispositivos portátiles debido a su bajo consumo energético, mientras que Wi-Fi permite transmitir grandes volúmenes de información hacia servidores hospitalarios o plataformas en la nube. Por su parte, Zigbee ofrece una alternativa eficiente para redes de sensores distribuidos en entornos hospitalarios (Sharaf et al., 2022).

Interoperabilidad y Seguridad de los Datos

La implementación de sistemas LoT en el ámbito hospitalario plantea desafíos relacionados con la interoperabilidad y la seguridad de la información. Los dispositivos deben ser capaces de integrarse con otros sistemas clínicos existentes, como los sistemas de información hospitalaria y las plataformas de gestión de imágenes médicas.

Además, es fundamental garantizar la protección de los datos generados por los sensores, especialmente cuando se transmiten a través de redes inalámbricas. Para ello, se utilizan mecanismos de cifrado, autenticación de usuarios y protocolos de seguridad que previenen el acceso no autorizado a la información (Zimmaro et al., 2024).

Eficacia del Monitoreo Activo para la Reducción de Dosis

Diversos estudios han demostrado que los sistemas de monitoreo radiológico en tiempo real pueden contribuir a reducir significativamente la exposición a radiación en entornos clínicos. Estos sistemas permiten identificar áreas con mayor dispersión de radiación y ajustar la posición del personal durante los procedimientos, optimizando así las condiciones de seguridad (Yang & Lee, 2025).

Asimismo, la integración de sensores inalámbricos con plataformas IoT facilita el análisis continuo de los datos de exposición, lo que permite detectar situaciones en las que se superan los niveles de referencia diagnóstica y activar alertas automáticas que advierten al personal sobre posibles riesgos (Lin et al., 2021).

El uso de tecnologías de monitoreo avanzadas también ha demostrado su potencial para mejorar la gestión de la dosis en radiología médica, contribuyendo a la optimización de los protocolos clínicos y al fortalecimiento de las estrategias de protección radiológica (Martin et al., 2020).

En conjunto, estas innovaciones tecnológicas representan una herramienta prometedora para mejorar la seguridad en los servicios de radiología digital, al permitir un control más preciso de la exposición radiológica y facilitar la adopción de prácticas clínicas más seguras.

Marco Metodológico

La presente investigación se orienta a analizar el impacto potencial de la integración de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) en el monitoreo en tiempo real de la radiación en servicios de radiología digital, con énfasis en su contribución al fortalecimiento de la protección radiológica y al cumplimiento del principio ALARA. En este sentido, el diseño metodológico se estructura de manera coherente con la naturaleza del problema planteado y los objetivos propuestos.

Enfoque de la Investigación

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, dado que busca comprender e interpretar el comportamiento de los sistemas de monitoreo radiológico y su evolución hacia modelos tecnológicos inteligentes basados en IoT. Este enfoque permite analizar de manera profunda las dinámicas relacionadas con la gestión de la dosis, la seguridad del paciente y la toma de decisiones en entornos clínicos, sin recurrir a la manipulación de variables.

Desde esta perspectiva, la investigación se centra en el análisis de información científica y técnica que describe cómo los sistemas tradicionales de dosimetría presentan limitaciones al operar de manera retrospectiva, en contraste con los sistemas de monitoreo en tiempo real que permiten una intervención inmediata durante el procedimiento (Miyoshi et al., 2025). Asimismo, el enfoque cualitativo facilita la interpretación del papel que desempeñan las tecnologías IoT en la transformación de los modelos de control de calidad en radiología, especialmente en lo relacionado con la automatización y la generación de alertas tempranas (Ahmad et al., 2021).

Tipo de Investigación

La investigación corresponde a un estudio de tipo descriptivo–analítico con enfoque aplicado.

Es descriptivo, en la medida en que caracteriza las condiciones actuales de la protección radiológica en radiología digital, incluyendo el uso de dosímetros pasivos, la gestión retrospectiva de la dosis y las limitaciones en la trazabilidad de la exposición. Estas características han sido ampliamente documentadas en la literatura, evidenciando que los sistemas tradicionales no permiten una intervención oportuna frente a exposiciones elevadas (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018).

A su vez, el estudio es analítico porque establece una comparación crítica entre los modelos convencionales de monitoreo dosimétrico y las soluciones tecnológicas basadas en IoT, identificando sus ventajas, limitaciones e implicaciones en la práctica clínica. En este sentido, se analiza cómo la incorporación de sensores inteligentes, redes inalámbricas y plataformas de procesamiento de datos permite optimizar la gestión de la radiación y reducir la variabilidad en la exposición (Rehani & Frush, 2019).

Finalmente, el carácter aplicado de la investigación se evidencia en su orientación hacia la generación de conocimiento útil para mejorar los procesos de control de calidad en radiología digital, proponiendo el uso de tecnologías emergentes como herramienta para fortalecer la seguridad radiológica.

Diseño de la Investigación

El diseño metodológico adoptado es no experimental de corte transversal. Es no experimental, ya que no se manipulan variables ni se realizan intervenciones en entornos clínicos, sino que se analizan fenómenos tal como ocurren en la práctica real, a partir de evidencia científica disponible. Este enfoque es coherente con estudios que abordan la implementación de tecnologías en salud desde una perspectiva teórica y documental.

El carácter transversal se justifica porque el análisis se realiza en un momento específico del tiempo, tomando como referencia el estado actual del desarrollo tecnológico en dosimetría y sistemas IoT aplicados a la radiología. Esto permite establecer una visión actualizada del problema, identificando las brechas existentes entre la normativa de protección radiológica y la práctica clínica cotidiana.

Método de Investigación

Se emplea el método analítico–sintético, el cual permite descomponer el problema en sus elementos fundamentales y posteriormente integrarlos en una visión global.

En la fase analítica, se examinan aspectos clave como:

Los principios de protección radiológica y el enfoque ALARA (International Commission on Radiological Protection [ICRP], 2017)

Las características de la dosimetría tradicional y sus limitaciones operativas (IAEA, 2018)

El funcionamiento de los sistemas de dosimetría en tiempo real (Hattori et al., 2023)

La arquitectura y aplicaciones de las tecnologías IoT en salud (Ahmad et al., 2021)

Posteriormente, en la fase sintética, estos elementos se integran para comprender cómo la interconexión de dispositivos y la automatización del monitoreo permiten transformar el control de la radiación de un modelo reactivo a uno preventivo, lo cual representa un avance significativo en la gestión de la calidad en radiología digital.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

La técnica principal utilizada es la revisión documental, la cual permite recopilar información relevante a partir de fuentes científicas, normativas y académicas.

Se analizaron documentos provenientes de:

Organismos internacionales como la ICRP (2017) y la IAEA (2018), que establecen los principios de protección radiológica

Estudios científicos sobre dosimetría en tiempo real y reducción de exposición ocupacional (Murat et al., 2021; Miyoshi et al., 2025)

Investigaciones sobre tecnologías IoT aplicadas al monitoreo de radiación (Ahmad et al., 2021; Lin et al., 2021)

Literatura especializada en radiología digital y control de calidad (Seeram, 2019)

Como instrumento se empleó una matriz de análisis bibliográfico, que permitió organizar la información según variables como objetivos, metodología, resultados y aportes al problema de investigación. Esta herramienta facilitó la comparación entre diferentes enfoques y garantizó la coherencia en la construcción del marco teórico.

Fases del Desarrollo de la Investigación

El desarrollo de la investigación se estructuró en seis fases interrelacionadas:

Identificación del Problema

Se analizó la problemática asociada al monitoreo retrospectivo de la dosis de radiación en radiología digital, identificando la ausencia de sistemas que permitan una intervención en tiempo real, lo cual limita la aplicación efectiva del principio ALARA.

Revisión de la Literatura

Se realizó una búsqueda sistemática de información científica y normativa relacionada con protección radiológica, dosimetría y tecnologías IoT, con el fin de sustentar teóricamente el estudio.

Análisis Crítico de la Información

Se evaluaron las principales limitaciones de los sistemas tradicionales de monitoreo y se analizaron las ventajas de los sistemas basados en IoT, especialmente en términos de automatización, precisión y capacidad de respuesta inmediata.

Integración Conceptual

Se articularon los conceptos de protección radiológica, dosimetría en tiempo real y tecnologías IoT, construyendo un modelo teórico que explica su interacción dentro de los sistemas de radiología digital.

Interpretación de Resultados

Se interpretó la información recopilada, evidenciando que el monitoreo en tiempo real permite reducir la exposición ocupacional y mejorar la toma de decisiones clínicas, tal como lo demuestran estudios recientes en entornos hospitalarios (Murat et al., 2021).

Elaboración del Informe Final

Se consolidaron los resultados del análisis en un documento estructurado, garantizando coherencia argumentativa, redacción académica y cumplimiento de las normas APA en la citación de fuentes.

Consideraciones Éticas

La investigación se fundamenta en el uso responsable de la información, respetando los derechos de autor mediante la citación adecuada de todas las fuentes consultadas. Al tratarse de un estudio documental, no implica riesgos para seres humanos ni intervención en entornos clínicos, por lo que se ajusta a los principios éticos de la investigación científica.

Resultados

En el marco de la presente revisión documental, los resultados se fundamentan en el análisis de estudios científicos y documentos técnicos relacionados con el monitoreo de la radiación en radiología digital. En donde, se identificaron hallazgos relevantes que permiten comparar los sistemas tradicionales de dosimetría con las tecnologías emergentes basadas en monitoreo en tiempo real.

En relación con la eficacia comparativa, se evidencia que la dosimetría tradicional de tipo pasivo presenta limitaciones debido a su carácter retrospectivo, ya que los datos de exposición se obtienen con semanas o meses de retraso. Esto impide la intervención oportuna durante los procedimientos radiológicos (International Atomic Energy Agency, 2018). Por el contrario, los sistemas de dosimetría activa permiten identificar en tiempo real los niveles de radiación, facilitando la detección inmediata de picos de exposición y mejorando la toma de decisiones clínicas (Murat et al., 2021; Miyoshi et al., 2025).

En cuanto al cumplimiento del principio ALARA, los resultados muestran que la retroalimentación inmediata mediante alertas visuales o sonoras influye directamente en el comportamiento del personal de salud, promoviendo prácticas más seguras como el aumento de la distancia respecto a la fuente de radiación y el uso adecuado de barreras de protección. Este comportamiento contribuye a la optimización de la dosis y a la reducción de la exposición ocupacional, en concordancia con las recomendaciones de la International Commission on Radiological Protection.

Respecto a la capacidad técnica de las tecnologías IoT, se identificó que la integración de sensores dosimétricos con protocolos de comunicación inalámbrica como Bluetooth Low Energy (BLE) y Wi-Fi es viable en entornos hospitalarios. Estos sistemas permiten la transmisión

continua de datos hacia plataformas como RIS y PACS, facilitando la trazabilidad y el análisis automatizado de la dosis (Ahmad et al., 2021).

En escenarios clínicos como las unidades de cuidados intensivos, donde no existe blindaje estructural, se identificó que el monitoreo en tiempo real es fundamental para controlar la exposición a radiación dispersa asociada al efecto Compton, especialmente debido a la proximidad del personal al paciente (Seeram, 2019).

En términos de alineación normativa, se evidencia que la implementación de estos sistemas facilita el cumplimiento de la Resolución 482 de 2018 en Colombia, emitida por el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, así como de los estándares internacionales, al permitir el registro automático y preciso de los niveles de referencia diagnóstica (DRLs).

El análisis de los resultados permite identificar que la principal diferencia entre los sistemas tradicionales y los sistemas basados en monitoreo en tiempo real radica en la capacidad de respuesta ante la exposición radiológica. Mientras la dosimetría pasiva limita el control a una evaluación posterior, los sistemas activos permiten una gestión dinámica y continua de la radiación.

Información comparativa evidencia que el monitoreo en tiempo real no solo mejora la precisión en la medición, sino que también genera cambios en el comportamiento del personal de salud. Este aspecto es fundamental, ya que la retroalimentación inmediata fortalece la cultura de protección radiológica y permite aplicar de manera efectiva el principio ALARA.

No obstante, también se identifican desafíos importantes, como la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada, la interoperabilidad entre sistemas clínicos y la seguridad de la información. Estos aspectos requieren estrategias institucionales que faciliten la implementación progresiva de estas tecnologías.

Tabla 2*Comparación entre Dosimetría Tradicional y Monitoreo en Tiempo Real*

Criterio	Dosimetría tradicional (pasiva)	Dosimetría en tiempo real (IoT/activa)
Tiempo de respuesta	Diferido (semanas o meses)	Inmediato (durante el procedimiento)
Capacidad de intervención	Nula	Alta (permite correcciones en el momento)
Control de picos de radiación	No identificables en tiempo real	Identificación instantánea
Impacto en comportamiento del personal	Limitado	Alto (modificación inmediata de conductas)
Cumplimiento del principio ALARA	Parcial	Óptimo y dinámico

Nota. Elaboración propia con base en Murat et al. (2021), Miyoshi et al. (2025) y International Atomic Energy Agency (2018).

Tabla 3*Comparación Literatura Aporte Principal – Resultado Relevante*

Autor	Aporte principal	Resultado relevante
Ahmad et al. (2021)	Implementación de tecnologías IoT en el monitoreo radiológico.	Mejora en la transmisión y el análisis de datos en tiempo real.

Hattori et al. (2023)	Evaluación del uso de dosímetros electrónicos en ambientes hospitalarios.	Disminución de la exposición ocupacional del personal médico.
Murat et al. (2021)	Aplicación de dosimetría en tiempo real para el control radiológico.	Reducción de las dosis de radiación recibidas por el personal médico.
Rehani y Frush (2019)	Seguimiento y control de la exposición radiológica en pacientes.	Fortalecimiento de la seguridad radiológica del paciente.

Nota. Elaboración propia con base en Ahmad et al. (2021), Hattori et al. (2023), Murat et al. (2021) y Rehani y Frush (2019), cuyos hallazgos permitieron identificar los principales aportes de las tecnologías de monitoreo radiológico en tiempo real y su contribución a la seguridad radiológica.

Análisis Internacional del Monitoreo Radiológico en Tiempo Real mediante Tecnologías IoT

En el contexto internacional, la protección radiológica ha evolucionado significativamente gracias a la incorporación de tecnologías inteligentes orientadas al monitoreo en tiempo real de la radiación. Diferentes países han desarrollado estrategias para fortalecer la seguridad del paciente y del personal sanitario, especialmente en procedimientos de radiología digital e intervencionista. A continuación, se presenta un cuadro comparativo que evidencia cómo distintas naciones han abordado esta problemática desde enfoques tecnológicos, normativos e investigativos.

Tabla 4

Comparación Internacional sobre la Implementación de Tecnologías IoT para el Monitoreo Radiológico en Tiempo Real.

País	Abordaje del tema	Avances y tecnologías implementadas	Desafíos identificados
Japón	Japón ha fortalecido el monitoreo radiológico mediante sistemas de dosimetría activa utilizados principalmente en procedimientos intervencionistas y cardiología. Las investigaciones se enfocan en mejorar la seguridad ocupacional mediante retroalimentación inmediata al personal médico (Miyoshi et al., 2025).	Implementación de dosímetros electrónicos en tiempo real y sensores inteligentes conectados a plataformas digitales hospitalarias. Estos sistemas permiten reducir la exposición ocupacional durante procedimientos clínicos complejos (Hattori et al., 2023).	Integración completa entre plataformas hospitalarias y fortalecimiento de la ciberseguridad en sistemas digitales de monitoreo (Zimmaro et al., 2024).
Alemania	Alemania ha desarrollado estrategias enfocadas en la optimización de la dosis y la reducción de la exposición	Uso de dosimetría en tiempo real para identificar zonas de mayor dispersión	Necesidad de actualización tecnológica constante y altos costos asociados a

	del personal sanitario en laboratorios de cardiología y radiología intervencionista (Murat et al., 2021).	radiológica y modificar conductas del personal durante los procedimientos.	la implementación de infraestructura digital avanzada.
Taiwán	Taiwán ha orientado sus investigaciones hacia sistemas automatizados de monitoreo continuo basados en IoT y mecanismos de protección interconectados (Lin et al., 2021).	Desarrollo de sistemas inteligentes capaces de generar alertas automáticas e integrar sensores inalámbricos con plataformas hospitalarias (Ahmad et al., 2021).	Garantizar la interoperabilidad entre sistemas clínicos y mantener la seguridad de la información transmitida mediante redes inalámbricas (Zimmaro et al., 2024).
Colombia	Colombia ha fortalecido la protección radiológica mediante lineamientos normativos establecidos por el Ministerio de Salud y Protección Social. Sin embargo, muchas instituciones aún utilizan sistemas tradicionales de dosimetría pasiva	Implementación progresiva de programas de control de calidad y protección radiológica conforme a la Resolución 482 de 2018. Algunas instituciones avanzan hacia procesos de digitalización y monitoreo automatizado.	Limitaciones económicas, infraestructura tecnológica insuficiente y brecha frente a países con mayor desarrollo tecnológico en radiología digital (International Atomic Energy Agency, 2018).

(Ministerio de Salud y
Protección Social, 2018).

Nota. Elaboración propia con base en la revisión documental de estudios científicos, lineamientos internacionales y normativas relacionadas con protección radiológica, dosimetría activa y tecnologías IoT aplicadas al monitoreo en tiempo real de la radiación en servicios de radiología digital.

El análisis comparativo permite evidenciar que los países con mayor desarrollo tecnológico han orientado sus esfuerzos hacia sistemas de monitoreo radiológico automatizados, inteligentes y conectados mediante tecnologías IoT. Estas estrategias no solo mejoran el control de la exposición radiológica, sino que fortalecen la toma de decisiones clínicas y la seguridad ocupacional. En contraste, países como Colombia avanzan de manera progresiva en la implementación de estas tecnologías, enfrentando desafíos relacionados con infraestructura, interoperabilidad y acceso a recursos tecnológicos especializados.

Asimismo, se observa que una tendencia global común es el fortalecimiento del principio ALARA mediante herramientas capaces de proporcionar información inmediata sobre la dosis recibida. Esto refleja cómo la radiología digital contemporánea evoluciona hacia modelos preventivos y predictivos, apoyados en inteligencia de datos, automatización y monitoreo continuo de la radiación ionizante (ICRP, 2017; Ahmad et al., 2021).

Discusión

A partir de los resultados analizados, se puede establecer que la transición hacia sistemas de monitoreo en tiempo real representa una necesidad más que una opción en el contexto actual de la radiología digital. Si bien los sistemas tradicionales han sido fundamentales en el desarrollo de la protección radiológica, sus limitaciones evidencian la necesidad de adoptar enfoques más dinámicos, automatizados y preventivos.

No obstante, la implementación de tecnologías IoT también plantea desafíos importantes. Entre ellos se destacan la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada, la interoperabilidad entre sistemas hospitalarios (como RIS y PACS) y la seguridad de la información. En este sentido, estudios como los de Zimmaro et al. (2024) advierten sobre los riesgos asociados a la gestión de datos en entornos digitales, lo que exige la aplicación de protocolos de seguridad robustos.

En el contexto colombiano, estos desafíos pueden verse acentuados por limitaciones económicas y tecnológicas en algunas instituciones de salud. Sin embargo, la normativa nacional, liderada por el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, establece lineamientos claros para la implementación de programas de protección radiológica, lo que facilita la incorporación progresiva de estas tecnologías.

Desde esta perspectiva, la discusión no solo gira en torno a la viabilidad tecnológica, sino también a la necesidad de fortalecer la cultura de seguridad radiológica, la capacitación del talento humano y la articulación entre normativa, tecnología y práctica clínica.

Conclusiones

Gracias a lo anteriormente estudiando en la presente investigación se evidencio muy claramente que los sistemas IoT tradicionales muchas veces tienen fallas con algunos equipos ya que estos sistemas ya estandarizados representan muchas fallas a la hora de medir la radiación esto logrando que a la hora de realizar el estudio se limite la radiación obtenida y por lo tanto se dé un porcentaje equivocado

A partir del análisis realizado, se concluye que la incorporación de tecnologías basadas en IoT en el monitoreo de la radiación representa una transformación significativa en el modelo de gestión de la protección radiológica. Este enfoque permite pasar de un sistema reactivo, basado en la evaluación posterior de la exposición, a un modelo preventivo y proactivo, en el cual es posible intervenir durante el procedimiento para minimizar los riesgos asociados.

Asimismo, se evidencia un impacto positivo en la seguridad ocupacional, ya que el uso de dosímetros activos conectados a sistemas inteligentes favorece la reducción de la dosis acumulada en el personal de salud. La disponibilidad de información en tiempo real promueve una cultura de seguridad más consciente y basada en datos, lo que contribuye al cumplimiento efectivo del principio ALARA.

Por otra parte, la investigación pone de manifiesto la necesidad de reducir la brecha tecnológica existente en los servicios de radiología, mediante la integración e interoperabilidad entre los equipos de imagen y las plataformas digitales. Esta articulación es clave para evitar la fragmentación de la información dosimétrica y garantizar una gestión eficiente de la dosis.

Desde una perspectiva ética y de sostenibilidad, la implementación de estas tecnologías no debe considerarse únicamente como un avance técnico, sino como una responsabilidad frente a la seguridad del paciente y del personal de salud. Garantizar que la exposición a la radiación se

mantenga en niveles óptimos constituye un compromiso fundamental en la práctica clínica moderna.

Finalmente, aunque la evidencia respalda la eficacia de estos sistemas, se reconoce que su adopción enfrenta desafíos importantes, como la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada, la capacitación del talento humano y la implementación de protocolos de ciberseguridad que garanticen la protección de los datos. En este sentido, el futuro de la radiología digital dependerá de la capacidad de las instituciones para integrar estas soluciones de manera segura, eficiente y sostenible.

La revisión documental permitió evidenciar que los sistemas tradicionales de monitoreo de la radiación, basados principalmente en dosimetría pasiva, presentan limitaciones significativas al operar de manera retrospectiva, lo que reduce la capacidad de intervención oportuna frente a exposiciones elevadas. En este sentido, se confirma la necesidad de evolucionar hacia modelos más dinámicos que permitan un control continuo y efectivo de la dosis en los servicios de radiología digital.

La integración de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) en el monitoreo radiológico representa una alternativa innovadora y eficaz para fortalecer la protección radiológica. Estos sistemas permiten la medición en tiempo real, la generación de alertas automáticas y una mejor trazabilidad de la dosis, contribuyendo al cumplimiento del principio ALARA y a la reducción de riesgos tanto para el paciente como para el personal de salud.

A pesar de los beneficios identificados, la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real enfrenta desafíos relacionados con la infraestructura tecnológica, la interoperabilidad de los sistemas y la capacitación del talento humano. Por ello, es fundamental promover estrategias institucionales y normativas que faciliten la adopción progresiva de estas tecnologías,

garantizando así una transición efectiva hacia modelos de control de calidad más seguros, eficientes y alineados con los estándares internacionales.

Bibliografia

- Ahmad, M. I., Ab. Rahim, M. H., Nordin, R., Mohamed, F., Abu-Samah, A., & Abdullah, N. F. (2021). Ionizing radiation monitoring technology at the verge of Internet of Things. *Sensors*, 21(22), 7629. <https://doi.org/10.3390/s21227629>
- Al Mansour, A. G., & Sulieman, A. (2025). Radiation and effective dose for contrast-enhanced computed tomography angiography procedures. *Radiation Physics and Chemistry*, 113102. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X25005948>
- Alemayehu, T. G., Bogale, G. G., & Bazie, G. W. (2023). Occupational radiation exposure dose and associated factors among radiology personnel in Eastern Amhara, Ethiopia. *PLoS One*, 18(5), e0286400. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0286400>
- Ali, F., Atfield, J. E., Lee, N., Paterson, L. C., Richardson, R. B., & Yaraskavitch, L. R. (2025). Dosimetric and microdosimetric characterization of blood samples exposed to primarily fast-neutron fields within the ZED-2 reactor by Monte Carlo simulations. *Radiation Physics and Chemistry*, 113165. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X25006577>
- Basaif, A., Oresegun, A., Zubair, H. T., Zin, H., Choo, K. Y., Ibrahim, S. A., & Bradley, D. A. (2025). Pulse-resolved real-time dosimetry in FLASH radiotherapy using Ge-doped silica fiber scintillators. *Radiation Physics and Chemistry*, 113197. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X25006899>
- Britannica Editors (2025, May 2). Compton effect. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/Compton-effect>

- Cheewasukhanont, W., Kothan, S., Intachai, N., Ruangtaweep, Y., Mutuwong, C., Kirdsiri, K., & Kaewkhao, J. (2025). Radiation protective windows for industrial and medical applications: Whole body and human organs dose estimation. *Radiation Physics and Chemistry*, 113105.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X25005973>
- European Society of Radiology. (2019). ESR statement on clinical audit in radiology. *Insights into Imaging*, 10(1). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6776264>
- Ghazali, W. N. A. W., Noor, N. M., Zurihanaz, A. A., Rashid, N. H. A., Khaidzir, M. S., & Shamshurim, N. (2025). Skin dose assessment using direct and indirect measurement for pregnant patient undergoing abdominal fluoroscopy procedure. *Radiation Physics and Chemistry*, 113294.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X25007868>
- Hasan, S., Miry, A., & Salman, T. (2021). *Implementation of radiation monitoring system*. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 25, 1–63.
- Hattori, K., Inaba, Y., Kato, T., Fujisawa, M., Yasuno, H., Yamada, A., Haga, Y., Suzuki, M., Zuguchi, M., & Chida, K. (2023). Evaluation of a new real-time dosimeter sensor for interventional radiology staff. *Sensors*, 23(1), 512. <https://doi.org/10.3390/s23010512>
- International Atomic Energy Agency. (2018). Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation (Specific Safety Guide No. SSG-46). *IAEA*.
<https://www.iaea.org/publications/11102/radiation-protection-and-safety-in-medical-uses-of-ionizing-radiation>

International Commission on Radiological Protection. (2017). Diagnostic reference levels in medical imaging (ICRP Publication 135). *Annals of the ICRP*, 46(1).

<https://doi.org/10.1177/0146645317717209>

Kanxheri, K., Fanò, L., Pennicchi, M., Ceccarelli, S., Placidi, P., & Servoli, L. (2025). A calibration method for a wireless real-time CMOS pixel medical dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 226, 112242.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X24007345>

Kwon, K., Heo, S. Y., Yoo, I., Banks, A., Chan, M., Lee, J. Y., & Rogers, J. A. (2019).

Miniaturized, light-adaptive, wireless dosimeters autonomously monitor exposure to electromagnetic radiation. *Science Advances*, 5(12), eaay2462.

<https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aay2462>

Lin, Y. C., Chen, C. R., Chen, A. Y., Liu, J. C., Huang, S. J., Wen, P. J., & Kao, S. P. (2021). Real-time radiation monitoring system with interlock protection mechanism in Taiwan Photon Source. *Proceedings of IPAC 2021*, 2256–2259.

López, P. O., Dauer, L. T., Loose, R., et al. (2018). ICRP Publication 139: Occupational radiological protection in interventional procedures. *Annals of the ICRP*, 47(2), 1–118.

<https://doi.org/10.1177/0146645317750356>

Luna, J. M. S., Rodríguez, R. G., González, A. S. G., Triana, L. M. P., Matos, J. C. G., Vallet, J. J. B., & Silva, I. Á. (2024). Radiografía de tórax portátil: anatomía, técnica y patología.

SERAM, 1(1). <https://www.piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/10446>

Martin, C. J. (2020). Effective dose in medicine. *Annals of the ICRP*, 49(1_suppl), 126–140.

<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0146645320927849>

Martin, C. J., Harrison, J. D., & Rehani, M. M. (2020). Effective dose from radiation exposure in medicine: Past, present, and future. *Physica Medica*, *79*, 87–92.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1120179720302635>

Miyoshi, M., Hasegawa, K., Maruyama, R., Tateishi, T., Nomura, R., Tsuji, T., Mukai, M., Tsujikawa, T., Uzui, H., & Tada, H. (2025). Radiation safety in catheter ablation: Clinical value of real-time operator dosimetry. *Heart and Vessels*, *40*(12), 1109–1115.

<https://doi.org/10.1007/s00380-025-02567-x>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2018). Resolución 482 de 2018: Por la cual se reglamenta el uso de equipos generadores de radiación ionizante, su control de calidad y la prestación de servicios de protección radiológica. <https://www.minsalud.gov.co>

Murat, D., Wilken-Tergau, C., Gottwald, U., Nemitz, O., Uher, T., & Schulz, E. (2021). Effects of real-time dosimetry on staff radiation exposure in the cardiac catheterization laboratory. *Journal of Invasive Cardiology*, *33*(5), E337–E341.

Rehani, M. M., & Frush, D. P. (2019). Tracking radiation exposure of patients. *The Lancet*, *394*(10199), 754–756.

<https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140673610606575/fulltext>

Salah, H., Qasem, H., Omer, H., Bradley, D. A., & Sulieman, A. (2025). Optimizing CT imaging for patients with disabilities: A survey on radiation dose reduction and protocol improvements. *Radiation Physics and Chemistry*, 113164.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X25006565>

Seeram, E. (2019). *Digital radiography: An introduction for technologists* (2nd ed.). Springer.

- Sharaf, A., Zorkany, M., & Shiple, M. (2022). High efficient low cost gamma-ray radiation sensor based on IoT platform. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *15(4)*, 100463. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687850722082309>
- Vano, E., et al. (2017). Patient dose management systems in medical imaging. *Radiation Protection Dosimetry*.
- Vaño, E., Miller, D. L., Martin, C. J., Rehani, M. M., Kang, K., Rosenstein, M., Ortiz-López, P., Mattsson, S., Padovani, R., & Rogers, A. (2017). ICRP publication 135: Diagnostic reference levels in medical imaging. *Annals of the ICRP*, *46(1)*, 1–144. <https://doi.org/10.1177/0146645317717209>
- Vosiak, P., Yagui, A., Schelin, H., Castilho, P., Mello, R., Paschuk, S., & Asfora, V. (2025). Organ dose estimation in pediatric abdomen and pelvic radiographs using Caldose_X Monte Carlo simulations. *Radiation Physics and Chemistry*, *113094*.
- World Health Organization. (2016). Communicating radiation risks in paediatric imaging. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241510340>
- Yang, D., & Lee, S. H. (2025). Fast and high-precision locally adaptive smoothing filter for real-time radiation monitoring. *IEEE Nuclear Science Symposium Proceedings*.
- Zimmaro, A., Ferraro, R., Boch, J., Saigné, F., Masi, A., & Danzeca, S. (2024). Using software mitigation schemes to improve the availability of IoT applications in harsh radiation environment. *Journal of Instrumentation*, *19(2)*, C02059. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/02/C02059>