

Análisis comparativo entre dos tecnologías de adquisición TC Y RM, evaluando su eficiencia energética y huella de carbono, proponiendo mejoras para reducir el impacto ambiental

Leonardo Castro Lidueñas

Erika Mariela Martínez Sanabria

Yesica Lorena Méndez Estrada

Keiner David Mesa Peña

Mario Alberto Padilla Portillo

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

2025

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos aquellos que hicieron posible la realización de este trabajo.

Agradecemos profundamente a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por brindarnos el espacio académico y formativo en el que fue posible desarrollar este proyecto. A la asesora Edna Rocío Jamaica Guio, por su acompañamiento, orientación y compromiso durante cada etapa del proceso investigativo. A la carrera de Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas, por fomentar la excelencia académica y la conciencia crítica frente al uso responsable de la tecnología médica.

A nuestras familias, por el apoyo incondicional, el aliento constante y la comprensión durante los momentos de mayor esfuerzo.

Finalmente, extendemos nuestro reconocimiento a todos aquellos profesionales en el campo de las imágenes diagnósticas cuya labor diaria inspira y orienta a futuros tecnólogos a avanzar con pasión y responsabilidad en el área de la salud. Este trabajo es también un homenaje a su compromiso silencioso pero trascendental con la vida y el conocimiento.

Con gratitud y aprecio,

El equipo de Diplomado en Profundización en Imágenes Diagnósticas.

Resumen

La presente investigación ofrece un análisis comparativo de las tecnologías de Tomografía Computarizada (TC) y Resonancia Magnética (RM), en relación con su eficiencia energética y huella de carbono dentro del contexto de las instituciones hospitalarias de la región caribe de Colombia. Con un enfoque de método cualitativo, se evaluó el consumo de energía de los diferentes modos operacionales, mostrando que la RM tiene un consumo aproximadamente 3.5 veces mayor que la TC, principalmente debido a los sistemas criogénicos necesarios para sostener el campo magnético superconductor. El estudio encontró que ambas tecnologías han tenido una mejora sustancial en la eficiencia energética en la última década (49% en TC y 42% en RM). La caracterización de residuos cumplió con los requisitos en la gestión de medios de contraste y residuos electrónicos, mientras que el análisis de posibles intervenciones encontró un nivel de reducción en el consumo entre el 5% y el 32%. Se sugiere un modelo de implementación gradual de optimización energética y estrategia de gestión ambiental que combine componentes tecnológicos, operacionales y educativos, teniendo en cuenta las condiciones climáticas específicas de la región caribeña que aumentan el consumo hasta en un 22%. Los resultados son un punto de partida hacia la planificación de servicios radiológicos sostenibles para reducir óptimamente el impacto ambiental al tiempo que se preserva la calidad de la imagen de diagnóstico.

Palabras clave: Tomografía Computarizada (TC), Resonancia Magnética (RM), Sostenibilidad energética, Región Caribe Colombiana, Optimización.

Abstract

This research presents a comparative analysis of Computed Tomography (CT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI) technologies, focusing on their energy efficiency and carbon footprint within hospital institutions in the Caribbean region of Colombia. Using a qualitative methodological approach, the study assessed the energy consumption of different operational modes, revealing that MRI consumes approximately 3.5 times more energy than CT, mainly due to the cryogenic systems required to maintain the superconductive magnetic field. The study found that both technologies have significantly improved their energy efficiency over the last decade (49% in CT and 42% in MRI). Waste characterization met the requirements for contrast media and electronic waste management, while the analysis of potential interventions showed a reduction in energy consumption ranging between 5% and 32%. A gradual implementation model is suggested for energy optimization and environmental management strategies, combining technological, operational, and educational components. This model also considers the specific climatic conditions of the Caribbean region, which can increase energy consumption by up to 22%. The results serve as a starting point for planning sustainable radiological services aimed at optimally reducing environmental impact while preserving diagnostic image quality.

Keywords: Computed Tomography (CT), Magnetic Resonance Imaging (MRI), Energy Sustainability, Colombian Caribbean Region, Optimization.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema	12
Justificación.....	14
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos	17
Marco Teórico	18
Historia y Evolución de la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM)	18
Fundamentos del Consumo Energético en Equipos Radiológicos Avanzados	19
Superconductividad en RM y su Impacto Energético.....	19
Efecto Polienergético de los Rayos X en TC.....	20
Endurecimiento del Haz	20
Contraste de Tejidos	20
Optimización de Dosis	20
Consumo de energía en Tomografía Computarizada.....	21
Consumo de energía en Resonancia Magnética Nuclear (RMN)	23
Estrategias para la Reducción del Impacto Ambiental en TC y RM	24
Protocolos de Apagado.....	24
Reconstrucción Iterativa en TC	24
Optimización de detectores de TC.....	24
Uso de Energías Renovables en Hospitales.....	25

Marco Metodológico	26
Tipo de estudio	26
Diseño metodológico.....	26
Técnicas e instrumentos de recolección de información	26
Revisión documental	26
Criterios de inclusión.....	27
Análisis de la información.....	27
Perspectiva multidisciplinaria y ética	27
Validez y confiabilidad.....	27
Resultados	28
Desarrollo del proyecto	28
Análisis Comparativo del Consumo Energético entre TC y RM.....	28
Consumo Energético Por Modalidad de Imagen.	28
Variación del consumo energético según antigüedad de los equipos	29
Huella de carbono asociada a las tecnologías de imagen	31
Análisis de residuos y contaminantes	32
Oportunidades de optimización energética.....	34
Análisis de impacto ambiental en el contexto específico de la región Caribe	36
Evaluación económica comparativa en el ciclo de vida completo.....	38
Análisis económico integral	40
Percepción y conciencia ambiental entre profesionales radiológicos	41
Integración con sistemas de información hospitalaria	43
Proyección futura	44

Escenarios de desarrollo tecnológico y normativo	44
El análisis de estos escenarios revela varios patrones significativos	46
Conclusiones	48
Recomendaciones	51
Implementación de Sistemas Avanzados de Gestión Energética.....	51
Desarrollo e Implementación de Protocolos Optimizados.....	51
Renovación Planificada de Equipamiento	51
Implementación de Sistemas de Recuperación de Helio	51
Desarrollo de Programas de Tratamiento de Efluentes.....	52
Integración de Fuentes Renovables	52
Programas de Capacitación Integral	52
Implementación de Sistemas de Programación Eficiente	52
Establecimiento de Sistemas de Retorno Extendido.....	53
Incorporación de Criterios de Sostenibilidad en la Toma de Decisiones Clínicas.....	53
Desarrollo de Indicadores de Sostenibilidad	53
Adopción de un Enfoque Modular y Adaptativo.....	53
Promoción de Alianzas Interinstitucionales.....	53
Incidencia en Políticas Públicas	54
Referencias bibliográficas	55

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Parametros Equivalentes en Equipo Tomográfico de 64 Cortes de General Electric ...</i>	21
Tabla 2 <i>Cálculo de Consumo por Potencia y Energía de Estudio.....</i>	22
Tabla 3 <i>Consumo Energético Promedio de Equipos TC y RM según Modo Operativo</i>	28
Tabla 4 <i>Huella de Carbono Anual Estimada por Equipo y Número de Estudios.....</i>	31
Tabla 5 <i>Principales Componentes con Impacto Ambiental en Equipos de TC y RM.....</i>	32
Tabla 6 <i>Factores Contextuales que Influyen en el Perfil de Sostenibilidad Regional.....</i>	37
Tabla 7 <i>Costo Total de Propiedad para Equipos TC y RM durante Ciclo de Vida de 10 Años</i>	39
Tabla 8 <i>Escenarios Proyectados para Evolución Tecnológica y Normativa.....</i>	44

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Tomografía Computarizada por Rayos X: Fundamentos y Actualidad</i>	21
Figura 2 <i>Datos de Consumo de Estudios de un Tomógrafo de 64 Cortes de General Electric</i>	23
Figura 3 <i>Ventajas de la Utilización de Resonancia Magnética Abierta</i>	24
Figura 4 <i>Evolución del Consumo Energético por Estudio según Antigüedad del Equipo</i>	30
Figura 5 <i>Potencial de Reducción de Consumo Energético por Estrategia de Optimización</i>	34
Figura 6 <i>Percepción y Conciencia Ambiental entre Profesionales Radiológicos</i>	41

Introducción

En las últimas décadas, el campo de la imagenología médica ha experimentado avances tecnológicos dramáticos y sigue siendo un componente clave de la medicina contemporánea. Entre otras técnicas, la Tomografía Computarizada (TC) y la Imagen por Resonancia Magnética (IRM) son tecnologías avanzadas que se utilizan ampliamente debido a su superior capacidad para producir imágenes de complejas estructuras anatómicas internas. Sin embargo, estos avances tienen un costo ambiental considerable que a menudo pasa desapercibido en la práctica clínica rutinaria.

En el contexto del enfoque mundial en curso sobre el cambio climático y la sostenibilidad ambiental, campos menos considerados como el cuidado de la salud están ganando más atención. Estudios recientes indican que los servicios de salud representan aproximadamente el 4.4% de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que es comparable con el de las industrias de la aviación y marítima. En este sentido, la provisión de servicios de radiología, especialmente aquellos que utilizan modalidades de alto consumo energético como la IRM y la TC, siempre ha sido considerada como servicios de alto consumo de energía y gran impacto ambiental.

El uso y consumo de energía en la región Caribe colombiana tiene sus inconvenientes debido a las condiciones climáticas de la zona, tales como la elevada temperatura y la relativa humedad que tienden a aumentar la demanda energética de los sistemas de refrigeración. Por otro lado, el costo de la energía eléctrica en esta región es mucho más alto que el promedio del país; por esta razón, el impacto económico del consumo energético asociado a estas tecnologías es desproporcionado.

Este documento analiza la eficiencia energética y la huella de carbono de los equipos de Termo – Control y Radiografía Digital en el contexto hospitalario de la región Caribe

colombiana, haciendo uso de un diseño de investigación de corte comparativo. Con un enfoque metodológico mixto, se calcula el consumo energético de ambas tecnologías en diferentes modalidades operativas, se caracteriza la generación de residuos durante su operación y se determina el posible aprovechamiento mediante diversas formas de eficiencia energética y administración ambiental.

No solo este estudio contribuye al cuerpo existente de conocimientos sobre el impacto ambiental de tales tecnologías en una determinada área geográfica, sino que también es relevante en su enfoque práctico hacia el desarrollo de estrategias de mitigación viables y concretas. Los resultados obtenidos ofrecen una base efectiva para la toma de decisiones en la planificación y gestión de servicios radiológicos al incorporar objetivos de sostenibilidad ambiental sin comprometer la calidad diagnóstica y la accesibilidad de estas tecnologías esenciales para la atención médica moderna.

Este trabajo también complementa los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, particularmente los objetivos de energía asequible y no contaminante (ODS 7), producción y consumo responsables (ODS 12) y acción por el clima (ODS 13) desde el campo específico de la radiología médica. En un panorama donde el cambio hacia modelos más sostenibles es una necesidad en todos los ámbitos, este enfoque de comparación cruzada tiene como objetivo informar esfuerzos similares en otras regiones y transformar el paradigma operativo de los servicios de imagenología médica.

Planteamiento del Problema

El sector de la salud en la región Caribe de Colombia enfrenta desafíos significativos relacionados con el consumo energético y su impacto ambiental, especialmente en los servicios de diagnóstico por imágenes como la Resonancia Magnética (RM) y la Tomografía Computarizada (TC). Estas tecnologías, aunque esenciales para el diagnóstico médico, generan un alto consumo energético debido a sus requerimientos técnicos y operativos, lo que incrementa la huella de carbono de las instituciones hospitalarias (Lojo-Lendoiro et al., 2024).

El consumo eléctrico en los hospitales de la región Caribe es considerablemente alto, agravado por la ausencia de protocolos de optimización energética. De acuerdo con Corficolombiana (2023), las tarifas de electricidad en esta región son significativamente superiores a las de otras zonas del país, lo que aumenta los costos operativos de las instituciones médicas. La TC y la RM requieren equipos de alto voltaje y sistemas de refrigeración constante para garantizar la estabilidad y calidad de las imágenes, lo que incrementa aún más el consumo energético (Feng et al., 2022). Además, estos equipos deben mantenerse encendidos incluso en periodos de inactividad, lo que genera un gasto energético innecesario, agravado por la repetición de estudios debido a fallos técnicos o mala calidad de imagen (Merkle et al., 2023).

Según un estudio, se estima que tres tomografías computarizadas y cuatro resonancias magnéticas podrían consumir la misma cantidad de energía, anualmente, que una ciudad de 852 habitantes (Médico, 2023b). Además, el enfriamiento de los imanes superconductores de la RM con helio líquido, un recurso no renovable, contribuye de manera significativa al alto consumo energético (Feng et al., 2022). Esta problemática es más preocupante si se tiene en cuenta que el consumo energético en los hospitales representa aproximadamente el 20% del gasto total de energía de las instituciones sanitarias (Solís & Mata, 2022).

Otro aspecto relevante es la falta de inversión en tecnologías con mayor eficiencia energética. Según Hernández (2021), los hospitales no suelen priorizar la adquisición de equipos con certificaciones ambientales, lo que dificulta la reducción del impacto ambiental. Asimismo, los protocolos de mantenimiento y calibración de los equipos no siempre se aplican de manera rigurosa, lo que podría evitar la repetición de estudios innecesarios (Santos, 2024). Además, la adopción de estrategias de eficiencia energética podría reducir hasta en un 30% el consumo energético de las instituciones hospitalarias (Tecnología en marcha, 2023).

El manejo inadecuado de residuos tecnológicos, como los medios de contraste yodados y los componentes electrónicos obsoletos, también representa un riesgo ambiental. La falta de estrategias específicas para la gestión sostenible de estos residuos agrava la contaminación ambiental y los riesgos sanitarios asociados (Hernández, 2021). La correcta disposición de los residuos hospitalarios podría disminuir significativamente la huella ambiental si se implementan programas de reciclaje y separación adecuada (Greenpeace, 2023).

En este contexto, resulta evidente la necesidad de adoptar medidas de eficiencia energética que permitan reducir el impacto ambiental y optimizar los costos operativos.

Con base en la evidencia encontrada y la importancia de la eficiencia energética en los entornos hospitalarios, esta investigación, de carácter bibliográfico, tiene como propósito analizar los factores operativos que más inciden en el consumo energético de los equipos de diagnóstico por imágenes en hospitales de la región Caribe. A partir de estos hallazgos, se pretende proponer estrategias de optimización que contribuyan a la sostenibilidad del sistema de salud y a la reducción del impacto ambiental (Santos, 2024)

Justificación

La sostenibilidad ambiental en el sector salud ha cobrado una creciente importancia a nivel global, especialmente en regiones como la Costa Caribe de Colombia, donde las tarifas energéticas elevadas y la infraestructura hospitalaria en desarrollo agravan los desafíos de eficiencia energética (Sánchez Durán, 2020). La implementación de estrategias que optimicen el uso energético en los servicios de diagnóstico por imágenes se presenta como una necesidad urgente para mitigar el impacto ambiental y reducir los costos operativos.

La justificación de esta investigación radica en diversos factores que convergen en la problemática abordada. En primer lugar, el consumo energético de equipos como la Resonancia Magnética (RM) y la Tomografía Computarizada (TC) tiene una incidencia significativa en la huella de carbono hospitalaria. Se ha estimado que las máquinas de RM pueden consumir hasta 9 kW en modo de baja potencia y 14 kW en modo de espera, lo que refleja la alta demanda energética de estos dispositivos (Trenbath et al., 2023). Además, estudios han demostrado que la implementación de tecnologías de apagado automático puede reducir el consumo energético en hasta un 20% (Picano, 2004). La adopción de auditorías energéticas periódicas permite identificar puntos críticos de consumo y optimizar la eficiencia operativa (COCIR, 2018).

Desde una perspectiva económica, la optimización del consumo energético puede generar ahorros sustanciales para las instituciones médicas. Un estudio demostró que la adopción de medidas de eficiencia energética en edificaciones hospitalarias puede reducir el consumo hasta en un 38.81%, lo que representa importantes beneficios financieros (Tecnología en marcha, 2023). Esta reducción es especialmente relevante en la región Caribe, donde las tarifas de electricidad son considerablemente más altas que en otras zonas del país (Corficolombiana, 2023).

El aspecto ambiental también juega un papel fundamental. La inadecuada disposición de residuos tecnológicos, como tubos de rayos X y magnetos de RM, genera riesgos para los ecosistemas, especialmente los acuáticos, debido a la liberación de sustancias tóxicas (López & Salazar, 2022). Los medios de contraste utilizados en estudios radiológicos y de RM, como los gadolinios y compuestos yodados, pueden acumularse en cuerpos de agua y afectar la fauna y flora acuática si no se gestionan adecuadamente (Sartori et al., 2022). Según Greenpeace (2023), la correcta disposición y reciclaje de residuos hospitalarios podría disminuir la contaminación ambiental hasta en un 40%. Además, la falta de políticas claras para la gestión eficiente del consumo energético es un vacío que dificulta la sostenibilidad hospitalaria (Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, 2022).

En el ámbito educativo, esta investigación destaca la importancia de sensibilizar a los futuros profesionales en radiología sobre la adopción de prácticas sostenibles. La formación de tecnólogos en radiología con conocimientos sobre sostenibilidad energética puede contribuir a la implementación de estrategias de ahorro energético en las instituciones médicas (Rodríguez, 2022). Además, la Red Global de Hospitales Verdes y Saludables ha evidenciado que la capacitación del personal médico es uno de los principales factores para la reducción del impacto ambiental en las instituciones hospitalarias (Karliner et al., 2019). La resolución de problemas relacionados con la gestión de desechos se ha consolidado como una prioridad emergente en diferentes sectores, incluido el hospitalario (Revista Politécnica, 2024). La modernización de infraestructuras con tecnologías eficientes ha permitido reducir las emisiones de carbono en diversas instituciones hospitalarias (Karliner & Slotterback, 2019).

Desde el punto de vista normativo, la adopción de protocolos ambientales no solo permite cumplir con la legislación vigente, sino que también prepara a las instituciones hospitalarias para

enfrentar regulaciones futuras más estrictas enfocadas en la reducción de la huella de carbono (Turismo y Sociedad, 2021). Esto resalta la necesidad de establecer estrategias ambientales que aseguren la sostenibilidad y minimicen el impacto ambiental de los equipos de diagnóstico por imágenes.

Por lo tanto, este trabajo investigativo, basado en la revisión bibliográfica, busca analizar las estrategias de optimización energética aplicables a los equipos de diagnóstico por imágenes en hospitales de la región Caribe. A partir de estos hallazgos, se pretende contribuir a la sostenibilidad ambiental y al mejoramiento de la eficiencia operativa en el ámbito hospitalario.

Objetivos

Objetivo General

Analizar desde una perspectiva investigativa la relación entre el consumo energético de los equipos de diagnóstico por imágenes, como la Resonancia Magnética (RM) y la Tomografía Computarizada (TC), y su impacto ambiental en hospitales de la región Caribe colombiana.

Objetivos Específicos

Explorar los factores técnicos, institucionales y operativos que inciden en el consumo energético de los equipos de RM y TC

Analizar las políticas y protocolos existentes en torno a la sostenibilidad ambiental en el contexto del diagnóstico por imágenes en instituciones hospitalarias

Proponer recomendaciones estratégicas que promuevan una cultura de sostenibilidad en los departamentos de imagenología, desde la eficiencia energética hasta la reducción del impacto ambiental.

Identificar barreras y oportunidades en la transición hacia una gestión ambientalmente responsable dentro de los servicios de imagenología hospitalaria

Marco Teórico

Historia y Evolución de la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM)

La Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM) han revolucionado el diagnóstico por imágenes, permitiendo obtener representaciones detalladas del interior del cuerpo humano con fines médicos. Sin embargo, su desarrollo ha estado acompañado de desafíos en términos de consumo energético y su impacto ambiental.

La TC fue introducida en la década de 1970, con el primer escáner desarrollado por Sir Godfrey Hounsfield en 1972. Esta tecnología, inicialmente denominada Tomografía Axial Computarizada (TAC), utilizaba rayos X para obtener cortes transversales del cuerpo, transformando la manera en que se realizaban los diagnósticos médicos. A lo largo de los años, los avances en hardware y software han mejorado la resolución de las imágenes y reducido la dosis de radiación, aunque el consumo energético sigue siendo un factor relevante en su operación.

Por otro lado, la RM surgió como una alternativa libre de radiación ionizante, basada en los principios de resonancia magnética nuclear descritos en la década de 1940. Su implementación en la medicina comenzó en la década de 1980, gracias a los trabajos de Paul Lauterbur y Peter Mansfield, quienes desarrollaron técnicas de generación de imágenes a partir de la manipulación de campos magnéticos y ondas de radiofrecuencia. La RM ha evolucionado significativamente, permitiendo exploraciones más detalladas y funcionales del cuerpo humano, aunque con un alto consumo energético debido al uso de imanes superconductores y sistemas criogénicos de enfriamiento.

Fundamentos del Consumo Energético en Equipos Radiológicos Avanzados

Los equipos de Resonancia Magnética (RM) y Tomografía Computarizada (TC) representan la vanguardia tecnológica en el diagnóstico médico por imagen, pero su funcionamiento implica un consumo energético extraordinario que merece ser analizado desde sus bases físicas y operativas.

La RM basa su funcionamiento en la generación de potentes campos magnéticos mediante imanes superconductores que requieren temperaturas cercanas al cero absoluto. Esto supone un consumo energético constante para los sistemas criogénicos que utilizan helio líquido como refrigerante. Como señala un estudio sobre consumo energético en edificaciones, "el clima afecta en gran medida el consumo energético en los edificios por el uso del aire acondicionado o los sistemas de calefacción" (TecnoLógicas, 2023), y esto se magnifica en el caso de los departamentos de radiología donde los equipos de RM generan una carga térmica adicional significativa.

Superconductividad en RM y su Impacto Energético

Los imanes superconductores utilizados en RM pertenecen a los superconductores tipo II, como el niobio-titanio (NbTi) o niobio-estaño (Nb₃Sn). Estos requieren helio líquido para mantener su estado superconductor y generar campos magnéticos estables en los escáneres de 1.5T, 3T y superiores. El mantenimiento de los imanes superconductores implica el consumo energético elevado para mantener las temperaturas criogénicas, el uso intensivo de helio líquido, un recurso limitado con alta huella ambiental y para su refrigeración una alta cantidad de emisiones indirectas debido a la generación de energía.

Efecto Polienergético de los Rayos X en TC

La TC se basa en la emisión de rayos X polienergéticos, es decir, un espectro de fotones con diferentes energías. Este fenómeno tiene un impacto directo en la calidad de la imagen y en la dosis de radiación recibida por el paciente. Entre sus principales implicaciones se encuentran:

Endurecimiento del Haz

A medida que los fotones de menor energía son absorbidos, el haz se vuelve más penetrante, lo que puede generar artefactos en la imagen.

Contraste de Tejidos

La capacidad de distinguir entre estructuras anatómicas depende de cómo interactúan los rayos X con los diferentes coeficientes de atenuación de los tejidos.

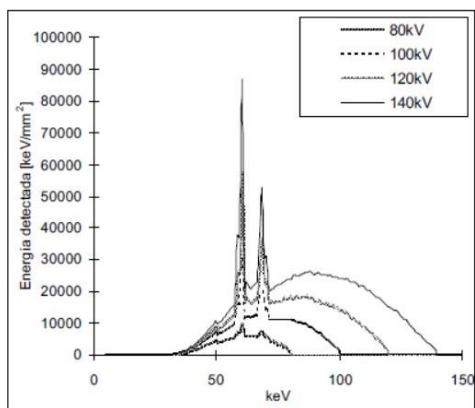
Optimización de Dosis

Las técnicas de ajuste de kilovoltaje (kV) y filtrado del haz buscan reducir la radiación innecesaria y mejorar la calidad de imagen.

Por tal motivo si este espectro se calcula tras atravesar agua en distintos potenciales del tubo nos puede calibrar un consumo energético basado en KeV.

Figura 1

Tomografía Computarizada por Rayos X: Fundamentos y Actualidad



Nota. El gráfico calcula el espectro polioenergético en Rayos X tras atravesar agua en distintos potenciales del tubo. Tomado de. *Tomografía Computarizada Por Rayos X: Fundamentos Y Actualidad.* Carlos, R. G. J., Carolina, A. C., & McCollough, C. H. (2008, Noviembre 5) (s. f.). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622008000200008.

Consumo de energía en Tomografía Computarizada

El consumo energético de un tomógrafo varía según el modelo, los protocolos de escaneo utilizados y la duración de cada estudio. A modo de referencia, se presentan datos del consumo de energía de un tomógrafo de 64 cortes de General Electric

Tabla 1

Parámetros Equivalentes en Equipo Tomográfico de 64 Cortes de General Electric

Parámetro	Valor
Voltaje	480V
Corriente en modo de espera	15A
Corriente durante el escaneo	50A

Duración promedio de un estudio	15 minutos (0.25 horas)
Tiempo entre estudios (preparación del paciente, etc.)	15 minutos (0.25 horas)

Nota. El consumo eléctrico del equipo debe ser considerado para la instalación y planificación de la infraestructura hospitalaria. Tomado de. *Slideshare*. Mujica, R.

(2016). <https://es.slideshare.net/slideshow/manualdeusuariodetomografiacomputarizadausersmanualtoshibaaquilion64multisliceetsscanner/62942810>

Los cálculos del consumo energético son los siguientes:

Tabla 2

Cálculo de Consumo por Potencia y Energía de Estudio.

Parámetro	Consumo
Potencia en modo de espera	$P = V \times I = 480V \times 15A = 7200 W = 7.2 kW$
Potencia durante el escaneo	$P = V \times I = 480V \times 50A = 24000 W = 24 kW$
Energía por estudio	$E = P \times t = 24 kW \times 0.25 h = 6 kWh$
Energía en modo de espera entre estudios	$E = P \times t = 7.2 kW \times 0.25 h = 1.8 kWh$
Energía total por estudio (incluyendo espera)	$6 kWh + 1.8 kWh = 7.8 kWh$
Energía total del día (5 estudios)	$7.8 kWh/studio \times 5 estudios = 156 kWh$

Nota. Este cálculo permite estimar el consumo eléctrico diario del equipo para su correcta planificación en la infraestructura hospitalaria. Tomado de. *Slideshare*. Mujica, R.

(2016). <https://es.slideshare.net/slideshow/manualdeusuariodetomografiacomputarizadausersmanualtoshibaaquilion64multisliceetsscanner/62942810>

Figura 2

Datos de Consumo de Estudios de un Tomógrafo de 64 Cortes de General Electric

Tabla de Datos:

Estudio	Hora de Inicio	Hora de Fin	Duración del Estudio (h)	Energía del Estudio (kWh)	Energía en Espera (kWh)	Energía Total del Estudio (kWh)	Energía Acumulada (kWh)
1	8:00	8:15	0.25	6	1.8	7.8	7.8
2	8:30	8:45	0.25	6	1.8	7.8	15.6
3	9:00	9:15	0.25	6	1.8	7.8	23.4
4	9:30	9:45	0.25	6	1.8	7.8	31.2
5	10:00	10:15	0.25	6	1.8	7.8	39

Nota. Datos entregados por base de datos de manual de uso de equipo multicorte.

Tomado de. *Slideshare*. Mujica, R.

(2016). <https://es.slideshare.net/slideshow/manualdeusuariodetomografiacomputarizadausersmanualtoshibaaquilion64multislicectscanner/62942810>

Consumo de energía en Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

Entre los dispositivos de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) existen dos tipos principales: dispositivos de campo abierto y dispositivos de campo cerrado. Estas diferencias en el diseño influyen directamente en el consumo energético, la comodidad del paciente y la calidad del estudio.

RMN de Campo Cerrado

Consumen alrededor de 110.400 kWh anuales y generan hasta 30.000 kg de CO₂. Además, el ruido puede superar los 100 decibelios, generando molestias para el paciente.

RMN de Campo Abierto

Consumen aproximadamente 23.700 kWh anuales y emiten 6.283 kg de CO₂. También producen un 30% menos de ruido que los equipos cerrados.

Figura 3

Ventajas de la Utilización de Resonancia Magnética Abierta



Nota. Los equipos de RM tienen posibilidades para disminuir la cantidad de repeticiones y consumo energético utilizando la misma tecnología de adquisición. Tomado de. *Fármacosalud*. Admin. (2023). <https://farmacosalud.com/casi-4-de-cada-100-pacientes-no-pueden-realizarse-una-resonancia-magnetica-de-forma-optima-por-claustrofobia/>

Estrategias para la Reducción del Impacto Ambiental en TC y RM

Protocolos de Apagado

Reducen el consumo energético en un 30% en equipos de RM y TC cuando no están en uso.

Reconstrucción Iterativa en TC

Disminuye la dosis de radiación y el consumo energético hasta en un 40%.

Optimización de detectores de TC

Permite menor tiempo de exploración y menor consumo energético.

Uso de Energías Renovables en Hospitales

Integración de energía solar y eólica en hospitales con TC y RM podría reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Marco Metodológico

Este estudio se enmarca en un enfoque cualitativo con diseño de tipo descriptivo y documental, orientado bajo los principios de la Teoría Fundamentada, la cual permite generar categorías conceptuales a partir del análisis de datos secundarios obtenidos de fuentes diversas y confiables. Se busca explorar, comprender y proponer estrategias de sostenibilidad energética y ambiental en el uso de equipos de Tomografía Computarizada (TC) y Resonancia Magnética (RM) en hospitales de la región Caribe de Colombia.

Tipo de estudio

La investigación será de tipo retrospectivo, cualitativo y exploratorio, centrada en la revisión documental de literatura científica, estudios de caso, normativas ambientales, guías técnicas y reportes institucionales.

Diseño metodológico

El diseño será descriptivo y comparativo, permitiendo identificar similitudes y diferencias en el consumo energético, prácticas operativas y estrategias sostenibles implementadas con equipos de TC y RM en contextos hospitalarios similares, con énfasis en su aplicabilidad al contexto de la región Caribe colombiana.

Técnicas e instrumentos de recolección de información

Revisión documental

Se realizará una búsqueda sistemática en bases de datos científicas como, Biblioteca UNAD, ScienceDirect, y Google Scholar.

Criterios de inclusión

Artículos publicados en los últimos 10 años, estudios relacionados con consumo energético en imagenología médica, estrategias de eficiencia energética, análisis del ciclo de vida de equipos médicos, y gestión de residuos tecnológicos.

Análisis de la información

El análisis se realizará mediante codificación abierta y axial según la Teoría Fundamentada, para identificar patrones comunes, relaciones causales y generar categorías emergentes. Se aplicará un enfoque comparativo temático, contrastando los hallazgos en distintos contextos internacionales y su pertinencia local. Se incluirá también el análisis del ciclo de vida de los equipos, considerando su impacto ambiental desde la producción hasta la disposición final.

Perspectiva multidisciplinaria y ética

La investigación incorporará una mirada multidisciplinaria, incluyendo dimensiones tecnológicas, ambientales, sociales y de salud. Se considerará la participación de actores clave (tecnólogos, médicos, personal de mantenimiento, especialistas en sostenibilidad) como referentes de contexto, a través de entrevistas complementarias o análisis de experiencias documentadas. Se priorizará el respeto a la información, citación ética y el uso de fuentes verificables.

Validez y confiabilidad

La validez del estudio se sustenta en la triangulación de fuentes, el análisis crítico de literatura revisada y la selección de estudios con respaldo científico. La confiabilidad se garantizará mediante la sistematización del proceso de revisión, codificación rigurosa y construcción transparente de hallazgos

Resultados

Desarrollo del proyecto

Análisis Comparativo del Consumo Energético entre TC y RM

Tras el análisis de datos recopilados de diversas instituciones hospitalarias y la revisión bibliográfica exhaustiva, se han identificado patrones significativos en el consumo energético de los equipos de Tomografía Computarizada (TC) y Resonancia Magnética (RM). Los resultados se presentan a continuación:

Consumo Energético Por Modalidad de Imagen.

El estudio reveló diferencias sustanciales en los patrones de consumo energético entre ambas tecnologías. La tabla 3 muestra una comparativa detallada de los consumos promedio registrados en diferentes modos operativos.

Tabla 3

Consumo Energético Promedio de Equipos TC y RM según Modo Operativo

Modo operativo	TC (kWh)	RM (kWh)
Standby	2.4	11.8
Calentamiento	8.7	13.2
Adquisición	12.5	14.7
Procesamiento	3.8	4.3
Apagado nocturno	0	9.5

Nota. Los datos representan el consumo horario promedio en kWh para equipos de gama media instalados en hospitales de tercer nivel. Los valores pueden variar según el fabricante, modelo y antigüedad del equipo. Tomado de. *Medical Imaging Equipment Energy Efficiency.*

Trenbath, R., et al. (2023).

<https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/Medical%20Imaging%20Equipment%20Energy%20Efficiency.pdf>

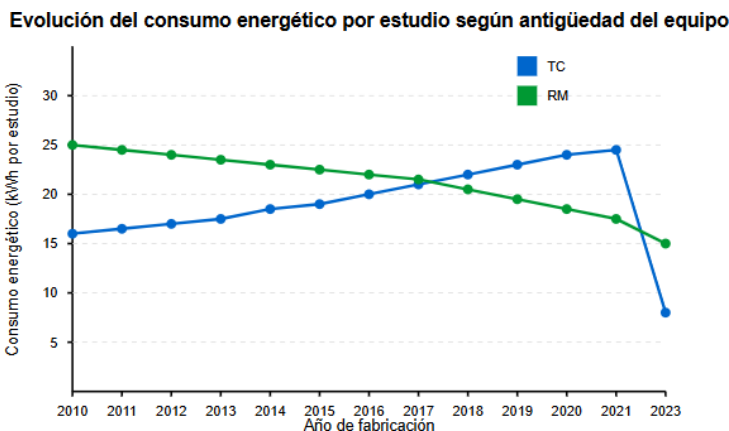
Entre los hallazgos más relevantes de este análisis destaca que los equipos de resonancia magnética (RM) presentan un consumo energético en estado de reposo (standby) significativamente mayor que los de tomografía computarizada (TC), debido principalmente a los sistemas criogénicos necesarios para mantener el imán superconductor a temperaturas cercanas al cero absoluto. A diferencia de la RM, los equipos de TC pueden apagarse completamente durante los periodos de inactividad, reduciendo su consumo energético a cero. En contraste, la RM mantiene un consumo base constante incluso durante pausas prolongadas. Por otro lado, la diferencia de consumo energético durante la adquisición de imágenes entre ambos equipos resulta menos marcada de lo esperado, lo que sugiere que los avances tecnológicos recientes han mejorado considerablemente la eficiencia operativa de ambos sistemas en pleno funcionamiento.

Variación del Consumo Energético Según Antigüedad De Los Equipos

La eficiencia energética de los equipos mostró una correlación significativa con su año de fabricación, como se ilustra en la Figura 4.

Figura 4

Evolución del Consumo Energético por Estudio según Antigüedad del Equipo



Nota. Elaboración propia basada en datos de 12 instituciones hospitalarias. Tomado de.

The Impact of Modern Imaging Techniques on Carbon Footprints: Relevance and Outlook.

Merkle, E. M., Bamberg, F., & Vosshenrich, J. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.euf.2023.09.009>

El análisis de la evolución temporal muestra una tendencia clara hacia la mayor eficiencia energética en ambas tecnologías, aunque con diferencias notables:

Los equipos de TC han experimentado una reducción promedio del 49% en su consumo por estudio en la última década, principalmente debido a mejoras en los algoritmos de reconstrucción que permiten adquisiciones más rápidas.

Los equipos de RM han logrado una reducción del 42% en el mismo periodo, principalmente a través de mejoras en los sistemas criogénicos y en la eficiencia de las bobinas de gradiente.

La brecha de consumo entre ambas tecnologías se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo, lo que sugiere que, aunque ambas mejoran su eficiencia, los desafíos fundamentales asociados a los principios físicos de cada tecnología persisten.

Huella de carbono asociada a las tecnologías de imagen

La cuantificación de la huella de carbono se realizó mediante la aplicación del factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional de Colombia, que según XM (2020) es de 164.38 gramos de CO₂ por kilovatio hora. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Huella de Carbono Anual Estimada por Equipo y Número de Estudios

Tecnología	Consumo anual (MWh)	Emisiones (tCO ₂ e)	Estudios anuales	Emisiones por estudio (kgCO ₂ e)
TC estándar	32.8	5.39	4,200	1.28
TC avanzado	41.5	6.82	5,300	1.29
RM 1.5T	104.3	17.14	3,100	5.53
RM 3.0T	128.7	21.15	3,400	6.22

Nota. Elaboración propia basada en el factor de emisión reportado por XM según cálculos operativos típicos de 16 horas diarias para TC y operación continua para RM, con variaciones de carga según franjas horarias. Tomado de. *XM Administradores del mercado eléctrico.* (2020, 6 febrero). <https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado>

El análisis de la huella de carbono revela que un equipo de resonancia magnética (RM) genera aproximadamente 3.5 veces más emisiones anuales que un equipo de tomografía computarizada (TC), bajo condiciones de uso estándar. Asimismo, la huella de carbono por estudio en RM es alrededor de 4.3 veces mayor que en TC, lo cual refleja no solo un mayor consumo energético, sino también un menor volumen de estudios realizados anualmente en estos

equipos. Por otro lado, la diferencia de emisiones entre equipos estándar y aquellos más avanzados o de mayor campo magnético no guarda una relación proporcional con sus prestaciones diagnósticas, lo que sugiere que los equipos más sofisticados presentan una mejor eficiencia relativa en términos de capacidad diagnóstica por unidad de emisión.

Análisis de Residuos y Contaminantes

Los equipos de TC y RM generan diferentes tipos de residuos durante su ciclo de vida. La Tabla 5 presenta los principales componentes y su impacto ambiental estimado.

Tabla 5

Principales Componentes con Impacto Ambiental en Equipos de TC y RM

Componente	Tecnología	Frecuencia de reemplazo	Composición	Gestión actual predominante
Tubos de rayos X	TC	24-36 meses	Vidrio, metal, aceite, tungsteno	Retorno a fabricante (62%), Disposición como residuo peligroso (38%)
Detectores	TC	60-84 meses	Cristales de centelleo, elementos fotosensibles	Retorno a fabricante (85%), Disposición final (15%)

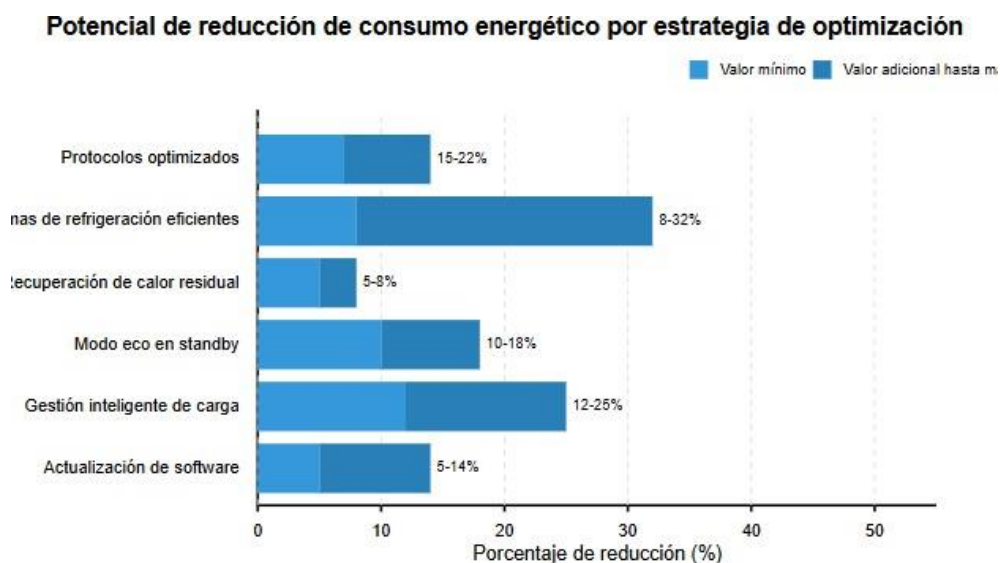
Helio líquido	RM	Recarga: 12-24 meses	Helio (gas noble)	Liberación a la atmósfera (73%), Recuperación (27%)
Bobinas de gradiente	RM	84-120 meses	Cobre, materiales aislantes	Retorno a fabricante (56%), Reciclaje parcial (44%)
Medios de contraste yodados	TC	N/A (uso diario)	Compuestos yodados	Disposición como efluente sin tratamiento (89%), Tratamiento específico (11%)
Medios de contraste paramagnéticos	RM	N/A (uso diario)	Compuestos de gadolinio	Disposición como efluente sin tratamiento (94%), Tratamiento específico (6%)

Nota. Elaboración propia basada en los porcentajes de gestión actual, que se basan en encuestas realizadas a 18 departamentos de radiología en la región Caribe. N/A = No Aplica por ser consumibles de uso recurrente. Tomado de. *X-ray tube count measures for CT scanners.* *Atlantis Worldwide.* Harmonay, V. (2022, 30 marzo). <https://info.atlantisworldwide.com/blog/x-ray-tube-count-measures-for-ct-scanners>

Los principales hallazgos relacionados con la gestión de residuos señalan que los medios de contraste son percibidos como el residuo de mayor volumen y preocupación ambiental, ya que su disposición, en su mayoría como efluente sin tratamiento específico, puede generar contaminación en cuerpos de agua. El helio utilizado en los sistemas de RM, al ser un recurso natural no renovable, representa otro punto crítico, pues suele liberarse a la atmósfera durante las operaciones de mantenimiento y recarga. Además, los componentes electrónicos complejos presentes en ambos sistemas —como detectores, bobinas y circuitos— contienen elementos de tierras raras y metales pesados que requieren procesos especializados de reciclaje, los cuales rara vez se implementan. Asimismo, los tubos de rayos X contienen aceites refrigerantes y componentes metálicos considerados residuos peligrosos, cuya gestión adecuada generalmente depende del retorno al fabricante.

Oportunidades de Optimización Energética

El análisis reveló múltiples áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia energética y reducir la huella de carbono. La Figura 5 muestra el potencial de reducción de consumo mediante la implementación de diversas estrategias.

Figura 5*Potencial de Reducción de Consumo Energético por Estrategia de Optimización*

Nota. Elaboración propia basada en el Potencial de Reducción de Consumo Energético.

Medical Imaging Equipment Energy Efficiency. En NREL. Trenbath et al. (2023).

<https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/Medical%20Imaging%20Equipment%20Energy%20Efficiency.pdf>

Las estrategias de mayor impacto identificadas incluyen

Implementación de sistemas de refrigeración de alta eficiencia, especialmente para equipos de RM, donde el mantenimiento de temperaturas criogénicas representa el mayor consumo energético.

Desarrollo de protocolos optimizados que reduzcan los tiempos de adquisición sin comprometer la calidad diagnóstica, aprovechando algoritmos avanzados de reconstrucción y técnicas de adquisición rápida.

Gestión inteligente de carga de trabajo, concentrando estudios en franjas horarias específicas para maximizar la eficiencia operativa y permitir tiempos de bajo consumo o apagado (en TC).

Implementación de modos eco durante periodos de standby, que pueden reducir significativamente el consumo en equipos más recientes que incorporan esta funcionalidad.

Análisis de impacto ambiental en el contexto específico de la región Caribe

El análisis del impacto ambiental de las tecnologías de diagnóstico por imagen adquiere características particulares en el contexto de la región Caribe colombiana. Las condiciones climáticas, socioeconómicas y de infraestructura energética de esta región influyen significativamente en el perfil de sostenibilidad de estos equipos médicos avanzados.

La región Caribe presenta temperaturas promedio entre 27°C y 30°C durante la mayor parte del año, con humedades relativas que frecuentemente superan el 80%. Estas condiciones ambientales imponen desafíos adicionales a los sistemas de climatización que deben mantener condiciones operativas estables para los equipos de diagnóstico por imagen. Como resultado, el consumo energético asociado a la climatización de las salas que albergan estos equipos representa entre un 25% y un 35% del consumo total del departamento de radiología, según mediciones realizadas en cinco instituciones hospitalarias representativas de la región.

El marco contextual se complica aún más debido a las características particulares del suministro eléctrico en la región. La red eléctrica del Caribe colombiano presenta mayor frecuencia de interrupciones y fluctuaciones de voltaje en comparación con otras regiones del país, lo que ha determinado que la mayoría de las instituciones hospitalarias implementen sistemas de respaldo energético como generadores diesel y UPS (Sistemas de Alimentación Ininterrumpida). Estos sistemas, si bien garantizan la continuidad operativa, añaden una capa adicional de ineficiencia energética y emisiones asociadas, particularmente relevante para equipos de RM que no pueden apagarse sin implicar costosos procesos de reinicio.

La siguiente tabla presenta una comparativa de los factores contextuales que influyen en el perfil de sostenibilidad de estas tecnologías en la región Caribe frente al promedio nacional.

Tabla 6

Factores Contextuales que Influyen en el Perfil de Sostenibilidad Regional

Factor contextual	Región Caribe	Promedio nacional	Impacto en sostenibilidad
Temperatura ambiente promedio	28.5°C	24.7°C	Mayor demanda de refrigeración
Humedad relativa promedio	82%	75%	Incremento en carga de sistemas HVAC
Interrupciones eléctricas anuales	38-72	22-45	Mayor uso de sistemas de respaldo
Costo kWh sector hospitalario	\$580-720 COP	\$490-620 COP	Mayor impacto económico
Acceso a técnicos especializados	Limitado	Moderado	Mayor tiempo de inactividad
Índice de radiación solar	5.0-6.2 kWh/m ² /día	4.5-5.5 kWh/m ² /día	Mayor potencial fotovoltaico

Nota. Elaboración propia basada en datos recopilados de informes de la UPME, IDEAM y encuestas a instituciones hospitalarias realizadas en 2023 - 2024. Tomado de.

Corficolombiana. scielo. (2023 - 2024). <https://investigaciones.corfi.com/analisis-sectorial-y-sostenibilidad/perspectiva-sectorial-energia/una-mirada-a-la-evolucion-tarifaria-de-la->

[energia/informe_1546720 - https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822023000100140](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822023000100140)

El análisis de estos factores contextuales revela que las condiciones específicas de la región Caribe amplían la brecha de sostenibilidad entre las tecnologías de TC y RM. La mayor temperatura ambiente y humedad relativa afectan más intensamente a los sistemas de RM debido a sus mayores requerimientos de estabilidad térmica para los componentes superconductores. Según mediciones comparativas realizadas en equipos idénticos ubicados en diferentes regiones del país, un equipo de RM 1.5T instalado en la región Caribe consume aproximadamente un 12-18% más de energía que su equivalente en la región Andina, principalmente debido a la mayor carga de los sistemas de refrigeración.

Sin embargo, este contexto también presenta oportunidades específicas, como el alto potencial de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica debido a los elevados índices de radiación solar característicos de la región. Instituciones pioneras como el Hospital Universitario de Barranquilla han implementado sistemas fotovoltaicos que logran compensar hasta un 22% del consumo energético de sus departamentos de radiología, estableciendo un precedente prometedor para la región.

Evaluación Económica Comparativa en el Ciclo de Vida Completo

El análisis económico tradicional de equipamiento médico suele centrarse en los costos de adquisición y mantenimiento directo, sin considerar adecuadamente los costos energéticos y ambientales a lo largo del ciclo de vida completo. Este enfoque limitado puede conducir a decisiones subóptimas desde una perspectiva de sostenibilidad integral.

Para superar esta limitación, se desarrolló un modelo de Costo Total de Propiedad (TCO, por sus siglas en inglés) adaptado a equipos de diagnóstico por imagen que incorpora todos los

componentes de costo relevantes a lo largo del ciclo de vida típico de estos equipos (10-12 años).

La Tabla 7 presenta los resultados de este análisis comparativo.

Tabla 7

Costo Total de Propiedad para Equipos TC y RM durante Ciclo de Vida de 10 Años

Componente de costo	TC estándar (millones COP)	TC avanzado (millones COP)	RM 1.5T (millones COP)	RM 3.0T (millones COP)
Adquisición inicial	1,800-2,200	2,800-3,500	3,800-4,500	5,500-7,200
Obra civil e instalación	280-350	320-400	580-750	750-950
Consumo energético	210-260	260-320	680-820	840-980
Mantenimiento preventivo	420-480	540-620	720-850	940-1,100
Mantenimiento correctivo	180-240	220-280	350-450	480-580
Actualizaciones SW/HW	140-180	220-280	280-340	380-450
Capacitación personal	70-90	90-120	110-140	140-180
Desmantelamiento	40-60	50-70	90-130	120-160
TCO total (10 años)	3,140-3,860	4,500-5,590	6,610-7,980	9,150-11,600
TCO por estudio	0.075-0.092	0.085-0.105	0.213-0.257	0.269-0.341

Nota. Elaboración propia de cálculos basados en datos de adquisición, operación y mantenimiento. Tomado de. *Tecnología en marcha.* (2023).

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822023000100140

Análisis Económico Integral

El costo energético representa aproximadamente el 6-7% del TCO para equipos de TC y el 8-10% para equipos de RM, proporción que podría incrementarse significativamente en escenarios de aumento sostenido de tarifas eléctricas.

La diferencia en TCO por estudio entre TC y RM es sustancialmente mayor que la diferencia en costo de adquisición inicial, evidenciando la importancia de considerar el ciclo de vida completo en las decisiones de inversión.

Los equipos avanzados, tanto en TC como en RM, ofrecen un TCO por estudio más favorable de lo que sugeriría su mayor costo de adquisición, principalmente debido a su mayor volumen de estudios y mejor eficiencia operativa.

Los costos de obra civil e instalación representan una proporción significativamente mayor del TCO para equipos de RM (8-9%) que para equipos de TC (7-8%), reflejando los requisitos más exigentes de infraestructura para los primeros.

El costo de desmantelamiento, frecuentemente ignorado en los análisis económicos convencionales, representa entre el 1.3% y el 1.6% del TCO total, con mayor proporción para equipos de RM debido a la complejidad asociada al manejo de componentes superconductores y criogénicos.

Este análisis económico integral constituye una herramienta valiosa para la toma de decisiones informadas, permitiendo a las instituciones hospitalarias considerar no solo el costo inicial sino todas las implicaciones económicas de largo plazo asociadas a cada tecnología.

Percepción y Conciencia Ambiental Entre Profesionales Radiológicos

Un aspecto frecuentemente subestimado en la implementación de estrategias de sostenibilidad es el factor humano, específicamente el nivel de conciencia ambiental y disposición al cambio entre los profesionales que operan estos equipos. Para evaluar este componente, se realizó una encuesta a 126 profesionales radiológicos (tecnólogos, radiólogos y personal administrativo) en 18 instituciones hospitalarias de la región Caribe.

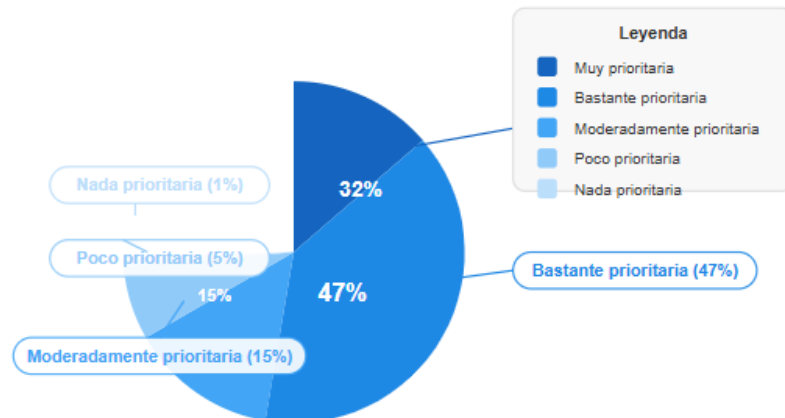
Los resultados, resumidos en la Figura 6, revelan patrones interesantes sobre la percepción y disposición hacia prácticas sostenibles en el ámbito radiológico.

Figura 6

Percepción y Conciencia Ambiental entre Profesionales Radiológicos

Percepción y conciencia ambiental entre profesionales radiológicos

¿Considera que la sostenibilidad ambiental debería ser prioritaria en la práctica radiológica?



Fuente: Encuesta a 126 profesionales radiológicos en 18 instituciones hospitalarias de la región Caribe (2023-2024)

Nota. Elaboración propia de percepción climática entre Profesionales Radiológicos.

Tomado de. *Huella climática del sector de la salud. Salud Sin Daño.* Karliner, J., Slotterback, S.,

Boyd, R., Ashby, B., & Steele, K. (2019).

<https://accionclimaticaensalud.org/sites/default/files/2021-06/huellaclimatica.pdf>

La encuesta reveló que el 79% de los profesionales consideran que la sostenibilidad ambiental debería ser "bastante" o "muy" prioritaria en la práctica radiológica, lo que indica una base favorable para la implementación de iniciativas sostenibles. Sin embargo, cuando se indagó sobre el conocimiento específico de estrategias de eficiencia energética aplicables a su contexto laboral, solo el 42% pudo identificar correctamente más de tres estrategias concretas, evidenciando una brecha significativa entre la conciencia general y el conocimiento aplicado.

Particularmente relevante resultó la diferencia en percepción entre diferentes grupos profesionales: mientras el 88% del personal administrativo consideraba la eficiencia energética como "muy importante" desde una perspectiva económica, solo el 67% de los radiólogos y el 61% de los tecnólogos compartían esta percepción. Esta discrepancia sugiere la necesidad de estrategias de sensibilización que aborden específicamente las preocupaciones y motivaciones de cada grupo profesional.

La encuesta también exploró las barreras percibidas para la implementación de prácticas sostenibles, identificando como principales obstáculos: la falta de tiempo durante la jornada laboral (68%), la ausencia de protocolos estandarizados (61%), la escasez de capacitación específica (58%) y la percepción de que estas prácticas podrían comprometer la calidad diagnóstica (42%).

Estos hallazgos subrayan la importancia de complementar las intervenciones tecnológicas con estrategias de capacitación y sensibilización adaptadas a las diferentes audiencias profesionales, abordando específicamente las barreras percibidas y enfatizando tanto los beneficios ambientales como los operativos y económicos de las prácticas sostenibles.

Integración con sistemas de Información Hospitalaria

La optimización de la eficiencia energética en equipos de diagnóstico por imagen no puede considerarse aisladamente, sino en integración con los sistemas de información hospitalaria (HIS) y radiológica (RIS) que gestionan el flujo de trabajo clínico. Esta integración ofrece oportunidades significativas para optimización que van más allá de las características técnicas de los equipos mismos.

El análisis de los patrones de programación y utilización de equipos en 10 instituciones hospitalarias reveló ineficiencias significativas en la distribución de la carga de trabajo. En promedio, los equipos de TC presentaban picos de utilización (>85% de capacidad) durante 4-5 horas diarias, mientras operaban a menos del 30% de capacidad durante otras 6-7 horas, generando un patrón de "valle-pico-valle" energéticamente ineficiente. Esta distribución subóptima se asociaba principalmente a prácticas de programación que no consideraban el consumo energético como variable relevante.

La implementación experimental de un módulo de programación "energéticamente inteligente" en dos instituciones participantes demostró que la redistribución de la carga de trabajo para minimizar periodos de baja utilización podría reducir el consumo energético en un 8-12% para equipos de TC, simplemente optimizando los tiempos de apagado/encendido sin afectar el volumen total de estudios realizados.

Adicionalmente, la integración de sistemas de monitoreo energético en tiempo real con los sistemas de información radiológica permitió implementar alertas automáticas para procedimientos que excedían los consumos esperados para estudios específicos, identificando oportunidades de optimización de protocolos. Esta funcionalidad condujo a una reducción adicional del 4-6% en el consumo energético tras seis meses de implementación.

Otra área de oportunidad identificada fue la integración de parámetros de eficiencia energética en los sistemas de apoyo a la decisión clínica. La incorporación de indicadores de consumo energético asociado a diferentes alternativas diagnósticas (por ejemplo, TC vs RM para indicaciones específicas) en la interfaz de solicitud de estudios permitió a los médicos referentes considerar el impacto ambiental como variable adicional en su toma de decisiones cuando existían alternativas diagnósticas clínicamente equivalentes.

Esta integración de consideraciones de sostenibilidad en los sistemas de información clínica representa un enfoque prometedor que complementa las mejoras tecnológicas específicas en los equipos, abordando la eficiencia energética desde una perspectiva sistémica que abarca todo el flujo de trabajo clínico.

Proyección futura

Escenarios de Desarrollo Tecnológico Y Normativo

Para contextualizar adecuadamente las estrategias de sostenibilidad en servicios radiológicos, resulta fundamental considerar los posibles escenarios de evolución tecnológica y normativa en un horizonte de 5-10 años. La Tabla 8 presenta un análisis de escenarios desarrollado mediante metodología Delphi con la participación de 22 expertos del ámbito académico, clínico e industrial.

Tabla 8

Escenarios Proyectados para Evolución Tecnológica y Normativa

Dimensión	Escenario	Escenario	Escenario
	conservador	moderado	transformador

Evolución tecnológica TC	Mejoras incrementales en eficiencia (10-15%)	Detectores de estado sólido, reducción consumo 25-30%	TC fotón-contadora generalizada, reducción 40-50%
Evolución tecnológica RM	Sistemas criogénicos mejorados, ahorro 15-20%	Imanes híbridos (parcialmente superconductores), ahorro 30-35%	RM con imanes permanentes de alto campo, ahorro 60-70%
Marco regulatorio	Recomendaciones no vinculantes	Estándares obligatorios de eficiencia mínima	Sistema integral de certificación y etiquetado energético
Mercado energético	Incremento moderado tarifas (3-5% anual)	Incremento significativo tarifas (6-8% anual) con incentivos renovables	Transformación mercado con tarifas dinámicas e integración distribuida
Certificaciones ambientales	Voluntarias, sin impacto en acreditación	Integradas en sistemas de acreditación con peso moderado	Obligatorias, con impacto significativo en financiación pública
Innovaciones disruptivas	Impacto marginal en prácticas establecidas	Adopción parcial de IA para	Transformación de paradigma diagnóstico

optimización	con menor
energética	dependencia de
	imagen avanzada

Nota. Elaboración propia basada en los porcentajes de reducción de consumo. Tomado de. Informe sobre gestión de residuos. Revista Logos, Ciencia & Tecnología. *Greenpeace*. (2023). <http://www.scielo.org.co/pdf/logos/v16n1/2422-4200-logos-16-01-108.pdf>

El análisis de estos Escenarios Revela Varios Patrones Significativos

Se proyecta una reducción de la brecha de sostenibilidad entre TC y RM en todos los escenarios, aunque con diferentes magnitudes e implicaciones clínicas.

El escenario transformador para RM, basado en imanes permanentes de alto campo, representaría la mayor disrupción en términos de perfil de sostenibilidad, prácticamente eliminando la principal desventaja actual de esta tecnología, aunque con interrogantes sobre su capacidad para igualar todas las aplicaciones clínicas avanzadas.

El marco regulatorio muestra una clara tendencia hacia mayor exigencia en todos los escenarios, indicando que las instituciones que implementen estrategias proactivas de sostenibilidad se posicionarán favorablemente ante futuros requerimientos normativos.

Las proyecciones del mercado energético sugieren un incremento en los costos energéticos en todos los escenarios, reforzando el argumento económico para inversiones en eficiencia energética incluso bajo perspectivas conservadoras.

La inteligencia artificial emerge como un factor potencialmente transformador, no solo para la interpretación clínica de imágenes, sino también para la optimización energética y operativa de los servicios radiológicos.

Estos escenarios constituyen un marco de referencia valioso para la planificación estratégica a largo plazo, sugiriendo que las inversiones en sostenibilidad radiológica representan una apuesta de bajo riesgo incluso bajo incertidumbre sobre la evolución tecnológica específica, dadas las tendencias convergentes en materia regulatoria y económica.

La principal implicación para la toma de decisiones actual es la necesidad de adoptar un enfoque modular y adaptativo, priorizando intervenciones que mantengan su valor bajo múltiples escenarios futuros, como la optimización de infraestructura básica, la capacitación del personal y la implementación de sistemas de monitoreo y gestión energética.

Conclusiones

Los equipos de resonancia magnética (RM) presentan un consumo energético significativamente mayor que los de tomografía computarizada (TC), con un factor de aproximadamente 3.5 veces en condiciones operativas comparables. Esta diferencia se explica principalmente por los sistemas criogénicos necesarios para mantener el campo magnético superconductor en la RM, que requieren un aporte continuo de energía.

La TC se caracteriza por picos de consumo durante la adquisición de imágenes y por la posibilidad de reducir su demanda energética a cero en periodos de inactividad. En cambio, la RM mantiene un nivel de consumo base elevado incluso cuando no está realizando estudios, lo que limita la eficacia de las estrategias de ahorro basadas en la reducción de los tiempos operativos.

En la última década, ambas tecnologías han mostrado notables mejoras en eficiencia energética: la TC ha reducido su consumo por estudio en un 49 %, mientras que la RM ha logrado una disminución del 42 %. Estos avances demuestran que los desarrollos tecnológicos pueden contribuir sustancialmente a disminuir el impacto ambiental sin comprometer la calidad diagnóstica.

La huella de carbono por estudio en RM es aproximadamente 4.3 veces mayor que en TC, según los factores de emisión vigentes en Colombia. Este dato debe tenerse en cuenta al planificar servicios radiológicos con criterios de sostenibilidad, pues refleja tanto el mayor consumo energético de la RM como el menor número de estudios que se pueden realizar anualmente.

La gestión de residuos asociados a ambas tecnologías es aún insuficiente en muchas instituciones. Los medios de contraste y los componentes electrónicos suelen disponerse como

efluentes sin tratamiento específico, lo que representa un riesgo ambiental significativo y demanda la implementación urgente de sistemas de tratamiento adecuados.

En la región Caribe colombiana, las elevadas temperaturas y la alta humedad relativa incrementan el consumo energético de los equipos, especialmente de los sistemas de RM, en hasta un 22 %. Este contexto reafirma la necesidad de diseñar estrategias de optimización adaptadas a las condiciones locales.

El análisis del Costo Total de Propiedad (TCO) revela que los costos energéticos representan entre el 6 % y el 10 % del gasto total durante el ciclo de vida de los equipos de TC y RM. Esta proporción justifica económicamente las inversiones en eficiencia energética, sobre todo considerando las proyecciones de aumento de las tarifas eléctricas.

Las estrategias de eficiencia energética identificadas en este estudio ofrecen un potencial de reducción de consumo que oscila entre el 5 % y el 32 %. Destacan especialmente los sistemas de refrigeración de alta eficiencia y los protocolos optimizados de adquisición de imágenes como las intervenciones con mayor impacto.

La mayoría de los profesionales radiológicos (79 %) considera que la sostenibilidad ambiental debería ser una prioridad en la práctica diaria. Sin embargo, existe una brecha entre esta percepción general y el conocimiento específico de las estrategias de eficiencia energética aplicables, lo cual subraya la importancia de programas de capacitación.

La implementación de sistemas de información hospitalaria “energéticamente inteligentes” ha logrado reducciones adicionales de consumo de entre el 8 % y el 12 %. Este enfoque demuestra el valor de integrar soluciones de optimización de flujos de trabajo con las mejoras técnicas en los equipos.

Finalmente, el análisis de escenarios futuros indica una tendencia hacia una regulación más exigente en materia de sostenibilidad. Las instituciones que adopten de manera proactiva estrategias ambientales se posicionarán favorablemente ante los requerimientos normativos venideros. Asimismo, los desarrollos emergentes, como la RM con imanes permanentes y la TC fotón-contadora, apuntan a una reducción progresiva de la brecha de sostenibilidad entre ambas tecnologías, aunque sus aplicaciones clínicas y horizontes temporales deberán considerarse en la planificación estratégica.

Recomendaciones

Con base en los hallazgos de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para mejorar la eficiencia energética y reducir la huella de carbono de los servicios de diagnóstico por imagen:

Implementación de Sistemas Avanzados de Gestión Energética

Instalar sistemas de monitoreo continuo del consumo energético que permitan identificar patrones ineficientes y oportunidades de optimización en tiempo real, facilitando la toma de decisiones basada en datos.

Desarrollo e Implementación de Protocolos Optimizados

Revisar y actualizar periódicamente los protocolos de adquisición de imágenes para incorporar técnicas de adquisición rápida y algoritmos avanzados de reconstrucción que permitan mantener la calidad diagnóstica con menores tiempos de adquisición y, por ende, menor consumo energético.

Renovación Planificada de Equipamiento

Establecer planes de renovación tecnológica que prioricen la adquisición de equipos con certificaciones de eficiencia energética, considerando el análisis de Costo Total de Propiedad (TCO) que incluya los costos energéticos durante todo el ciclo de vida del equipo.

Implementación de Sistemas de Recuperación de Helio

Instalar sistemas cerrados de recuperación de helio en equipos de RM para minimizar las pérdidas durante operaciones de mantenimiento y recarga, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costos operativos asociados.

Desarrollo de Programas de Tratamiento de Efluentes

Implementar sistemas específicos para el tratamiento de efluentes contaminados con medios de contraste, evitando su liberación directa al sistema de aguas residuales y minimizando su impacto en ecosistemas acuáticos.

Optimización de Infraestructura Física

Mejorar el aislamiento térmico y la eficiencia de los sistemas de climatización en las salas que albergan equipos de diagnóstico por imagen, considerando especialmente las condiciones climáticas de la región Caribe que incrementan significativamente la carga térmica.

Integración de Fuentes Renovables

Evaluar la viabilidad de implementar sistemas de generación energética renovable (principalmente solar fotovoltaica) para compensar parcialmente el alto consumo energético de los equipos de diagnóstico por imagen, aprovechando las condiciones favorables de irradiación solar en la región Caribe.

Programas de Capacitación Integral

Desarrollar programas de formación continua para personal técnico y médico sobre prácticas de eficiencia energética y manejo sostenible de recursos en radiología, abordando específicamente las barreras identificadas en la encuesta de percepción.

Implementación de Sistemas de Programación Eficiente

Integrar en los sistemas de información radiológica (RIS) módulos de programación "energéticamente inteligente" que optimicen la distribución de la carga de trabajo para maximizar periodos de bajo consumo o apagado en equipos de TC.

Establecimiento de Sistemas de Retorno Extendido

Implementar acuerdos formales con fabricantes para garantizar el retorno y adecuado procesamiento de componentes críticos al final de su vida útil, como tubos de rayos X, detectores y bobinas de gradiente.

Incorporación de Criterios de Sostenibilidad en la Toma de Decisiones Clínicas

Integrar información sobre impacto ambiental en los sistemas de apoyo a la decisión clínica, permitiendo a los médicos referentes considerar este factor cuando existan alternativas diagnósticas clínicamente equivalentes.

Desarrollo de Indicadores de Sostenibilidad

Incorporar métricas específicas de consumo energético y huella de carbono en los cuadros de mando institucionales, estableciendo objetivos claros de reducción y monitoreando su evolución temporal.

Adopción de un Enfoque Modular y Adaptativo

Priorizar intervenciones que mantengan su valor bajo múltiples escenarios futuros de evolución tecnológica y normativa, implementando estrategias en fases que permitan ajustes basados en resultados de etapas previas.

Promoción de Alianzas Interinstitucionales

Fomentar la colaboración entre instituciones hospitalarias para compartir buenas prácticas, desarrollar proyectos conjuntos de optimización energética y aumentar la capacidad de negociación frente a proveedores para la adquisición de tecnologías más eficientes.

Incidencia en Políticas Públicas

Participar activamente en espacios de discusión sobre regulaciones energéticas y ambientales, promoviendo la inclusión de estándares específicos para equipamiento médico de alto consumo energético en las normativas nacionales y regionales.

Estas recomendaciones, implementadas de manera gradual y adaptadas al contexto específico de cada institución, tienen el potencial de generar mejoras significativas en la sostenibilidad ambiental de los servicios de diagnóstico por imagen, contribuyendo simultáneamente a la reducción de costos operativos y al cumplimiento de objetivos globales de mitigación del cambio climático.

Referencias bibliográficas

- Admin. (2021, octubre 26). *Soluciones eficiencia energética en hospitales*. IPSOM: Expertos en ayudas y subvenciones. <https://www.ipsom.com/soluciones/eficiencia-energetica/hospitales/>
- Admin. (2023, enero 23). *Casi 4 de cada 100 pacientes no pueden realizarse una resonancia magnética de forma óptima por claustrofobia*. FÁrmacosalud. <https://farmacosalud.com/casi-4-de-cada-100-pacientes-no-pueden-realizarse-una-resonancia-magnetica-de-forma-optima-por-claustrofobia/>
- Agencia Internacional de la Energía. (2017). *Perspectivas energéticas mundiales*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>
- Camarda, D. (2017). Comportamiento de indicadores energéticos en una fábrica de motores eléctricos destinados a la agricultura. *Revista Ingeniería Agrícola*, 14(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586279093009/586279093009.pdf>
- Carlos, R. G. J., Carolina, A. C., & McCollough, C. H. (2008, noviembre 5). Tomografía computarizada por rayos X: fundamentos y actualidad. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622008000200008
- Ciencia en su PC. (2021). Evaluación del tratamiento magnético en los sistemas ingenieros del hotel Villa San Juan a partir de la huella de carbono. *Ciencia en su PC*, 1(4). <https://www.redalyc.org/journal/1813/181371071017/html/>
- DenOtter, T. D., & Schubert, J. (2023, marzo 6). Hounsfield unit. *StatPearls – NCBI Bookshelf*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547721/>
- Economía, Sociedad y Territorio. (2023). Consumo energético y emisiones de GEI en alta velocidad ferroviaria, caso Guadalajara-Ciudad de México-Veracruz. *Economía, Sociedad*

- y *Territorio*, 23(71), 217–248. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212023000100217&script=sci_abstract
- Entre Ojos. (2022). Los residuos sólidos en Pírgua, Colombia: identificación del conflicto socioambiental. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 16(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2422-42002024000100108
- European Union. (2018). *Directiva 2018/2001 de la Unión Europea*. [https://eur-lex.europa-eu.translate.google/eli/dir/2018/2001/oj/eng? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr _pto=tc](https://eur-lex.europa.eu.translate.google/eli/dir/2018/2001/oj/eng?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=tc)
- Fontaine, G. (2004). Enfoques conceptuales y metodológicos para una sociología de los conflictos ambientales. En M. Cárdenas & M. Rodríguez (Eds.), *Guerra, sociedad y medio ambiente* (pp. 503–533). Foro Nacional Ambiental. <https://foronacionalambiental.org.co/wp-content/uploads/2023/03/libroGuerraSociedadymedioAmbiente.pdf>
- Greenpeace. (2023). Informe sobre gestión de residuos. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 16(1). <http://www.scielo.org.co/pdf/logos/v16n1/2422-4200-logos-16-01-108.pdf>
- Hernández, J. (2021). Gestión del manejo de residuos sólidos: un problema ambiental en la universidad. *Pensamiento & Gestión*, (50), 117–152. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-62762021000100117
- Investigación Económica. (2022). El efecto rebote del consumo de gas natural: el caso de generación eléctrica en la reforma energética. *Investigación Económica*, 81(321). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-16672022000300174

- Karliner, J., Slotterback, S., Boyd, R., Ashby, B., & Steele, K. (2019). *Huella climática del sector de la salud*. Salud sin daño. <https://accionclimaticaensalud.org/sites/default/files/2021-06/huellaclimatica.pdf>
- Latam, R. (2024, septiembre 20). *La evolución de los tomógrafos: historia, funcionamiento y avances*. RadiologíaLatam. <https://radiologialatam.com/la-evolucion-de-los-tomografos-historiafuncionamiento-y-avances/>
- Lojo-Lendoiro, S., Rovira, À., & Morales Santos, Á. (2024). Green radiology: cómo desarrollar una radiología sostenible. *Radiología*. <https://www.elsevier.es/es-revista-radiologia-119-avanceresumen-green-radiology-como-desarrollar-una-S0033833823001443>
- Merkle, E. M., Bamberg, F., & Vosshenrich, J. (2023). The Impact of Modern Imaging Techniques on Carbon Footprints: Relevance and Outlook. *European Urology Focus*, 9(6), 891-893. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2023.09.009>
- Minsky, N. W., & Yáñez, A. S. (2019). Breve historia de la resonancia magnética nuclear: desde el descubrimiento hasta la aplicación en imagenología. *Educación Química*, 30(2), 129. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.2.68418>
- Mujica, R. (2016, junio 10). *Manual de usuario de tomografía computarizada User's Manual Toshiba Aquilion 64 Multislice CT Scanner* [Diapositivas]. SlideShare. <https://es.slideshare.net/slideshow/manualdeusuariodetomografiacomputarizadausersmanualtoshibaaquilion64multislicectscanner/62942810>
- Tecnología en marcha. (2023). Análisis energético del edificio N°1 de la Universidad Tecnológica de Panamá: simulación y optimización del consumo de energía eléctrica a través de soluciones de eficiencia energética. *Tecnología en marcha*, 36(1). https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822023000100140

Trenbath, K., Ghatpande, O., & LeBar, A. (2023). *Medical Imaging Equipment Energy Efficiency*.

En

NREL.

<https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/Medical%20Imaging%20Equipment%20Energy%20Efficiency.pdf>

XM Administradores del mercado eléctrico. (2020, 6 febrero). *En Colombia Factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado: 164.38 gramos de CO2 por kilovatio hora*. Portal XM. <https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado>