

Artículo:

Gestión de activos físicos para reducir riesgos en calderas hospitalarias: evaluación de condición mecánica y riesgos operacionales

Physical asset management to reduce risks in hospital boilers: evaluation of mechanical condition and operational risks

Mario-Alberto Alva-Mahe¹, Yodaira Borroto-Pentón¹, Aramis Alfonso-Llanes², David Reyes-González¹, Luis-Enrique García-Santamaría¹

Revista Interdisciplinaria de
Ingeniería Sustentable y Desarrollo
Social (RIISDS)

¹ Tecnológico Nacional de México – ITS de Misantla, Veracruz, México.

² Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

* Autor correspondiente: yborrotop@itsm.edu.mx

Recibido: 10 de octubre de 2024
Aceptado: 21 de noviembre de 2024
Publicado: 20 de diciembre de 2024

Publicación anual editada por el
Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.
Teléfono: 789 8931680, Ext.196.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://itsta.edu.mx/revistadigital>

ISSN 2448-8003

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Copyright: Este artículo es de acceso
abierto distribuido bajo los términos y
condiciones de la licencia Creative
Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Resumen: Este estudio presenta una metodología para reducir riesgos en calderas de hospitales públicos mediante la gestión de activos físicos, enfocada en mejorar la confiabilidad operativa y reducir fallos. La investigación utiliza un enfoque integral de evaluación de riesgos y mantenimiento, incorporando el análisis comparativo de estudios previos y subrayando la innovación en el uso combinado del Análisis Modal de Efectos y Fallos con pruebas no destructivas. La metodología se organiza en tres fases: preparación, aplicación y conclusión. En la fase de preparación, se conforma el grupo de trabajo y se caracteriza la caldera. En la fase de aplicación, se realiza un Análisis Modal de Efectos y Fallos, se calcula el número de prioridad de riesgo y se aplican pruebas no destructivas para evaluar el estado mecánico. La fase de conclusión define acciones de mantenimiento mejoradas y calcula un número de prioridad de riesgo ajustado para reducir el riesgo. Los resultados destacan que este enfoque metodológico permite optimizar el mantenimiento preventivo y mejorar la seguridad hospitalaria, contribuyendo a la sostenibilidad y confiabilidad de los sistemas de apoyo en instituciones de salud. Este método permite una toma de decisiones informada basada en el riesgo que asegura un enfoque preventivo y minimiza las interrupciones en el funcionamiento de las calderas. Se proyecta que futuros estudios podrán incluir tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas para el monitoreo en tiempo real de estos activos críticos.

Palabras clave: Gestión de activos físicos, mantenimiento basado en riesgos, calderas hospitalarias, integridad mecánica, análisis de fallos.

Resumen

Este estudio presenta una metodología para reducir riesgos en calderas de hospitales públicos mediante la gestión de activos físicos, enfocada en mejorar la confiabilidad operativa y reducir fallos. La investigación utiliza un enfoque integral de evaluación de riesgos y mantenimiento, incorporando el análisis comparativo de estudios previos y subrayando la innovación en el uso combinado del Análisis Modal de Efectos y Fallos con pruebas no destructivas. La metodología se organiza en tres fases: preparación, aplicación y conclusión. En la fase de preparación, se conforma el grupo de trabajo y se caracteriza la caldera. En la fase de aplicación, se realiza un Análisis Modal de Efectos y Fallos, se calcula el número de prioridad de riesgo y se aplican pruebas no destructivas para evaluar el estado mecánico. La fase de conclusión define acciones de mantenimiento mejoradas y calcula un número de prioridad de riesgo ajustado para reducir el riesgo. Los resultados destacan que este enfoque metodológico permite optimizar el mantenimiento preventivo y mejorar la seguridad hospitalaria, contribuyendo a la sostenibilidad y confiabilidad de los sistemas de apoyo en instituciones de salud. Este método permite una toma de decisiones informada basada en el riesgo que asegura un enfoque preventivo y minimiza las interrupciones en el funcionamiento de las calderas. Se proyecta que futuros estudios podrán incluir tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas para el monitoreo en tiempo real de estos activos críticos.

Palabras clave: Gestión de activos físicos, mantenimiento basado en riesgos, calderas hospitalarias, integridad mecánica, análisis de fallos.

Abstract

This study presents a methodology for reducing risks in public hospital boilers through physical asset management, focused on enhancing operational reliability and reducing failures. The research adopts a comprehensive approach to risk assessment and maintenance, incorporating a comparative analysis of previous studies and highlighting the innovation in the combined use of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) with non-destructive testing. The methodology is organized into three phases: preparation, application, and conclusion. In the preparation phase, a workgroup is formed, and the boiler is characterized. During the application phase, a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is conducted,

the Risk Priority Number is calculated, and non-destructive tests are applied to assess the mechanical condition. The conclusion phase defines improved maintenance actions and calculates an adjusted RPN to reduce risk. The results indicate that this methodological approach optimizes preventive maintenance and enhances hospital safety, contributing to the sustainability and reliability of support systems in healthcare institutions. This method enables informed, risk-based decision-making, ensuring a preventive approach and minimizing interruptions in boiler operation. Future studies are projected to include emerging technologies such as the Internet of Things for real-time monitoring of these critical assets.

Keywords: Physical asset management, risk-based maintenance, hospital boilers, mechanical integrity, failure analysis.

1. Introducción

La gestión de activos físicos permite administrar los activos tangibles de una organización, tales como equipos, infraestructura y propiedades, a lo largo de su ciclo de vida, desde su adquisición y operación hasta su disposición final (Depool-Malave, 2015; Sola Rosique & Crespo Márquez, 2017; Enríquez & Chinga, 2019). En entornos hospitalarios, donde la higiene y funcionalidad de los equipos son esenciales, este enfoque resulta útil para maximizar el valor de los activos, minimizar los riesgos operacionales, y asegurar la eficiencia de los sistemas de apoyo a los objetivos estratégicos (Amendola, 2021; Kabeta et al., 2023). Los hospitales públicos constituyen un sistema compuesto por subsistemas de hospitalización, consultas externas, tratamientos ambulatorios, diagnósticos, usos administrativos, entre otros. Además de ser los responsables de brindar servicios de salud, tanto preventivos como curativos, dependen de una infraestructura robusta para soportar procesos críticos de sanitización, calefacción y otros servicios de apoyo (Gómez Delgado, 2021).

Los activos fijos hospitalarios deben garantizar tanto la seguridad de los usuarios como de los profesionales que participan en el proceso. Facilitar el confort de los pacientes durante su estancia hospitalaria es vital. El concepto de experiencia paciente en la gestión de las organizaciones sanitarias ha evolucionado a partir de la calidad asistencial y de servicio del modelo asistencial centrado en el paciente (Gómez Delgado, 2021); sin duda, la gestión de los activos fijos juega un papel importante en dicha experiencia. Entre estos activos, las

calderas representan un elemento central ya que proporcionan el calor y vapor necesarios para procesos como el lavado de ropa, la cocina, la calefacción, el suministro de agua caliente, y la generación de energía térmica, impactando directamente en la salubridad y hospitalidad de los centros de salud (Ardila Marín et al., 2016; Kabeta et al., 2023). Sin embargo, la operación inadecuada de estos sistemas puede comprometer la seguridad de pacientes y personal, además de afectar la calidad de los servicios (Niazi, 2020).

Dado que las calderas operan a presiones y temperaturas elevadas, representan un riesgo significativo y requieren de un plan de mantenimiento riguroso basado en la gestión de riesgos (Hernández Rodríguez et al., 2021). Aunque en muchos hospitales se sigue implementando el mantenimiento correctivo, las investigaciones sugieren que la adopción de metodologías como el Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) combinado con pruebas no destructivas (PND), puede reducir significativamente los riesgos asociados a la operación de estos activos (Xiao et al., 2011; Dwivedi et al., 2018; Soares et al., 2021).

En estudios previos, la metodología AMEF ha demostrado ser eficaz para la identificación de modos de fallo en equipos de alta criticidad en industrias como la manufactura y la energía, donde su uso ha permitido una reducción de incidentes en sistemas de presión y calderas (Lo et al, 2020; Quin et al, 2020). Sin embargo, estas metodologías suelen implementarse de forma independiente y rara vez incluyen pruebas no destructivas como complemento, lo cual limita la capacidad de detectar fallas de manera anticipada y precisa en los contextos hospitalarios por lo que es necesario considerar aspectos de seguridad multidimensional (Figuroa-Urbe et al, 2021). En comparación, la presente investigación propone una integración sistemática de AMEF con PND, permitiendo no solo identificar modos de fallo potenciales sino también diagnosticar el estado actual de los componentes críticos de manera no invasiva y con una mayor precisión.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar y validar una metodología que no solo permita identificar modos de fallo en calderas hospitalarias, sino que proporcione un diagnóstico exhaustivo de la condición mecánica de estos activos. Al aplicar herramientas avanzadas de diagnóstico y criterios de riesgo para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR), la metodología busca establecer medidas preventivas que minimicen las probabilidades de fallo y fortalezcan la seguridad hospitalaria. La investigación también contribuye a la gestión de activos en el sector salud, al proponer un enfoque estructurado que

optimiza la confiabilidad de estos activos y establece bases para la adopción de sistemas de monitoreo y mantenimiento predictivo. Futuros estudios podrían explorar la automatización del proceso de inspección mediante tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y análisis en tiempo real, que permitan un monitoreo más preciso y continuo de los activos críticos.

En este contexto, la investigación ofrece una metodología estructurada en fases para la evaluación y reducción de riesgos en calderas hospitalarias, destacando su aplicabilidad en hospitales con recursos limitados y su contribución al desarrollo de un modelo robusto de gestión de activos en el sector salud.

2. Materiales y métodos

La metodología propuesta se centra en el diagnóstico y evaluación integral de las calderas en instituciones hospitalarias públicas y consta de tres fases principales, divididas en ocho etapas, diseñadas para abordar de manera estructurada los riesgos operativos y la condición mecánica de estos equipos críticos (Tabla 1). La **Fase 1: Preparación** establece las bases para la implementación de la metodología, definiendo los recursos humanos y técnicos necesarios, además de analizar el contexto operativo del hospital y documentar la condición inicial de la caldera. La **Fase 2: Aplicación** se enfoca en emplear herramientas técnicas para diagnosticar los riesgos asociados y evaluar la condición mecánica del equipo mediante análisis detallados y pruebas específicas. La **Fase 3: Conclusión** implementa medidas correctivas basadas en los resultados obtenidos y evalúa su efectividad, asegurando la reducción de riesgos y el mejoramiento continuo del sistema.

Tabla 1. Metodología estructurada para la reducción de riesgos en calderas hospitalarias

Fase	Etapas	Descripción	Herramientas/Fórmulas	Citas
Fase 1: Preparación	1. Conformación del grupo de trabajo	Selección de un equipo interdisciplinario con experiencia en mantenimiento, integridad mecánica y operación de calderas.	Matriz de competencias para selección del equipo (roles técnicos y administrativos).	Depool-Malave (2015); González Pérez (2018)
	2. Caracterización de la institución	Análisis de la capacidad operativa, servicios médicos, equipamiento y necesidades específicas del hospital.	Cuestionario de evaluación operativa. Diagrama SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) para mapear procesos relacionados con las calderas.	Ardila Marín et al. (2016)

Tabla 1. Continua

Fase	Etap	Descripción	Herramientas/Fórmulas	Citas
	3. Caracterización de la caldera	Registro de características técnicas (capacidad, diseño, historial de mantenimiento y datos operativos) para identificar componentes críticos.	Ficha técnica del equipo.	Niazi (2020); Hernández Rodríguez et al. (2021)
			Historial de mantenimiento.	
			Identificación de componentes clave según estándares ASME para calderas industriales.	
Fase 2: Aplicación	4. Análisis de riesgo mediante AMEF y NPR inicial	Identificación de modos de fallo, causas y efectos mediante AMEF; cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) considerando severidad, ocurrencia y no detección.	Tabla AMEF: Función, modo de fallo, efectos, severidad, ocurrencia y no detección.	Xiao et al. (2011); Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017)
			Fórmula del NPR: NPR=Severidad×Ocurrencia×No detección	
			Diagramas de Ishikawa y Pareto para priorización.	
	5. Aplicación de pruebas no destructivas (PND)	Evaluación de la condición mecánica mediante técnicas como inspección visual, ultrasonido, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y réplicas metalográficas.	Inspección visual y medición de espesores por ultrasonido.	Dwivedi et al. (2018); Soares et al. (2021)
			Líquidos penetrantes para detectar fisuras.	
			Partículas magnéticas para identificar discontinuidades en materiales.	
	6. Análisis estadístico de los componentes	Procesamiento de datos de pruebas no destructivas usando software (UltraPIPE) para estimar la vida útil restante y zonas críticas de la caldera.	Fórmulas para estimar velocidad de corrosión a largo y corto plazo: $V = \frac{F_{\text{ér}}}{T} \frac{a_{\text{li}}}{a_{\text{ci}}} \frac{p}{p} = \frac{F_{\text{e}}}{\text{Últ}} \frac{f}{f} \frac{ha-P}{ha-P} \frac{p}{p}$ $V = \frac{P_{\text{ér}}}{T} \frac{a_{\text{ci}}}{a_{\text{ci}}} \frac{p}{p} = \frac{E}{\text{Últ}} \frac{a}{f} \frac{ha-F}{ha-F} \frac{p}{ha a}$	Depool-Malave (2015); Shahin et al. (2018)
			Análisis de tendencia con regresión lineal en UltraPIPE.	
Fase 3: Conclusión	7. Determinación de acciones de mejora	Definición de medidas de mantenimiento, frecuencia de aplicación, responsables y procedimientos específicos para cada componente crítico.	Algoritmo de toma de decisiones basado en criticidad y costo-beneficio. Diagrama de flujo para implementación de las acciones correctivas.	González Sosa et al. (2018)
	8. Cálculo del NPR mejorado	Recálculo del NPR después de implementar	Fórmula del NPR mejorado: NPR=Severidad×Ocurrencia×No	Xiao et al. (2011);

		las mejoras; evaluación de efectividad y aceptación de niveles de riesgo alcanzados.	detección considerando medidas implementadas. Comparación entre NPR inicial y mejorado.	Alfonso Llanes et al. (2022)
--	--	--	--	------------------------------

Fuente: Elaboración propia

La aplicación de esta metodología permite un análisis detallado de los riesgos operativos, la condición mecánica y la vida útil de los componentes críticos en calderas hospitalarias (Anexo A). Además, fomenta la toma de decisiones informada y facilita la implementación de acciones preventivas para garantizar la confiabilidad del sistema.

3. Resultados y discusión

3.1 Guía Metodológica para la reducción de riesgos en calderas hospitalarias a través de la gestión de activos físicos

La siguiente guía metodológica ofrece un enfoque detallado y estructurado para reducir los riesgos operacionales y mejorar la seguridad en calderas hospitalarias mediante la gestión de activos físicos. La metodología integra el Análisis Modal de Efectos y Fallos junto con pruebas no destructivas para la evaluación de la integridad mecánica. Esta combinación permite identificar modos de fallo críticos, calcular el Número de Prioridad de Riesgo y priorizar las acciones de mantenimiento preventivo en función de la criticidad de cada componente. El objetivo es optimizar la confiabilidad de los activos hospitalarios críticos, promoviendo una gestión basada en el riesgo que asegure la continuidad del servicio y minimice riesgos para los usuarios y el personal hospitalario.

3.1.1 Fase 1: Preparación

La fase de preparación establece las bases de la metodología y comprende la conformación del equipo de trabajo, la caracterización de la institución y de la caldera.

Etapas: Conformación del grupo de trabajo

Selección de un equipo interdisciplinario con experiencia en mantenimiento, integridad mecánica y operación de calderas hospitalarias. La Tabla 2 muestra los elementos clave para

conformar este equipo, asegurando que se asignen roles específicos (técnicos y administrativos) basados en la competencia y experiencia de cada miembro.

Tabla 2. Matriz de Competencias para el Equipo de Trabajo

Fase	Etapas	Descripción	Herramienta
Fase 1: Preparación	1. Conformación del grupo de trabajo	Selección de un equipo interdisciplinario con experiencia en mantenimiento, integridad mecánica y operación de calderas.	Matriz de competencias para selección del equipo (roles técnicos y administrativos).

Fuente: Tomado de Depool-Malave (2015); González Pérez (2018)

Etapas 2: Caracterización de la Institución

Consiste en recopilar información sobre la infraestructura hospitalaria, evaluando la capacidad operativa y los recursos disponibles (Tabla 3). Para ello, se recomienda utilizar un cuestionario de evaluación operativa que cubra aspectos clave como ubicación, nivel de atención médica, y especialización del personal.

Tabla 3. Diagrama SIPOC para Mapear Procesos Relacionados con las Calderas

Etapas	Descripción	Herramientas/Fórmulas
2. Caracterización de la institución	Análisis de la capacidad operativa, servicios médicos, equipamiento y necesidades específicas del hospital.	Cuestionario de evaluación operativa; Diagrama SIPOC para mapear procesos relacionados con las calderas.

Fuente: Tomado de Ardila Marín et al. (2016)

Etapas 3: Caracterización de la caldera

Esta etapa incluye la documentación de las especificaciones técnicas de la caldera, su diseño y su historial de mantenimiento, lo cual permitirá identificar componentes críticos que requieran mayor atención (Tabla 4).

Tabla 4. Herramientas para la caracterización de la caldera

Etapas	Descripción	Herramientas/Fórmulas
3. Caracterización de la caldera	Registro de características técnicas (capacidad, diseño, historial de mantenimiento y datos operativos) para identificar componentes críticos.	Ficha técnica del equipo, historial de mantenimiento, identificación de componentes clave según estándares ASME.

Fuente: Tomado de Niazi (2020); Hernández Rodríguez et al. (2021)

3.1.2 Fase 2: Aplicación

Esta fase se centra en la evaluación de los riesgos operativos y la condición mecánica del equipo a través de análisis de riesgos y pruebas específicas.

Etapa 4: Análisis de Riesgo

Paso 4.1: Establecer los Modos, Efectos y Fallos

En esta etapa se realiza un análisis AMEF para identificar los modos de fallo, causas y efectos de cada componente crítico, seguido del cálculo del NPR basado en los factores de severidad, ocurrencia y detectabilidad de cada fallo. La Tabla 5 incluye preguntas guía para orientar el análisis de los modos de fallo.

Tabla 5. Preguntas guía para identificación de modos, efectos y fallos

Pregunta	Descripción
¿Cómo se produjeron los fallos anteriores?	Examina fallos históricos en los componentes de la caldera y sus causas para identificar patrones.
¿En qué forma podría fallar cada componente?	Determina los posibles modos de fallo considerando factores de diseño y operativos de cada componente.
¿Cómo podría dejar de cumplir sus funciones?	Analiza las situaciones en las que el componente no logra su rendimiento esperado.
¿Cuáles son los modos de fallo potenciales?	Enumera todas las maneras posibles en que el componente podría fallar.
¿Qué pasa si este elemento falla?	Evalúa las repercusiones inmediatas de una falla en el sistema hospitalario y en los usuarios.
¿Cuáles son las consecuencias del fallo?	Considera tanto los efectos inmediatos como las repercusiones a largo plazo del fallo en el componente.
¿Qué tanto afecta a mi proceso este fallo?	Determina el nivel de criticidad del fallo en términos de impacto en seguridad, confiabilidad y disponibilidad del sistema de caldera.

Fuente: Construido a partir de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017)

Herramientas de Apoyo para el Análisis de Fallos

Para facilitar la identificación de causas raíz y priorización de riesgos, se recomienda utilizar herramientas de diagnóstico como el Diagrama de Ishikawa, el Diagrama de Pareto y el Método de los 5 Por Qué (Tabla 6).

Tabla 6. Herramientas de apoyo para análisis de fallos

Herramienta	Descripción	Objetivo Principal
Diagrama de Ishikawa	Visualiza y clasifica posibles causas de fallos en categorías (e.g., personal, método, materiales, etc.).	Identificar causas raíz de fallos complejos.
Diagrama de Pareto	Prioriza problemas, permitiendo concentrarse en los fallos de mayor impacto.	Identificar y enfocar en fallos críticos.
Método de los 5 Por Qué	Serie de preguntas que profundiza en la raíz de cada fallo identificado.	Determinar causas subyacentes de los fallos.

Fuente: Construido a partir de Xiao et al. (2011)

Caracterización y cuantificación de los efectos de los Fallos

A partir del análisis, el equipo puede caracterizar cada modo de fallo y sus efectos específicos, se utilizará el Número de Prioridad de Riesgo de cada fallo, calculado en función de la severidad (S), ocurrencia (O) y detectabilidad (D). Este proceso facilita la identificación de los fallos más críticos y orienta la toma de decisiones sobre mantenimiento.

Desarrollo de la hoja de trabajo AMEF

Se recomienda establecer una hoja de trabajo AMEF (Tabla 7) para documentar los fallos funcionales, modos de fallo, efectos, y evaluación de riesgos de cada componente. En esta hoja, se detalla la función, tipo de fallo, efectos, y valores asignados de severidad, ocurrencia y no detección, calculando el Número de Prioridad de Riesgo multiplicando estos valores. El resultado de este cálculo permite priorizar los fallos críticos para acciones correctivas o preventivas.

Tabla 7. Hoja de trabajo AMEF para evaluación de modos, efectos y fallos

Realizado por: _____					Fecha: _____			
Revisado por: _____								
Componente	Función	Fallo Funcional	Modo de Fallo	Efectos del Fallo	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	No Detección (D)	NPR
Elemento #	Descripción de la función	Tipo de fallo que afecta función	Especificar la manera en que falla	Impactos operativos y de seguridad	Valor asignado	Valor asignado	Valor asignado	SOD
Elemento #	Descripción de la función	Tipo de fallo que afecta función	Especificar la manera en que falla	Impactos operativos y de seguridad	Valor asignado	Valor asignado	Valor asignado	SOD
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fuente: Construido a partir de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017)

La hoja de trabajo AMEF estructura y documenta el análisis de cada componente, facilitando la identificación y priorización de riesgos en función del NPR. Esta información sirve como base para diseñar acciones de mejora específicas en fases posteriores de la metodología, enfocadas en reducir la frecuencia, severidad y consecuencias de los modos de fallo detectados. Para cuantificar los efectos posibles, se utilizará el NPR asignado a cada fallo Alfonso Llanes et al., 2022; Rodriguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011 cuya determinación se detallará en el paso 2 de esta etapa.

Paso 4.2: Determinación de criterios y ponderaciones en severidad, ocurrencia y no detección

Este paso de la metodología se centra en establecer criterios y ponderaciones específicos para evaluar los modos de fallo en función de su severidad, probabilidad de ocurrencia y capacidad de detección, facilitando la priorización de riesgos en la caldera hospitalaria.

La **severidad** se refiere al impacto potencial de un fallo en la seguridad de las personas, la integridad de las instalaciones, el medio ambiente y la continuidad operativa. Este criterio mide la magnitud de los efectos de un fallo, especialmente en casos que pueden resultar en lesiones, pérdidas humanas o daños significativos. Para una evaluación precisa, se utiliza una escala del 1 al 7, donde 1 representa un impacto mínimo y 7 un impacto extremadamente crítico. La **ponderación de la Severidad** asigna valores conforme a la Tabla 8, que varía desde "Bajo" (valor 1), que representa incidencias menores, hasta "Peligroso" (valor 7), que indica fallos con peligro inminente para la vida y el ambiente (Alfonso Llanes et al., 2022; Rodríguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011)

Tabla 8. Criterios de severidad del fallo

Criterio	Contenido	Ponderación
Bajo	Incidencias menores que no afectan el funcionamiento de la caldera	1
Moderado	Fallos que generan una ligera reducción en la eficiencia de la caldera	2
Medio	Fallos que requieren atención y pueden afectar el rendimiento y la seguridad de la caldera	3
Alto	Fallos que representan un riesgo moderado y requieren intervención inmediata	4
Muy alto	Fallos que presentan un riesgo significativo para la integridad de la caldera y la seguridad personal	5
Grave	Fallos que amenazan la integridad estructural de la caldera y pueden causar daños importantes	6
Peligroso	Fallos extremadamente críticos que representan un peligro inminente para la vida y el medio ambiente	7

Fuente: Elaborado a partir de Alfonso Llanes et al., 2022; Rodríguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011

Así mismo se considera la ocurrencia, entendida como la probabilidad de que un fallo específico ocurra durante la vida útil del equipo. Este criterio se utiliza para entender la frecuencia con la cual un modo de fallo es probable. La ponderación de la ocurrencia se clasifica en una escala de 1 a 5, donde 1 indica una ocurrencia extremadamente baja y 5 representa una alta frecuencia. En particular esta escala corresponde a la ponderación de la Ocurrencia, donde los valores se determinan de acuerdo con los registros de fallos previos y

las observaciones del personal operativo (Tabla 7) (Alfonso Llanes et al., 2022; Rodríguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011).

Tabla 7. Criterios de ocurrencia del fallo

Criterio	Contenido	Ponderación
Remota	El fallo ocurre 1 vez cada 5 años o más	1
Baja	El fallo ocurre 1 vez cada 2 a 4 años	2
Moderada	El fallo ocurre aproximadamente una vez al año	3
Alta	El fallo ocurre al menos una vez cada 6 meses	4
Muy Alta	El fallo ocurre al menos una vez al mes	5

Fuente: Elaborado a partir de (Alfonso Llanes et al., 2022; Rodríguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011)

Por su parte, **la no detección**, indica la probabilidad de que un fallo ocurra sin ser detectado por los sistemas de control actuales. Este criterio sirve para evaluar la eficiencia de los sistemas de monitoreo y detección de fallos. La ponderación se mide en una escala de 1 a 7, donde 1 representa alta detectabilidad y 7 una detección muy baja o imposible. Particularmente, los valores asignados, presentados en la Tabla 9, reflejan la capacidad de los sistemas actuales para identificar fallos y responden a la necesidad de mejorar el monitoreo en caso de que los valores sean elevados (Alfonso Llanes et al., 2022; Rodríguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011)

Tabla 9. Criterios de no detección del fallo

Criterio	Contenido	Ponderación
Muy Baja	El fallo es obvio, fácilmente detectable a simple vista o remotamente	1
Baja	El fallo es detectable, aunque podría ocasionalmente no ser observado	2
Moderada	El fallo se detecta en mantenimientos rutinarios	3
Moderadamente Alta	El fallo es detectable únicamente mediante sensores y/o alarmas	4
Alta	El fallo solo es detectable cuando afecta otros equipos o la producción	5
Muy Alta	El fallo solo es detectable durante paros de mantenimiento mayor	6
Seguro	El fallo no puede detectarse con los sistemas actuales	7

Fuente: Elaborado a partir de Alfonso Llanes et al., 2022; Rodríguez Toledo, 2021; Xiao et al., 2011

Paso 4.3: Cálculo del número de prioridad de riesgo

El cálculo del Número de Prioridad de Riesgo permite evaluar y priorizar los modos de fallo en los componentes críticos de la caldera hospitalaria. Este cálculo, descrito en la Tabla 10, se realiza multiplicando las ponderaciones de severidad, ocurrencia y no detección de cada fallo: $NPR = S \times O \times D$. Luego, se interpretan los resultados, priorizando los fallos con

NPR alto para intervenciones rápidas. Posteriormente, tras el Análisis Modal de Efectos y Fallos, se enfocan los esfuerzos según la criticidad, y finalmente, se recalcula el NPR tras aplicar mejoras, evaluando la reducción del riesgo y optimizando así el mantenimiento y la seguridad del sistema.

Tabla 10. Procedimiento para el cálculo del NPR

Paso	Descripción
1. Multiplicación de Ponderaciones	Cada modo de fallo identificado en la caldera recibe una puntuación en los criterios de severidad, ocurrencia y no detección. Estas puntuaciones se multiplican para obtener el NPR. Valores altos indican riesgos más críticos.
2. Interpretación de los Resultados	Prioridad Alta (NPR elevado): Modos de fallo con NPR elevado requieren atención prioritaria debido a su alto riesgo para la operación segura de la caldera. Jerarquización de Riesgos: El NPR facilita clasificar los componentes según su criticidad, permitiendo identificar los que necesitan intervención inmediata o a corto plazo.
3. Implementación Posterior al AMEF	El cálculo del NPR debe realizarse después del Análisis Modal de Efectos y Fallos, ya que este análisis identifica y describe los modos de fallo. Posteriormente, el NPR permite priorizar estos fallos según su impacto y urgencia.
4. Determinación del NPR Mejorado	Tras calcular el NPR inicial y aplicar las estrategias de mejora, se realiza un nuevo cálculo para obtener el NPR mejorado. Este valor actualizado refleja la reducción del riesgo y permite evaluar la efectividad de las acciones de mantenimiento implementadas.

Jerarquización de componentes

Con los valores de NPR inicial obtenidos se puede realizar una jerarquización de los componentes de la caldera. Este proceso consiste en clasificar los elementos según su NPR, identificando los que presentan un riesgo elevado y requieren atención prioritaria. Este paso permite optimizar los recursos de mantenimiento, enfocándolos en aquellos componentes que representan los mayores riesgos. En la Figura 1, se muestra el proceso para el cálculo del NPR, que incluye la identificación de los modos de fallo, la asignación de ponderaciones en severidad, ocurrencia y no detección, y la determinación final del NPR de cada componente.

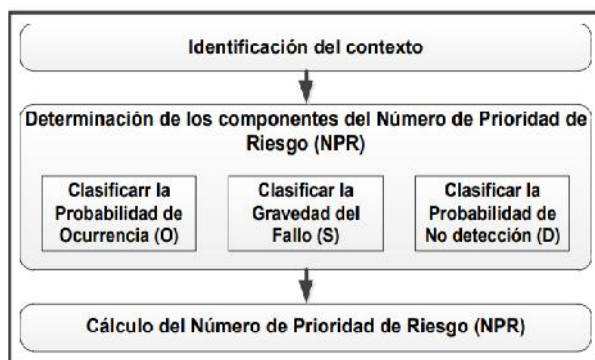


Figura 1. Determinación del NPR

Fuente: Recuperada de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017)

Al final de este paso, se obtiene el nivel de riesgo inicial para cada modo de fallo identificado en los componentes de la caldera. Este nivel de riesgo inicial es fundamental para definir las estrategias de mejora y establecer prioridades en el plan de mantenimiento, garantizando así la seguridad y confiabilidad de los sistemas hospitalarios.

Paso 4.4: Ponderación de niveles de riesgo actuales

En este paso, el equipo pondera los niveles de riesgo de cada fallo según su impacto en el desempeño operacional del sistema hospitalario (González Pérez, 2018; Goya Rodríguez & Alfonso Llanes, 2017; Rodriguez Toledo, 2021; Valle García & Alfonso Llanes, 2017). Mediante un análisis grupal, se consideran las características del sistema y los parámetros de operación de la caldera, adaptando las decisiones al contexto específico. Cada riesgo se clasifica en un rango de colores según su criticidad, facilitando la priorización. La Tabla 11 resume los niveles de riesgo, enfocando los recursos en áreas de mayor impacto para una gestión eficiente de activos y reducción de riesgos en entornos hospitalarios.

Tabla 11. Clasificación de Niveles de Riesgo

Nivel de Riesgo	Color	Descripción	Acción Requerida
H: Muy alto Riesgo o inadmisible	Rojo	Fallos con consecuencias inaceptables, alta severidad o probabilidad de ocurrencia.	Intervención inmediata para eliminar o reducir la frecuencia del fallo.
S: Alto riesgo o inaceptable	Naranja	Fallos con un riesgo elevado pero tolerable solo si no es viable la mitigación o si el costo es alto.	Monitoreo continuo y planificación de mitigación a mediano plazo.
M: Riesgo tolerable	Amarillo	Fallos con riesgo moderado, donde la relación riesgo-costos es óptima.	Mantenimiento rutinario, no requiere intervención inmediata.
L: Riesgo aceptable	Verde	Fallos de bajo riesgo que son generalmente tolerables y no afectan significativamente la operación.	Tolerancia al fallo; manejo en mantenimientos de bajo nivel o programados.

Fuente: Adaptado de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017)

Etapas 5: Aplicación de Pruebas No Destructivas

Las pruebas no destructivas son fundamentales para evaluar el estado actual de los componentes de la caldera sin comprometer su integridad estructural. La Tabla 12 muestra las pruebas recomendadas, especificando el propósito de cada prueba para identificar posibles fallos.

Tabla 12. Propósito de las pruebas no destructivas

Prueba No Destructiva	Descripción	Propósito
Inspección Visual	Examen superficial del equipo para detectar daños visibles como corrosión o desgaste.	Identificar defectos evidentes o corrosión superficial.
Medición de Espesores (Ultrasonido)	Técnica que mide el grosor de los componentes sin dañarlos, aplicable en áreas propensas a corrosión.	Detectar pérdida de espesor por corrosión interna o externa.
Partículas Magnéticas	Método que utiliza partículas magnéticas para identificar fisuras y defectos superficiales en materiales ferromagnéticos.	Identificar fisuras o defectos superficiales en metales.
Líquidos Penetrantes	Técnica para detectar fisuras en materiales no porosos mediante la aplicación de líquidos especiales.	Identificar fisuras no visibles a simple vista.
Réplicas Metalográficas	Permite examinar la microestructura del material mediante la replicación de su superficie.	Evaluar cambios en la microestructura del material.
Medición de Durezas	Determina la resistencia del material a la deformación permanente, indicando su capacidad para soportar condiciones de operación.	Verificar si el material cumple con los estándares de dureza.

Fuente: Tomado de Dwivedi, Vishwakarma, & Soni (2018); Niazi (2020).

Paso 5.1: Determinación de la prueba adecuada para cada componente

Antes de aplicar las pruebas, es necesario analizar varios aspectos técnicos de cada componente. La Tabla 13 resume los factores clave que deben evaluarse para seleccionar la

prueba o conjunto de pruebas más adecuadas. La aplicación de las pruebas se debe realizar siguiendo procedimientos escritos y aprobados por expertos en mantenimiento, con el aval de los responsables de cada área involucrada.

Tabla 13. Factores para seleccionar pruebas no destructivas por componente

Aspecto evaluado		Descripción
Materiales del Componente	del	Conocer el tipo de material permite seleccionar la técnica de prueba más efectiva y compatible con las propiedades del material.
Función del Componente	del	Entender el rol del componente en el sistema ayuda a determinar su importancia y criticidad en la operación general.
Modo de Operación		Evaluar las condiciones de operación (temperatura, presión, etc.) permite anticipar el tipo de desgaste que podría ocurrir.
Fallos Previos		Analizar el historial de fallos facilita identificar áreas de alto riesgo que requieren mayor atención en la inspección.
Fallos Potenciales		Identificar modos de fallo esperados para determinar la necesidad de pruebas adicionales y ajustar el plan de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, basado en Soares, da Silva Lopes, & Pinheiro (2021).

Paso 5.2: Evaluación y diagnóstico

Una vez aplicadas las pruebas, se evalúa y diagnóstica, comparando los resultados obtenidos con los criterios de aceptación o rechazo establecidos en los códigos de diseño del equipo o en los estándares de la industria (Tabla 14). Esta etapa determina la viabilidad operativa de cada componente y ayuda a planificar intervenciones futuras.

Tabla 14. Criterios de evaluación y diagnóstico en pruebas no destructivas.

Resultado Evaluado	Descripción
Condición Aceptable	Los componentes cumplen con los límites de seguridad y funcionalidad, lo que permite continuar la operación sin intervención inmediata.
Condición Obsoleta	Los componentes presentan desgaste que excede los límites aceptables y requieren reemplazo o mantenimiento inmediato.
Proyección de Fallos Futuros	Basado en los niveles actuales de desgaste, se estima el tiempo en el cual el componente puede fallar, permitiendo planificar mantenimientos preventivos.
Acciones de Mantenimiento Preventivo	Definición de intervenciones necesarias para evitar fallos y mantener la confiabilidad del sistema hospitalario.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017); Alfonso Llanes et al. (2022).

Etapa 6: Análisis estadístico de los componentes del equipo

En esta etapa, se realiza un análisis estadístico detallado de los componentes críticos de la caldera, con el objetivo de proyectar su vida útil restante (Tabla 15). Esto permite predecir el momento en que cada componente alcanzará su espesor mínimo de seguridad, basándose en datos históricos y en el uso de herramientas de análisis como el software

UltraPIPE® (Dwivedi, Vishwakarma, & Soni, 2018). A continuación, se describe cada paso del procedimiento y se incluyen tablas para facilitar la interpretación de los datos.

El objetivo es utilizar el análisis estadístico para estimar el tiempo de vida útil restante de los componentes críticos de la caldera, optimizando así el mantenimiento preventivo y minimizando los riesgos de fallos inesperados en el sistema.

Tabla 15. Procedimiento del Análisis Estadístico

Paso	Descripción
Paso 1: Revisión del Histórico de Inspecciones	Revisión exhaustiva de registros previos de inspección, incluyendo antecedentes, reportes, informes y dictámenes sobre el estado de los componentes de la caldera. Este paso permite obtener datos históricos de espesores, fundamentales para el análisis.
Paso 2: Carga de Datos en UltraPIPE®	Ingreso de los datos históricos en el software UltraPIPE® para organizar y procesar la información. UltraPIPE® administra los datos de espesores y facilita su análisis estadístico para monitorear la corrosión y la erosión en componentes críticos (Niazi, 2020).
Paso 3: Procesamiento Estadístico mediante UltraPIPE®	Con los datos organizados, se realiza el análisis estadístico en UltraPIPE®, aplicando cálculos que proyectan la velocidad de corrosión y estiman el tiempo restante de vida útil de cada componente.
Paso 4: Análisis de Resultados y Determinación de Áreas Críticas	Los resultados obtenidos permiten identificar componentes y áreas con menor vida útil proyectada, priorizando las zonas críticas para intervenir con mantenimiento preventivo o, de ser necesario, programar reemplazos.

Fuente: Adaptada de Dwivedi et al. (2018) y Niazi (2020).

La Tabla 16, muestra un ejemplo de vida útil proyectada de los componentes críticos de la caldera hospitalaria, como la tubería de vapor, generador de vapor, válvula de seguridad, unión soldada y tubería de retorno. Los valores reflejan el tiempo estimado en años para cada componente antes de alcanzar su espesor mínimo de seguridad, basado en el análisis estadístico realizado con el software UltraPIPE®. Esta información es útil para la planificación del mantenimiento preventivo, permitiendo identificar aquellos componentes que requieren mayor atención debido a su proximidad al final de su vida útil.

Tabla 15. Ejemplo de proyección de vida útil de componentes críticos de la caldera

Componente	Vida Útil Proyectada (años)
Tubería de vapor	5.2
Generador de vapor	7.4
Válvula de seguridad	6.1
Unión soldada	4.9
Tubería de retorno	5.8

Fuente: Adaptado de Soares, da Silva Lopes, & Pinheiro (2021).

La Tabla 17 ejemplifica una forma de identificación los componentes críticos de la caldera que requieren intervención, clasificando cada uno según su condición actual y la acción recomendada. La condición de desgaste se clasifica en niveles como "moderado" y "avanzado," proporcionando recomendaciones específicas, tales como mantenimiento preventivo, monitoreo periódico, o reemplazo inmediato. La tabla permite priorizar acciones de mantenimiento en función del estado de cada componente, asegurando una respuesta efectiva para mantener la seguridad y funcionalidad del sistema de calderas en un entorno hospitalario.

Tabla 17. Ejemplo de áreas críticas identificadas para intervención

Componente Crítico	Condición Actual	Acción Recomendada
Tubería de vapor	Desgaste moderado	Mantenimiento preventivo
Generador de vapor	Desgaste bajo	Monitoreo periódico
Unión soldada	Desgaste avanzado	Reemplazo o intervención urgente
Tubería de retorno	Desgaste moderado	Mantenimiento preventivo

Fuente: Adaptado de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017).

El análisis estadístico de los componentes críticos de la caldera proporciona una proyección precisa de la vida útil de cada elemento. Esto facilita la planificación de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo. La identificación de áreas críticas permite al equipo de trabajo intervenir de manera oportuna, asegurando la seguridad y funcionalidad de la caldera hospitalaria, optimizando así la gestión de activos en el entorno hospitalario.

Fase 3: Conclusión

La fase final define las acciones de mejora y evalúa la efectividad de la metodología aplicada.

1. **Determinación de Acciones de Mejora.** Con base en los resultados obtenidos, se definen acciones de mantenimiento específicas para cada componente crítico, estableciendo una frecuencia de aplicación y designando responsables. La Tabla 18 describe el plan de acción para las mejoras y la periodicidad recomendada para cada intervención.

Tabla 18. Ejemplo de plan de mantenimiento mejorado

Componente Crítico	Acción de Mantenimiento	Frecuencia de Aplicación	Responsable	Procedimiento Específico
Tubería de vapor	Inspección visual y limpieza	Cada 6 meses	Técnico de mantenimiento	Verificar corrosión y obstrucción, limpiar y desinfectar
Válvula de seguridad	Prueba de funcionamiento	Mensual	Técnico de seguridad	Realizar prueba de liberación y verificación de presión
Generador de vapor	Pruebas de integridad mecánica	Anual	Ingeniero de planta	Realizar pruebas de presión y ultrasonido para detectar fisuras
Tubería de retorno	Inspección y prueba de espesor	Cada 3 meses	Técnico de mantenimiento	Medir espesores y evaluar condiciones de corrosión
Unión soldada	Inspección con partículas magnéticas	Anual	Ingeniero de calidad	Detectar fisuras en soldaduras, aplicar técnica de partículas magnéticas

Fuente: Adaptado para el contexto hospitalario de gestión de activos.

2. **Cálculo del NPR Mejorado.** Tras la implementación de las mejoras, se recalcula el NPR para evaluar la reducción de riesgos lograda y verificar que los niveles de riesgo residual sean aceptables. La Tabla 19 ilustra el procedimiento para el cálculo del NPR mejorado, lo cual permite evaluar la efectividad de las intervenciones.

Tabla 19. Procedimiento para el Cálculo del NPR Mejorado

Paso	Descripción
Paso 1: Revisión de Ponderaciones	Asignar valores de severidad, ocurrencia y no detección después de la implementación de las mejoras.
Paso 2: Cálculo del NPR Mejorado	Multiplicar los valores actualizados de severidad, ocurrencia y no detección para obtener el nuevo NPR.
Paso 3: Evaluación de Resultados	Comparar el NPR mejorado con el NPR inicial para evaluar la reducción del riesgo.
Paso 4: Priorización de Intervenciones	Enfocar los esfuerzos de mantenimiento en aquellos componentes cuyo NPR mejorado aún indica un riesgo significativo.
Paso 5: Documentación y Seguimiento	Registrar los resultados y realizar seguimiento a los componentes que requieren atención periódica.

Fuente: Adaptado de protocolos de análisis de riesgos en mantenimiento industrial.

3. **Evaluación de vida útil de los componentes y proyección de intervenciones.** Mediante el análisis estadístico en software especializado, como UltraPIPE®, se estima la vida útil restante de los componentes de la caldera, facilitando la planificación de mantenimientos preventivos. La Tabla 20 muestra un ejemplo de vida útil proyectada para componentes críticos.

Tabla 20. Ejemplo de proyección de vida útil de componentes críticos

Componente	Vida Útil Proyectada (años)
Tubería de vapor	5.2
Generador de vapor	7.4
Válvula de seguridad	6.1
Unión soldada	4.9
Tubería de retorno	5.8

Fuente: Adaptado de Soares, da Silva Lopes, & Pinheiro (2021).

4. **Clasificación de Niveles de Riesgo.** Para priorizar intervenciones, se clasifica cada componente según su nivel de criticidad. La Tabla 21 clasifica los niveles de riesgo y define las acciones recomendadas para cada nivel, contribuyendo a una gestión eficiente y segura del activo en el entorno hospitalario.

Tabla 21. Ejemplo de clasificación de niveles de riesgo y acciones recomendadas.

Nivel de Riesgo	Color	Descripción	Acción Requerida
H: Muy alto riesgo	Rojo	Fallos con consecuencias inaceptables y alta severidad.	Intervención inmediata para reducir la frecuencia del fallo.
S: Alto riesgo	Naranja	Fallos de riesgo elevado, tolerables solo si no es viable su mitigación.	Monitoreo continuo y planificación de mitigación.
M: Riesgo tolerable	Amarillo	Fallos con riesgo moderado y relación riesgo-costó óptima.	Mantenimiento rutinario.
L: Riesgo aceptable	Verde	Fallos de bajo riesgo y sin impacto significativo en la operación.	Tolerancia al fallo; manejo en mantenimientos programados.

Fuente: Adaptado de Goya Rodríguez & Alfonso Llanes (2017).

La metodología presentada para la gestión de riesgos asociados a las calderas hospitalarias mediante el cálculo del NPR y el uso de pruebas no destructivas, puede ser replicable en condiciones similares. La combinación de AMEF y PND permite una evaluación integral que mejora la seguridad y fiabilidad operativa de estos equipos críticos.

4. Discusión

El presente estudio propone una metodología que combina el Análisis Modal de Efectos y Fallos, el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo y pruebas no destructivas para optimizar la gestión de calderas en entornos hospitalarios. A diferencia de estudios previos que suelen centrarse en técnicas de mantenimiento correctivo o exclusivamente en AMEF, esta metodología se enfoca proactivamente en los riesgos operacionales de estos equipos críticos. Investigaciones anteriores, como la de Ardila Marín et al. (2016), se enfocan

en mantenimiento preventivo y correctivo, pero muestran limitaciones para anticipar fallos en contextos de alta presión y temperatura, como las calderas hospitalarias (Tamajón-Reyes, et al. 2016). En contraste, el enfoque integral de este estudio permite una identificación temprana de riesgos al combinar AMEF y PND, mejorando la capacidad de anticipación en la gestión de activos hospitalarios.

Estudios como el de Soares et al. (2021) han empleado AMEF para la priorización de fallos en equipos médicos, pero no incluyen el componente de PND, lo que limita la precisión del diagnóstico mecánico. La metodología aquí propuesta aporta valor al integrar PND, como el ultrasonido y partículas magnéticas, que permiten una evaluación precisa del estado estructural de los componentes, superando las limitaciones de enfoques basados solo en AMEF. Esta combinación facilita la implementación de intervenciones preventivas específicas, incrementando la confiabilidad operativa del equipo y la disponibilidad de las calderas para el hospital.

Asimismo, esta metodología ofrece ventajas en la priorización de acciones de mantenimiento. Mientras que algunos estudios, como el de Shahin et al. (2018), utilizan AMEF y NPR para identificar modos de fallo, carecen de un sistema integrado para la actualización de NPR tras las mejoras. En la propuesta, se recalcula el NPR después de las acciones correctivas, lo que permite evaluar y ajustar el plan de mantenimiento de manera continua.

No obstante, esta metodología presenta desafíos, tales como la necesidad de personal capacitado en PND y acceso a herramientas avanzadas de análisis estadístico, como UltraPIPE®, lo cual puede ser una limitación en hospitales teniendo en cuenta que los recursos tienden a ser limitados (IMCO,2023). Para superar esta barrera, sería benéfico fomentar alianzas entre hospitales y centros de investigación para facilitar la capacitación y el acceso a herramientas especializadas.

Finalmente, este trabajo sugiere que la incorporación de tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas, podría mejorar el monitoreo en tiempo real de activos hospitalarios. Estudios como el de Saputra et al. (2020) han mostrado el valor del IoT en el mantenimiento industrial, y su aplicación en hospitales podría optimizar aún más la gestión de equipos críticos y reducir los riesgos operativos. El monitoreo continuo permitiría la detección y

respuesta temprana a fallos potenciales, maximizando la seguridad del sistema hospitalario (Cruz et al, 2018).

Conclusiones

La metodología propuesta, al integrar el Análisis Modal de Efectos y Fallos con el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo y pruebas no destructivas, permitió identificar y mitigar los riesgos críticos asociados a las calderas hospitalarias, optimizando las actividades de mantenimiento preventivo.

La aplicación de esta metodología contribuye a la confiabilidad y seguridad operativa de las calderas, minimizando riesgos para los usuarios y el personal y reduciendo interrupciones operativas en el hospital.

La priorización de intervenciones en función de los riesgos críticos optimizó el uso de recursos y redujo los costos de mantenimiento, favoreciendo la sostenibilidad de los activos hospitalarios mediante un enfoque de mantenimiento basado en la condición.

La estructura flexible de la metodología permite su implementación en distintos hospitales, especialmente en aquellos con limitaciones de recursos, lo que amplía su aplicabilidad en diversas instituciones de salud.

Se recomienda la implementación continua de esta metodología con revisiones y ajustes periódicos. Futuras investigaciones podrían explorar el uso de tecnologías como sensores IoT para un monitoreo más preciso y en tiempo real de activos críticos.

Agradecimientos

Al programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México (TECNM), Campus Misantla, Veracruz, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado durante este periodo.

Referencias bibliográficas

- Alfonso Llanes, A., Gonzalez Magan, D. R., & Borroto Pentón, Y. (2022). Aplicación del mantenimiento basado en el riesgo a equipos de la empresa agroindustrial azucarera “José María Pérez Capote.” *Centro Azúcar*, 49(2), 112–121. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612022000200112&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Alva Mahé, M. A., Borroto Pentón, Y., Alfonso Llanes, A., & Reyes González, D. (2022). Aplicación de pruebas no destructivas para la evaluación y diagnóstico de la integridad mecánica en caldera acuotubular. *Ingeniantes*, 2(2), 73–77. <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes9no2vol2/11>
- Amendola, L. (2021). ¿Por qué la industria de manufactura en México requiere implementar gestión de activos? PMM Learning. <https://www.pmmlearning.com/porque-la-industria-de-manufactura-en-mexico-requiere-implementar-gestion-de-activos/>
- Ardila Marín, J. G., Ardila Marín, M. I., Rodríguez Gaviria, D., & Hincapié Zuluaga, D. A. (2016). La gerencia del mantenimiento: Una revisión. *Dimensión Empresarial*, 14(2), 129–144. <http://www.scielo.org.co/pdf/diem/v14n2/v14n2a09.pdf>
- Buriticá, C. A. (2014). Gestión de activos hospitalarios: Seguridad y efectividad clínica. *Universitas Científica*, 17(2), 38–41. <https://revistas.upb.edu.co/index.php/universitas/article/view/3235>
- Cabriales Toledo, G. L. (2018). *Mantenimiento basado en el riesgo para el equipamiento de la UEB Mantenimiento General de la empresa Planta Mecánica de Villa Clara* [Tesis de maestría, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas].
- Cruz, A. M., Quiroga, D. A. T., Arévalo, D. A. A., Bernal, H. A. M., Rojas, J. S., & Parra, P. A. A. (2018). Diseño e implementación de un sistema para el seguimiento de los fallos en dispositivos médicos utilizando internet de las cosas (IOT). *acofipapers.org*. <https://doi.org/10.26507/ponencia.681>
- Delgado Gómez, L. A. Guía de gestión y mantenimiento de instalaciones hospitalarias [Internet]. Madrid, España: Colegio Oficial y Asociación de Ingenieros Industriales de Madrid; 2021. p. 156. Available from: https://www.coiim.es/app/uploads/2023/01/20210920_Guia_Gestion_Mantenimiento_Instalaciones_Hospitalarias.pdf

- Depool-Malave, T. A. (2015). *Mejora de la gestión de activos físicos según PAS 55-ISO 55000 evaluando el desempeño de los roles del marco de competencias del IAM* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia].
- Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, P. A. (2018). Advances and researches on non-destructive testing: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3690–3698. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>
- Enríquez, L., & Chinga, M. (2019). Evaluación del nivel de madurez como función de la gestión de activos. *Revista de Estudios Empresariales. Segunda Época*, 2, 177–189. <https://doi.org/10.17561/ree.v2019n2.10>
- Figuroa Uribe, Augusto Flavio, & Hernández Ramírez, Julia. (2021). Seguridad hospitalaria, una visión de seguridad multidimensional. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 21(1), 169-178. <https://doi.org/10.25176/rfmh.v21i1.3490>
- González, J. C., Myer, R. A., & Pachón Muñoz, W. (2017). La evaluación de los riesgos antrópicos en la seguridad corporativa: Del análisis modal de fallos y efectos (AMFE) a un modelo de evaluación integral del riesgo. *Revista Científica General José María Córdova*, 15(19), 269. <https://doi.org/10.21830/19006586.81>
- González Pérez, A. M. (2018). *Propuesta de mejoras en el proceso de gestión del mantenimiento en la empresa comercializadora de combustible de Villa Clara basado en la gestión de riesgo* [Tesis de maestría, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas].
- González Sosa, J. V., Loyo Quijada, J., López Ontiveros, M. A., Pérez Montoya, P., & Cruz Hernández, A. (2018). Mantenimiento industrial en máquinas. *Revista Ingeniería Industrial*, 17(3), 209–225. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.12>
- Goya Rodríguez, Y., & Alfonso Llanes, A. (2017). *Acciones de mejora para la mitigación de riesgos en el proceso de gestión de mantenimiento en el UEB Combinado Cubanacan de Villa Clara*. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7991/Yadier_Sánchez_Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=n
- Hernández Rodríguez, R. A., Fajardo, M., Fructuoso, O., & La Habana, R. (2021). Bases metodológicas para la gestión por procesos en los servicios hospitalarios. *Revista de*

- Información Científica para la Dirección en Salud INFODIR*, 35, 1–23.
<http://revinfodir.sld.cu/index.php/infodir/article/view/785>
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2023). Sube y baja de los recursos para la salud.. <https://imco.org.mx/sube-y-baja-de-los-recursos-para-salud/>
- Kabeta, S. H., Chala, T. K., & Tafese, F. (2023). Medical equipment management in general hospitals: Experience of Tulu Bolo General Hospital, South West Shoa Zone, Central Ethiopia. *Medical Devices: Evidence and Research*, 16, 57–70.
<https://doi.org/10.2147/meder.s398933>
- Lo, H.-W., Shiue, W., Liou, J. J. H., & Tzeng, G.-H. (2020). A hybrid MCDM-based FMEA model for identification of critical failure modes in manufacturing. *Soft Computing*.
<https://doi:10.1007/s00500-020-04903-x>
- Martínez Lugo, C. A. (2004). *Implementación de un análisis de modo y efecto de falla en una línea de manufactura para juguetes* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Niazi, M. A. (2020). Proper maintenance of a boiler system. *Control*.
<https://control.com/technical-articles/proper-maintenance-of-a-boiler-system/>
- Qin, J., Xi, Y., & Pedrycz, W. (2020). Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. *Applied Soft Computing*, 89, 106134. <https://doi:10.1016/j.asoc.2020.106134>
- Quiroz-Flores, C. P. (2020). The management of medical equipment in the challenges of the national health system: A review. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 41(1), 141–150. <https://doi.org/10.17488/RMIB.41.1.11>
- Rodríguez Toledo, M. A. (2021). *Procedimiento para el tratamiento de las limitaciones del proceso de gestión de mantenimiento a través de la gestión de riesgos* (Vol. 272) [Tesis de doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas].
- Saputra, M., Hermawan, I., Puspitasari, W., & Almaarif, A. (2020). How to integrate enterprise asset management system for smart hospital: A case study. En *7th International Conference on ICT for Smart Society: AIoT for Smart Society, ICISS 2020* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICISS50791.2020.9307535>
- Shahin, A., Aminsabouri, N., & Kianfar, K. (2018). Developing a decision-making grid for determining proactive maintenance tactics: A case study in the steel industry. *Journal of*

- Manufacturing Technology Management*, 29(8), 1296–1315.
<https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2017-0273>
- Soares, E., da Silva Lopes, I., & Pinheiro, J. (2021). Methodology to support maintenance management for the identification and analysis of the degradation of equipment reliability. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 1272–1277.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.153>
- Sola Rosique, A., & Crespo Marquez, A. (2017). *Marco de referencia para la gestión de activos de alta capitalización. Definición de procesos de negocio y de técnicas avanzadas de soporte a la gestión* [Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla].
- Tamajón-Reyes, C. H., & Mojicar-Caballero, S. (2016). Análisis de fallos: el caso de calderas pirotubulares y su impacto ambiental. *Ciencia en su PC*, (2), 34-43.
- Valle García, A., & Alfonso Llanes, A. (2017). Contribución al mejoramiento del proceso de gestión de inventario en la Empresa Constructora de Obras de Arquitectura e Industriales N° 1 de Villa Clara a partir del análisis de riesgo. *Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*.
- Xiao, N., Huang, H. Z., Li, Y., He, L., & Jin, T. (2011). Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, 18(4), 1162–1170. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004>

Anexo A

Lista de verificación para cumplimiento de la metodología

Fase	Etapa	Subsección	Descripción	Cumple	
				SI	NO
Fase 1: Preparación	1. Conformación del grupo de trabajo	1.1 Selección de equipo interdisciplinario	¿Se seleccionó un equipo con experiencia en mantenimiento, integridad mecánica y operación de calderas?		
		1.2 Asignación de roles y responsabilidades	¿Se asignaron roles específicos (técnicos y administrativos) según la competencia de cada miembro?		
		1.3 Matriz de competencias	¿Se realizó una matriz de competencias para evaluar y asignar adecuadamente los roles?		
	2. Caracterización de la institución	2.1 Evaluación de capacidad operativa	¿Se evaluó la capacidad operativa, incluyendo servicios médicos y equipamiento?		
		2.2 Cuestionario de evaluación operativa	¿Se aplicó un cuestionario para evaluar aspectos críticos de operación?		
		2.3 Mapeo de procesos (SIPOC)	¿Se realizó un diagrama SIPOC para mapear los procesos relacionados con las calderas?		
	3. Caracterización de la caldera	3.1 Registro de características técnicas	¿Se documentaron especificaciones (capacidad, diseño) de la caldera?		
		3.2 Historial de mantenimiento	¿Se revisaron registros de mantenimiento anteriores?		
		3.3 Identificación de componentes críticos	¿Se identificaron componentes clave conforme a los estándares ASME?		
Fase 2: Aplicación	4. Análisis de riesgo mediante AMEF y NPR inicial	4.1 Identificación de modos de fallo	¿Se identificaron modos de fallo, causas y efectos para cada componente crítico?		
		4.2 Cálculo de NPR inicial	¿Se calculó el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) basado en severidad, ocurrencia y detectabilidad?		
		4.3 Priorización de riesgos	¿Se usaron diagramas de Ishikawa y Pareto para priorizar los riesgos identificados?		
	5. Aplicación de pruebas no destructivas (PND)	5.1 Inspección visual	¿Se realizó una inspección visual detallada para detectar daños visibles?		
		5.2 Medición de espesores por ultrasonido	¿Se utilizó ultrasonido para medir espesores y detectar pérdida de material?		
		5.3 Pruebas adicionales (líquidos penetrantes, partículas magnéticas, réplicas metalográficas)	¿Se aplicaron pruebas adicionales para detectar fisuras y evaluar la condición mecánica?		
	6. Análisis estadístico de los componentes	6.1 Carga de datos en software	¿Se ingresaron datos en software para análisis estadístico?		
		6.2 Estimación de vida útil restante	¿Se estimó la vida útil de componentes críticos y se identificaron zonas de alto riesgo?		
		6.3 Análisis de tendencia	¿Se aplicó regresión o análisis de tendencia en los datos de desgaste y corrosión?		
Fase 3: Conclusión	7. Determinación de acciones de mejora	7.1 Definición de medidas de mantenimiento	¿Se definieron acciones específicas para el mantenimiento de cada componente crítico?		
		7.2 Frecuencia de aplicación	¿Se estableció la frecuencia de cada acción de mantenimiento?		
		7.3 Plan de implementación	¿Se desarrolló un plan de implementación detallado, incluyendo responsables y procedimientos?		
	8. Cálculo del NPR mejorado	8.1 Recalculo del NPR	¿Se recalculó el NPR después de aplicar las acciones de mejora?		
		8.2 Evaluación de efectividad	¿Se evaluó la efectividad de las acciones de mejora y el nivel de reducción de riesgos?		

		8.3 Aceptación de niveles de riesgo alcanzados	¿Se verificó que los niveles de riesgo residual fueran aceptables?		
--	--	--	--	--	--