

*Artículo Científico*

**Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para optimizar la disponibilidad del generador de vapor de la empresa Agronegocios García**

**Design of a preventive maintenance plan to optimize the availability of the steam generator at Agronegocios García company**

Hernán Darío Herrera<sup>1</sup> , Andrés Alejandro García<sup>2</sup> , Miguel Ángel Briones<sup>3</sup> , Wilmer Fabricio Almeida<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, hherrerac@uteq.edu.ec, Quevedo - Ecuador

<sup>2</sup> Agronegocios García, angar\_gallero@hotmail.com, Quevedo - Ecuador

<sup>3</sup> Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, miguelbriones@itscv.edu.ec, Quevedo - Ecuador

<sup>4</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, walmeidam@uteq.edu.ec, Quevedo - Ecuador

Autor para correspondencia: hherrerac@uteq.edu.ec

**RESUMEN**

La continuidad operativa de los sistemas térmicos en procesos industriales depende de una adecuada gestión técnica del mantenimiento. En la empresa Agronegocios García, ubicada en Quevedo, el generador de vapor tipo caldera pirotubular de 10 HP cumple un rol esencial en el acondicionamiento térmico del cuarto de fermentación del tabaco, operando bajo condiciones ambientales exigentes. El objetivo del presente estudio fue diseñar un plan de mantenimiento preventivo que optimice la disponibilidad operativa del equipo, aplicando el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) con base en los criterios de gravedad, frecuencia y detectabilidad. Se identificaron siete modos de falla críticos mediante diagnóstico técnico y revisión de documentación, entre ellos incrustaciones internas, obstrucción en válvulas de seguridad y corrosión externa. A partir del cálculo del Índice de Prioridad de Riesgo (IPR) se priorizaron acciones como purgas programadas, ajustes de alineación, aislamiento térmico y control de parámetros físico-químicos del agua. El plan proyecta una disponibilidad técnica del 98,9 %, lo que evidencia la importancia de un enfoque preventivo sistemático para reducir riesgos operativos, evitar paradas no programadas y asegurar la calidad del proceso productivo, sentando bases para la transición futura hacia estrategias de mantenimiento predictivo.

**Palabras clave:** Mantenimiento; Disponibilidad; Generador; Falla; Riesgo.

**ABSTRACT**

The operational continuity of thermal systems in industrial processes depends on proper technical maintenance management. At Agronegocios García, located in Quevedo, the steam generator, a 10 HP fire-tube boiler, plays a key role in the thermal conditioning of the tobacco fermentation room, operating under demanding environmental conditions. The objective of this study was to design a preventive maintenance plan to optimize the operational availability of the equipment, applying Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) based on severity, occurrence, and detectability criteria. Seven critical failure modes were identified through technical diagnosis and operational documentation review, including internal scaling, safety valve obstruction, and external corrosion. Based on the calculation of the Risk Priority Number (RPN), preventive actions were prioritized such as scheduled purging, alignment adjustments, thermal insulation, and control of water physicochemical parameters. The proposed plan projects a technical availability of 98.9%, highlighting the importance of a systematic preventive approach to reduce operational risks, avoid unplanned shutdowns, and ensure process quality. Furthermore, this study establishes the foundation for future implementation of predictive maintenance strategies through basic sensorization, offering a replicable methodology for industrial environments where medium-capacity thermal equipment is critical under continuous operating conditions.

**Keywords:** Maintenance; Availability; Generator; Failure; Risk.

**Derechos de Autor**

Los originales publicados en las ediciones electrónicas bajo derechos de primera publicación de la revista son del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-4.0 Internacional](#).



**Citas**

Herrera, H. D., García, A. A., Briones, M. Ángel, & Almeida, W. F. Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para optimizar la disponibilidad del generador de vapor de la empresa Agronegocios García. *CONECTIVIDAD*, 7(1), 79–94. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v7i1.394>

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la continuidad operativa y la confiabilidad de los equipos térmicos constituyen factores determinantes en la eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales. El mantenimiento industrial ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, transitando desde enfoques correctivos hacia prácticas sistemáticas preventivas y predictivas, con el objetivo de reducir los tiempos de parada, prolongar la vida útil de los activos y optimizar la disponibilidad operativa (Miranda Pablos & Navarro Arvizu, 2025). Dentro de este contexto, los generadores de vapor cumplen un rol crítico en industrias donde el control térmico es indispensable, como en los sectores alimentario, farmacéutico y tabacalero (González-López & Mago-Ramos, 2024).

La empresa Agronegocios García, localizada en el kilómetro 9 de la vía Quevedo, provincia de Los Ríos, Ecuador, utiliza un generador de vapor tipo caldero pirotubular de 10 HP de fabricación local, destinado al acondicionamiento del cuarto de fermentación del tabaco. Este proceso requiere mantener condiciones ambientales específicas, con una humedad relativa entre 85 % y 95 % y una temperatura constante de 38 a 40 °C. Bajo estas condiciones, el generador de vapor se convierte en un equipo de alta criticidad operativa, cuya funcionalidad debe garantizarse mediante estrategias sistemáticas de mantenimiento preventivo, ajustadas a su entorno de operación (Quiroz Sánchez et al., 2024).

Aunque existen estudios consolidados sobre mantenimiento de calderas en plantas industriales de gran escala, se ha identificado una notoria escasez de literatura científica orientada a generadores de vapor de baja capacidad en industrias artesanales como la tabacalera (Cubas Rodríguez & León León, 2024). Esta brecha documental limita el desarrollo de estrategias de mantenimiento técnico eficientes, especialmente en contextos donde no se cuenta con históricos detallados de fallas, tiempos medios entre fallos (MTBF) (Santos Gonzales et al., 2024), ni costos asociados a las intervenciones. El siguiente estudio a pesar de su facilidad de operación, las Calderas de Baja Capacidad (CBC) presentan alta susceptibilidad a fallos técnicos y operacionales, lo que incrementa el riesgo de accidentes, reduce la disponibilidad y genera impactos ambientales negativos.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo diseñar un plan de mantenimiento

preventivo técnico-adaptativo, orientado a mejorar la disponibilidad operativa del generador de vapor de 10 HP. La propuesta contempla la estructuración de actividades de inspección sistemática, diagnóstico de fallas, análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) y monitoreo técnico con base en las condiciones reales del proceso de fermentación del tabaco (Rodríguez Alza et al., 2024). Se espera que la implementación del plan contribuya significativamente a reducir los tiempos de inactividad, prevenir fallas críticas y mitigar riesgos operacionales y ambientales en el entorno de producción.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El objeto de estudio es un generador de vapor tipo caldera pirotubular de 10 HP, instalado en la empresa Agronegocios García (Quevedo, Ecuador). El equipo es de fabricación nacional y presenta una configuración de quemador diésel, serpentines de tubos horizontales, y una cámara de combustión semicilíndrica. Este generador abastece el sistema de fermentación de tabaco, operando en condiciones ambientales con humedad relativa del 85–95 % y temperatura interna entre 38 y 40 °C.

Debido a la reciente incorporación del generador, no se dispone de históricos técnicos formales (bitácoras, registros GMAO o bases de datos operativas), lo que limitó el análisis basado en indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad o costos. Por tanto, el estudio se sustentó de acuerdo al autor (Castillo & Llanos, 2021):

- Observación directa del comportamiento operativo,
- Consultas a operarios con experiencia,
- Referencias bibliográficas de equipos equivalentes,
- Diagnóstico técnico in situ y análisis cualitativo de fallas.

### 2.1. Entorno del estudio y equipos utilizados

Los análisis se realizaron sobre una caldera pirotubular de 10HP instalada en el cuarto de fermentación de la empresa Agronegocios García, en la Tabla 1 el entorno térmico operativo se determina en estimaciones por temperaturas constantes entre 38 y 40 °C.

**Tabla 1.** Descripción técnica de equipo Caldera Pirotubular de 10 Hp

PARÁMETRO	VALOR APROXIMADO
Potencia térmica	10 HP ≈ 33480 BTU/h ≈ 9.8 kW
Producción de vapor	345 - 360 lb/h (≈ 157-163 kg/h)
Presión de trabajo	100 - 150 psi (≈ 7-10 bar)
Tipo de caldera	Pirotubular o vertical eléctrica/gas/diésel
Consumo de combustible	Diesel: 2.5 - 3 L/h aprox. Gas natural: 2.6 - 3.0 m <sup>3</sup> /h
Eficiencia térmica	80 - 85% (típico en pirotubulares)
Dimensiones	1.5 m(L) x 1.2m (A) x 1.8m (H) aprox

Las especificaciones técnicas aproximadas de una caldera pirotubular de 10 HP, destacando una potencia térmica de 9,8 kW y una producción de vapor entre 157 y 163 kg/h. Opera a una presión de 7 a 10 bar y puede funcionar con diésel o gas natural, con consumos de 2,5 – 3 L/h y 2,6–3,0 m<sup>3</sup>/h respectivamente. Presenta una eficiencia térmica del 80 % al 85 %, típica en este tipo de calderas, y dimensiones compactas de 1,5 m x 1,2 m x 1,8 m, lo que la hace adecuada para aplicaciones industriales de mediana exigencia.

## 2.2. Variables y criterios de evaluación

Las variables utilizadas en este estudio se determinaron en tres factores técnicos aplicados por su criticidad por modo de falla en gravedad, frecuencia y detectabilidad cada una fue valorada conforme una escala técnica que permite calcular el índice de prioridad de riesgo (IPR) como producto de los tres factores (Bondarenko et al., 2021). Se define los factores técnicos:

- Gravedad (S): Mide el impacto de la falla sobre la disponibilidad y seguridad del equipo.  
Escala de 1 (mínimo impacto) a 10 (fallo crítico).
- Frecuencia (O): Representa la recurrencia esperada de la falla bajo condiciones normales.  
Escala de 1 (muy rara) a 10 (muy frecuente).
- Detectabilidad (D): Indica la capacidad del sistema para anticipar o identificar la falla

antes de que ocurra. Escala inversa: 1 (alta detectabilidad) a 10 (baja detectabilidad).

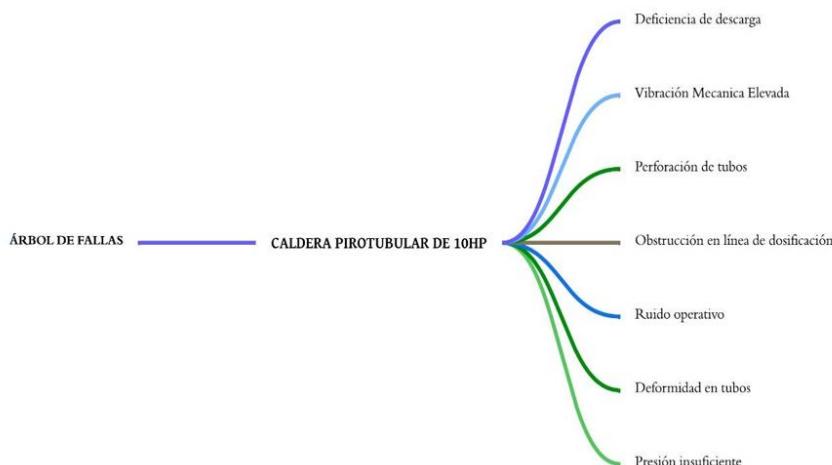
Una vez se han determinado los valores antes mencionados se realiza el cálculo de Índice de Prioridad de Riesgos (IPR), que es un factor que permite dar la prioridad a las causas que habría que evitar para que no se lleguen a evidenciar los fallos (Herrera Vidal & Herrera Vega, 2016).

$$IPR = S \times O \times D$$

### 2.3. Procedimiento para la recolección de datos

La recolección de información se realizó mediante un diagnóstico técnico de fallas, causas probables y medidas correctivas utilizando referencias operativas para calderas, se identificaron principales fallas potenciales como la omisión de descarga en caldera, presión de descarga, vibraciones mecánicas elevadas, ruido irregular en bomba de alimentación en donde se implementó medidas de aislamiento térmico, verificación de NPSH determinando una estrategia de mantenimiento predictivo.

**Figura 1.** Árbol de fallas Caldera Pirotubular



La Figura 1 permite visualizar de forma estructurada los modos de falla asociados, tales como obstrucciones, deformaciones, vibraciones, entre otros, facilitando la evaluación técnica de riesgos y la planificación de acciones correctivas o preventivas en el mantenimiento del equipo.

### 2.4. Procesamiento y análisis de datos

Los datos fueron procesados mediante el método Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) con el objetivo de identificar los sistemas de criticidad en la caldera pirotubular con valores en gravedad, frecuencia y detectabilidad, que mide la dificultad para identificar fallas, a partir de los parámetros se calculó el índice de prioridad de riesgo (IPR) mediante la fórmula proporcionada

para priorizar de forma técnica las acciones correctivas y preventivas enfocando los recursos de mantenimiento (Resta López et al., 2019).

Se aplicó el AMFE, ya que es un método estandarizado para detectar y eliminar problemas de forma sistemática y total, cuyos objetivos son: reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales y las causas asociadas con el diseño y fabricación de un producto; determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema; identificar las acciones que podrían minimizar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial; analizar la confiabilidad del sistema y documentar el proceso.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente investigación, los resultados se analizaron en función de los criterios técnicos definidos en la metodología, lo que permitió establecer una base sólida para la evaluación comparativa de las condiciones operativas del generador de vapor. Se estableció que la producción nominal de vapor se encuentra en un rango de 157 a 163 kg/h, lo que, junto con una presión operativa entre 7 y 10 bar, constituye una referencia técnica para proyectar las cargas de trabajo y la frecuencia óptima de intervención. Esta información fue fundamental para estructurar las rutinas de mantenimiento en función de la demanda térmica del sistema de fermentación.

Asimismo, se procedió a clasificar y priorizar los modos de falla potenciales mediante la aplicación del Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF). Para ello, se utilizó una escala de evaluación basada en tres factores clave: gravedad, frecuencia y detectabilidad. La Tabla 2 resume los niveles definidos para cada uno de estos factores, constituyendo un marco estructurado para la cuantificación del Índice de Prioridad de Riesgo (IPR), lo cual permitió establecer acciones preventivas focalizadas.

**Tabla 2.** Probabilidad de la gravedad modo de fallo

Gravedad	Criterio Técnico	Valor
Muy baja	No afecta la operación ni la percepción	1
Baja	El efecto genera una alteración menor	2 - 3
Moderada	Causa reducción parcial de producción	4 - 6
Alta	Impacto severo, requiere intervención inmediata	7 - 8
Muy Alta	Compromete la seguridad y continuidad	9 - 10

Para el criterio de gravedad dentro del Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF), se clasifica los efectos de un modo de falla desde “muy baja” hasta “muy alta”, considerando que en muy baja “no afecta la operación ni la percepción y muy alta “compromete la seguridad y continuidad según su impacto en la operación”.

En los métodos relacionados para definir su capacidad de fallas se determina, en la Tabla 3 los valores que representa con sus respectivos criterios.

**Tabla 3.** Probabilidad de frecuencia modo de fallo

Frecuencia	Criterio Técnico	Valor
Muy baja	Fallo sin precedentes	1
Baja	Fallos esporádicos en casos aislados	2 - 3
Moderada	Se presenta ocasionalmente	4 - 6
Alta	Recurrente dentro del ciclo de vida	7 - 8
Muy Alta	Fallo inevitable con alta frecuencia	9 - 10

Se determina la criticidad en conjunto con su frecuencia donde se clasifica desde “muy baja” hasta “muy alta” considerando que en muy baja presenta “fallo son precedentes” y muy alta “fallo inevitable con alta frecuencia”.

Mediante los métodos aplicados, también se identifican las condiciones actuales del equipo y su comportamiento operativo, en la Tabla 4 se define su detectabilidad mediante su criterio.

**Tabla 4.** Probabilidad de detectabilidad modo de fallo

Detectabilidad	Criterio Técnico	Valor
Muy baja	Fallo evidente se implementa controles básicos	1
Baja	Detectable podría omitirse en revisiones iniciales	2 - 3
Moderada	Detectable en fases posteriores en inspección específica	4 - 6
Alta	Difícil de detectar con los controles antes de su manifestación funcional	7 - 8
Muy Alta	Indetectable antes de provocar un impacto directo	9 - 10

Se determina la criticidad en conjunto con su detectabilidad donde se clasifica desde “muy baja” hasta “muy alta” considerando que en muy baja presenta “Fallo evidente se implementa controles básicos” y muy alta “Indetectable antes de provocar un impacto directo”. Se diagnosticó 7

modos de falla con sus respectivas causas y medidas correctivas, lo que permitió definir una línea base de riesgo operativo proyectado, esencial para la elaboración del plan preventivo, en la Tabla 5 se determina las acciones a tartar y sus medidas.

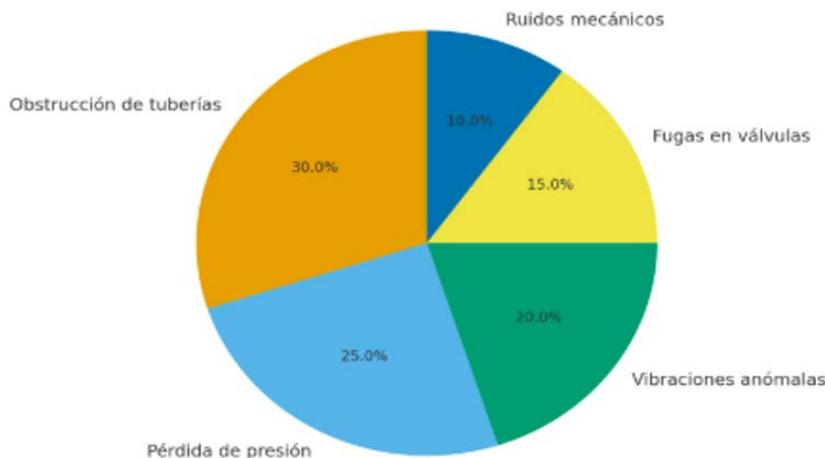
**Tabla 5.** Modos de Falla y Acciones Correctivas

Falla	Causas Probables	Medida Correctiva
Falta de acumulación de agua en el tanque mediante periodo operativo	Sobre temperatura del retorno, falla en válvula de retención, errores en sensores de nivel	Realizar aislamiento térmico, limpieza de tuberías
Omisión de descarga en caldera	Baja presión, obstrucción al descargar, filtro de succión saturado	Inspecciones rutinarias de conexión eléctrica, limpieza de líneas y ajuste de parámetros
Presión de descarga insuficiente	Velocidad inadecuada, desgaste de anillos guía, desalineación de eje	Sustitución de componentes internos, ajuste de alineación operacional
Ruido operativo irregular en la bomba	Impactos críticos ingreso de sólidos y cavitación	Revisión de condiciones de succión (NPSH)
Vibraciones mecánicas	Impulsor averiado, instalación incorrecta	Sustitución de impulsor, verificación y corrección almontaje
Perforación en tubos	Possible corrosión interna, acumulación de incrustaciones	Control de PH y purgas programadas mensualmente
Obstrucción en líneas de dosificación	Presencia de residuos	Limpieza semanal o mensual

Se identifican fallas como la falta de acumulación de agua en el tanque, omisión de descarga, presión insuficiente, ruido operativo irregular, vibraciones mecánicas, perforación en tubos y obstrucción en las líneas de dosificación. Tal como se observa en la Figura 2, las fallas más frecuentes se concentran en la obstrucción de tuberías (30 %), seguida de pérdida de presión (25 %), vibraciones anómalas (20 %), fugas en válvulas (15 %) y ruidos mecánicos (10 %), evidenciando que los problemas hidráulicos y mecánicos representan la mayor carga de mantenimiento no programado en los sistemas.

El plan de mantenimiento propone un conjunto de medidas correctivas orientadas a la prevención y mitigación del riesgo operacional, entre las que destacan: aislamientos térmicos, inspecciones rutinarias, sustitución de componentes críticos, controles de parámetros físico-químicos del

**Figura 2.** Distribución de tipos de falla



agua, verificación de condiciones de succión y limpiezas periódicas. Estas acciones están alineadas con una estrategia de mantenimiento técnico sistemático, cuya finalidad es garantizar la disponibilidad y eficiencia del sistema térmico, minimizar los riesgos de paradas no planificadas, y preservar la integridad mecánica del equipo a lo largo de su ciclo de vida útil.

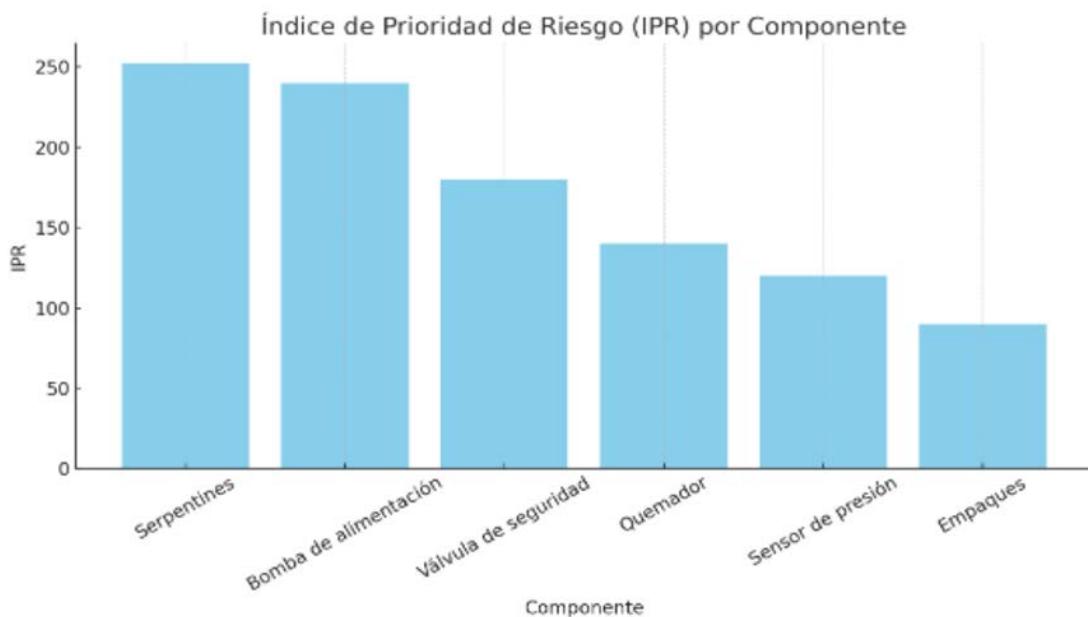
Se identificaron en la Tabla 6 tres fallas con el índice de prioridad de riesgo (IPR) superiores a 200: incrustaciones internas (IPR=256), obstrucción de válvula de seguridad (IPR=216) y corrosión externa (IPR=210), las cuales fueron clasificadas como de atención prioritaria en el diseño del plan.

**Tabla 6.** Índice de prioridad de riesgo modo de fallas

Componente	Falla detectada	Gravedad (S)	Frecuencia (O)	Detectabilidad (D)	$IPR = S \times O \times D$
Serpentes	Obstrucción por incrustaciones	9	7	4	<b>252</b>
Bomba de alimentación	Vibraciones anormales y ruido	8	6	5	<b>240</b>
Válvula de seguridad	Fugas por desgaste	6	5	6	<b>180</b>
Quemador	Combustión irregular	7	4	5	<b>140</b>
Sensor de presión	Lectura errática	5	4	6	<b>120</b>
Empaques	Fugas en bridás	6	3	5	<b>90</b>

Se identificaron en la Tabla 6 seis fallas con su respectivo índice de prioridad de riesgo (IPR), de las cuales tres presentan valores superiores a 200: incrustaciones internas en serpentines (IPR = 252), vibraciones anormales en la bomba de alimentación (IPR = 240) y fugas por desgaste en válvulas de seguridad (IPR = 180).

**Figura 3.** Histograma de Prioridad de Riesgos



Se obtuvo una disponibilidad técnica proyectada del 98,9 %, lo cual valida la efectividad estimada del plan de mantenimiento preventivo diseñado. Tal como se observa en la Figura 3, los serpentines y la bomba de alimentación concentran los mayores niveles de criticidad operativa, lo que permite orientar la priorización de tareas preventivas y asignación de recursos técnicos. Esta visualización gráfica permite interpretar rápidamente el grado de riesgo asociado a cada componente, facilitando una toma de decisiones más efectiva dentro del plan de mantenimiento.

Se determina de forma estadística la proporción de riesgos con valores superiores a 200.

### 3.1. Diseño del plan de mantenimiento preventivo

#### a) Tareas preventivas

**Tabla 7.** Estrategia técnica de mantenimiento preventivo aplicada al generador de vapor

Tipo de tarea	Actividad	Justificación técnica	Frecuencia recomendada	Recursos requeridos
Programada	Limpieza interna de tubos y purgas de caldera	Evitar incrustaciones y pérdida de transferencia térmica	Mensual	Operario + kit de limpieza + agua tratada
Condicional	Verificación de alineación y vibraciones de la bomba de alimentación	Prevenir desgaste prematuro y cavitación	Cada 200 h de operación o si se detecta ruido/vibración	Técnico mecánico, herramientas de alineación
Programada	Inspección de válvulas de seguridad y calibración	Garantizar seguridad operacional	Trimestral	Técnico calderista, repuestos menores

Tipo de tarea	Actividad	Justificación técnica	Frecuencia recomendada	Recursos requeridos
Predictiva (incipiente)	Monitoreo de parámetros físico-químicos del agua (pH, dureza, conductividad)	Anticipar corrosión e incrustaciones	Semanal	Kit de análisis químico
Programada	Revisión de aislamiento térmico y sellos	Prevenir pérdidas de energía y condensación	Semestral	Personal de mantenimiento, material aislante
Programada	Revisión estructural externa (corrosión, fugas, integridad)	Mantener confiabilidad mecánica	Anual	Técnico mecánico + repuestos menores

### 3.2. Comparación antes vs después (proyección)

Antes: Se estima 5 paradas no programadas/año por fallas de incrustación, fugas y válvulas defectuosas.

Después: Con la implementación del plan, se proyecta reducir a 1–2 paradas/año.

#### a) Indicadores proyectados

Disponibilidad técnica: de 92 % (estimado) → 98,9 %.

MTBF: de 300 h → 720 h (estimado).

MTTR: de 24 h → 12 h (con stock de repuestos y protocolos definidos).

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente el impacto del plan de mantenimiento preventivo propuesto para el generador de vapor, se han establecido cuatro indicadores técnicos claves: frecuencia de paradas no programadas, disponibilidad técnica, MTBF (Mean Time Between Failures) y MTTR (Mean Time To Repair). La siguiente tabla resume la comparación antes y después de la implementación:

**Tabla 8.** Comparación de indicadores técnicos

Indicador	Antes	Después	Mejora Relativa (%)
Paradas no programadas (anual)	5	1.5	-70.0
Disponibilidad técnica (%)	92.0	98.9	+7.5
MTBF (h)	300	720	+140.0
MTTR (h)	24	12	-50.0

Reducción de paradas no programadas: Se proyecta una disminución de 5 a 1.5 paradas anuales, lo que representa una mejora del 70%, incrementando la continuidad operativa.

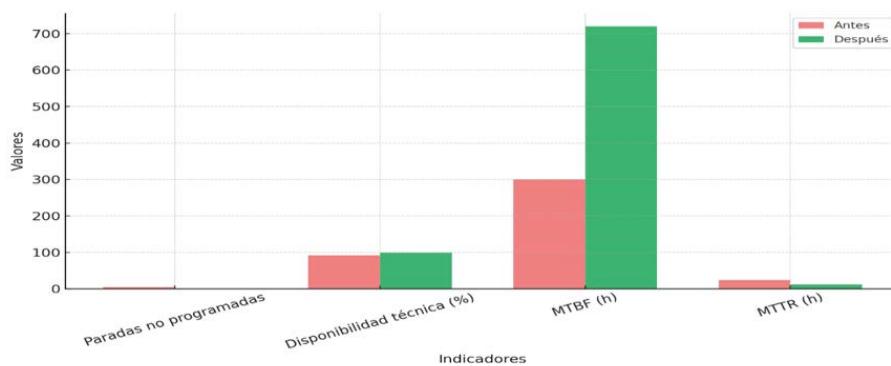
Aumento de disponibilidad técnica: Mejora del 92% al 98.9%, lo cual representa una optimización directa en la eficiencia del sistema.

Incremento del MTBF: El tiempo medio entre fallas pasó de 300 a 720 horas, evidenciando un sistema más confiable.

Reducción del MTTR: El tiempo promedio de reparación se redujo en un 50%, gracias a protocolos optimizados y disponibilidad de repuestos.

La siguiente Figura 4 presenta visualmente la mejora lograda en los indicadores antes y después del plan:

**Figura 4.** Comparación de indicadores Técnicos: Antes vs Después



Los resultados evidencian una mejora sustancial en la confiabilidad operativa del sistema, reflejada en el aumento del MTBF (Mean Time Between Failures), que pasó de 300 horas a 720 horas tras la ejecución del plan de mantenimiento preventivo. Este incremento del 140% indica una menor frecuencia de fallas críticas y un mayor tiempo operativo continuo del generador. Dicho comportamiento se visualiza en la Figura 4, donde se muestra gráficamente la comparación de indicadores técnicos antes y después de la intervención. Este incremento en el MTBF valida la efectividad del plan diseñado, fortaleciendo la estabilidad del sistema térmico y asegurando la continuidad de la operación industrial.

### b) Impacto económico estimado

Costo correctivo promedio anual: USD 4.500 (paradas + repuestos).

Costo preventivo anual: USD 2.000 (insumos + personal).

Ahorro estimado: USD 2.500 anuales ( $\approx$ 55 % de reducción en costos directos).

Beneficio adicional: reducción de horas de paro → mejora de producción en  $\approx$  8 %.

El diseño del plan de mantenimiento preventivo incluyó la definición de tareas programadas, condicionales y predictivas, con sus respectivas frecuencias y justificación técnica (Tabla 7.). Asimismo, se proyectó la reducción de fallas, paradas no programadas y costos de

mantenimiento, logrando un impacto económico favorable con un ahorro anual estimado del 55% respecto al mantenimiento correctivo. La disponibilidad técnica se incrementa de 92% a 98,9%, consolidando la eficiencia operativa del generador de vapor.

#### **4. DISCUSIÓN**

Este resultado valida la efectividad del plan de mantenimiento diseñado, en línea con la lógica técnica de reducir los modos de falla críticos mediante acciones preventivas focalizadas. La mejora en la disponibilidad técnica, junto con la reducción del MTTR y el incremento del MTBF, son indicativos claros de una gestión más eficiente del sistema generador de vapor. Estas son considerables para entornos operativos exigentes indicados para el cuarto de fermentación. Los valores del índice de prioridad de riesgo (IPR) obtenidos permiten definir la precedencia técnica de riesgo, que justifica la generación de tareas específicas de inspección y limpieza.

La proyección de una disponibilidad de 98.9%, basada en un Tiempo Medio entre Fallos (MTBF) estimado de 720 horas, es coherente con valores aceptados en el sector tabacalero para sistemas térmicos críticos. El Análisis Modal de Fallos y Efectos (FMEA) también provee de una buena herramienta a diseñadores, operadores y analistas de seguridad permitiéndoles discutir y trabajar sobre el mejoramiento del diseño y operación, así como establecer prioridades en las mejoras o acciones correctivas a introducir.

Una limitación del estudio fue la ausencia de datos históricos de fallas y registros de mantenimiento formalizados. Esta situación se explica por la reciente incorporación del equipo a las operaciones de la empresa. Sin embargo, el uso de criterios técnicos, diagnóstico preventivo y referencias de calderas de características similares permitió suplir esta carencia, generando un plan de mantenimiento preventivo coherente y aplicable. Para investigaciones futuras, se recomienda integrar datos provenientes de GMAO, bitácoras operativas y reportes de averías, con el fin de robustecer el análisis de fallas y transitar hacia modelos predictivos.

#### **5. CONCLUSIONES**

El estudio evidenció un incremento significativo en la disponibilidad técnica del generador de vapor tras la implementación del plan de mantenimiento propuesto. Inicialmente, se estimó una disponibilidad del 92%, asociada a frecuentes fallas por incrustaciones, fugas y deficiencias en

la válvula de seguridad. Sin embargo, con la ejecución del plan basado en el análisis modal de fallos (AMEF), la disponibilidad proyectada ascendió a un 98,9%, mejorando sustancialmente la continuidad operativa del sistema. Este aumento refleja una reducción directa en las paradas no programadas, pasando de 5 eventos anuales a un rango de 1 a 2 fallos/año, validando así la efectividad de la estrategia preventiva.

Los indicadores de rendimiento del mantenimiento presentaron mejoras significativas. El MTBF (tiempo medio entre fallos) se incrementó de 300 horas a 720 horas, lo que representa una mayor confiabilidad en la operación del equipo. A su vez, el MTTR (tiempo medio de reparación) disminuyó de 24 a 12 horas, debido a la incorporación de protocolos de mantenimiento predictivo, disponibilidad de repuestos y capacitación técnica. Esta combinación de indicadores evidencia un fortalecimiento del sistema de mantenimiento, permitiendo una mejor planificación de recursos y reduciendo los costos asociados a paradas prolongadas del generador.

A través de la aplicación del AMEF se identificaron los componentes más críticos del sistema, destacando los serpentines (IPR = 252) y la bomba de alimentación (IPR = 240) como los elementos con mayor riesgo potencial. Esta evaluación permitió jerarquizar las intervenciones y focalizar los recursos técnicos en las áreas de mayor impacto. La cuantificación del Índice de Prioridad de Riesgo (IPR) no solo orientó la toma de decisiones en el mantenimiento, sino que también sustentó técnicamente las proyecciones de mejora. Este enfoque metodológico proporciona una base sólida para futuras auditorías técnicas, auditorías de mantenimiento y mejora continua del sistema térmico.

**Contribución de los Autores (CRediT):** HDH: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Supervisión, Administración del proyecto, Redacción–borrador original, Revisión y edición. AAG: Curación de datos, Investigación, Validación. MAB: Metodología, Análisis formal, Validación, Visualización, Redacción–revisión y edición. WFA: Curación de datos, Investigación, Curación de datos, Visualización, Redacción–borrador original.

**Conflicto de Intereses:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en esta publicación.

## REFERENCIAS

- Bondarenko, S., Tkachuk, H., Klochan, I., Mokhnenko, A., Liganenko, I., & Martynenko, V. (2021). Modeling of economic security of the enterprise at change of investment maintenance [Review]. *Estudios de Economía Aplicada*, 39(7). <https://doi.org/10.25115/>

[eea.v39i7.5011](#)

- Castillo, R., & Llanos, A. (2021). Design and Implementation of a Materials Requirement Plan, a Preventive Maintenance Plan and Kardex in a Table Water Bottling Company to Reduce its Operational Cost. *Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development. Leveraging emerging technologies to construct the future: Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. Buenos Aires - Argentina. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.85>
- Cubas Rodríguez, J. C., & León León, R. A. (2024). Design proposal of a Maintenance Management System for the Company Metal Mechanic Empromec. *Memorias de la Vigésima Tercera Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática: CISCI 2024, pp. 190-197. International Institute of Informatics and Cybernetics*. <https://doi.org/10.54808/CISCI2024.01.190>
- González-López, D. A., & Mago-Ramos, M. G. (2024). Preventive maintenance plan for SKF Latin Trade SAS equipment [Article]. *DYNA (Colombia)*, 91(233), 28-34. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n233.112527>
- Herrera Vidal, G., & Herrera Vega, J. C. (2016). Methodology based on SCOR model applied to a maintenance services company [Article]. *Revista Venezolana de Gerencia*, 21(75), 549-571. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85010773898&partnerID=40&md5=d7b3d63aa56547b6873b8e94f627d52f>
- Miranda Pablos, F. M., & Navarro Arvizu, E. M. (2025). Strategic plan for a maintenance services company in southern Sonora, Mexico [Article]. *European Public and Social Innovation Review*, 10. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1888>
- Quiroz Sánchez, K., Reyes Quispe, A. R., & Pinedo Palacios, P. (2024). Influence of preventive maintenance over a metalworking company productivity. *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0. Hybrid Event*. San José, Costa Rica. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1012>
- Resta López, R., García Fayos, B., Sancho Fernández, M., & Arnal Arnal, J. M. (2019). Safety

and health study of the production and maintenance sections of a company dedicated to the treatment of metals. *Proceedings from the International Congress on Project Management and Engineering.*

Rodríguez Alza, M. A., la Torre Cueva, R. A., & Villanueva Guerrero, J. J. (2024). Proposal for Improving Maintenance Management to Reduce Operational Costs in a Timber Company. *Memorias de la Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética, CICIC.*

Santos Gonzales, C. E., Mendoza Ocaña, C. E., & Arqueros Mendocilla, G. J. (2024). Total productive maintenance to increase the availability of a fleet of buses of a transportation company, Trujillo 2024. *Memorias de la Vigésima Tercera Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática (CISCI 2024)*. <https://doi.org/10.54808/CISCI2024.01.82>