



Diagnóstico del estado actual de sistemas de agua en calderas de una Central Térmica

Diagnostic of the current status of water systems in boilers at the Thermal Power Plant

Kevin Andy Bodero Cadena¹ , Jorge M. Velepucha Sánchez¹ , Ángel Arteaga¹ ,
Pedro Antonio Rodríguez Ramos^{2*} , Alejandra García Toll² 

1. Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Posgrado. Manabí, Ecuador.

2. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento, CEIM. La Habana, Cuba.

* Autor de correspondencia: pedrojandro1952@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 10 de marzo de 2025

Aceptado: 1 de abril de 2025

Publicado: 8 de abril de 2025

Resumen

La calidad del agua alimentada a las calderas, en ocasiones, es crítica, por la presencia de impurezas que pueden generar incrustaciones, corrosión, ensuciamiento interno en los tubos, que, a su vez reduce la eficiencia térmica y puede causar fallos graves en el activo. El objetivo principal de este trabajo fue diagnosticar el estado actual de los sistemas de agua en las calderas de una Central Térmica. Los métodos utilizados fueron el Coeficiente de Competencia Experta, el Diagrama Causa-Efecto, la entrevista estructurada y su procesamiento, Alpha de Cronbach y el Método Delphi estadígrafo w de Kendall. El resultado más importante alcanzado fue el hallazgo de las 9 causas potenciales, y sus subcausas, que inciden en el deficiente estado actual, de los

sistemas de agua de las calderas de la central térmica que se investiga, así como el establecimiento de su criticidad. Finalmente, se efectuó la evaluación cualitativa del desempeño del sistema de agua de las calderas a través de los siguientes medidores: seguridad, vida útil, costo anual de mantenimiento, frecuencia de fallo, Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.

Palabras claves: central térmica, sistemas de agua en calderas, alpha de cronbach, método delphi estadígrafo w de Kendall, coeficiente de competencia experta, diagrama causa-efecto.

Abstract

The quality of the water fed to the boilers is sometimes critical, due to the presence of impurities that can generate scale, corrosion, internal fouling in the pipes, which, in turn, reduces thermal efficiency and can cause serious failures in the asset. Diagnosing the current state of the water systems in the boilers at the Thermal Power Plant was the main objective in this work. The methods used were the Expert Competence Coefficient, the Cause-Effect Diagram, the structured interview and its processing, Cronbach's Alpha and Kendall's w statistician Delphi Method. The most important result achieved was the finding of the 9 potential

causes and their sub-causes, which affect the current poor state in the boiler water systems of the thermal power plant under investigation, as well as the establishment of their criticality. Finally, a qualitative evaluation of the boiler water system performance was carried out using the following metrics: safety, service life, annual maintenance cost, failure frequency, reliability, maintainability, and availability.

Key words: thermal power plant, water systems in boilers, cronbach's alpha, kendall's w statistician delphi method, expert competence coefficient, cause-effect diagram.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Bodero Cadena KA, Velepucha Sánchez JM, Arteaga A, Rodríguez Ramos PA, García Toll A. Diagnóstico del estado actual de sistemas de agua en calderas de una Central Térmica. Ingeniería Mecánica. 2025;28:e708. <https://qoo.su/e3PML>

1. Introducción

Los sistemas de agua de calderas están sujetos a condiciones extremas de presión y temperatura, lo que provoca un desgaste considerable en sus componentes.

El problema radica en que los sistemas de agua de las calderas de las centrales de generación térmica que no funcionan eficientemente, por lo general es provocado por: costos de mantenimiento elevados, tanto preventivos como reactivos, falta de una estrategia de mantenimiento eficiente, fallos imprevistos en el sistema

de agua, que generan paradas no programadas, afectando la producción de energía y ocasionando pérdidas económicas significativas, degradación de la eficiencia operativa de las calderas, debido a la acumulación de incrustaciones, corrosión y otros problemas derivados de la mala gestión de la calidad del agua, subutilización de tecnologías predictivas que, podrían anticipar fallos y optimizar las intervenciones, que reducirían el tiempo de inactividad.

La importancia de la investigación realizada está en el propio diagnóstico efectuado, que, al precisar el estado actual, permitirá tomar las acciones se deben desencadenar para garantizar que se maximice la eficiencia, la rentabilidad, la seguridad y la vida útil del sistema de agua de calderas, de forma sostenible.

En la revisión bibliográfica efectuada (en estos últimos años), aparecen algunas acotaciones interesantes sobre el tema investigado, que se relacionan a continuación:

El diseño y optimización del sistema de alimentación de agua en calderas de unidades supercríticas es sumamente importante. Se propone un modelo cuantitativo de alta precisión utilizando métodos de identificación inteligente basados en datos históricos de operación, evitando las dificultades de modelado por perturbación en sistemas reales [1].

Las diferentes químicas del agua en centrales térmicas provocan serios problemas operativos. Se destaca la necesidad de monitorear la calidad del agua y el vapor mediante sistemas automatizados de control de procesos para mejorar la eficiencia y prevenir fallos [2].

Es necesario tener en cuenta el agua técnica utilizada en centrales térmicas, enfocándose en la formación de incrustaciones en intercambiadores de calor. Se analizan muestras de agua en diferentes etapas del tratamiento para determinar composiciones [3].

Los cálculos termo-hidráulicos del sistema de evaporador en una caldera de combustión pulverizada ultra-supercrítica de 1000 MW con doble recalentamiento es de gran importancia. Se analizan características térmicas e hidráulicas para mejorar el diseño y la eficiencia del sistema [4].

La evaluación del consumo de agua en el proceso de generación de electricidad en una central termoeléctrica, así como la generación de residuales líquidos, permite la propuesta de alternativas para la reducción del impacto ambiental, debido al vertimiento de las aguas residuales, aplicando el principio de producciones más limpias [5].

El enfoque basado en datos permite evaluar el rendimiento de un sistema de control de combustión en calderas. Se analiza la eficiencia del sistema y se proponen mejoras para optimizar el proceso de combustión en plantas térmicas [6].

El objetivo principal de este trabajo fue diagnosticar el estado actual de los sistemas de agua en las calderas de una Central Térmica. Los principales métodos utilizados fueron: el Coeficiente de Competencia Experta, el Diagrama Causa-Efecto, la entrevista estructurada y su procesamiento, Alpha de Cronbach y el Método Delphi estadígrafo w de Kendall. El resultado más importante alcanzado fue la definición de las 9 causas potenciales (y subcausas) que inciden en el deficiente estado actual, de los sistemas de agua de las calderas de la central térmica que se investiga, y la definición de su criticidad.

Finalmente, se efectuó la evaluación cualitativa del desempeño del sistema de agua de las calderas a través de los siguientes medidores: seguridad, vida útil, costo anual de mantenimiento, frecuencia de fallo, Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.

2. Métodos y Materiales

La investigación bibliográfica se realizó para encontrar los trabajos publicados con consideraciones sobre el sistema de alimentación de agua en calderas, esta indagación se realizó en diferentes bases de datos tales como: ScienceDirect, Scopus y SciELO.

La investigación de campo [7] se ejecutó visitando la central térmica para la recopilación de información mediante la entrevista, que fue aplicada a los expertos seleccionados para llevar a cabo las actividades planificadas.

El Método Analítico [8] se empleó mediante diversos análisis de los resultados de la entrevista que aportó información cualitativa, además de los resultados en general. Por otro lado, este método fue útil para analizar información en el marco teórico, lo que ayudó a descomponer temas y subtemas para establecer conexiones entre distintos aspectos del estudio, facilitando una comprensión más integral de los resultados obtenidos.

El Método Cualitativo [9] se aplicó en la recopilación de información de la entrevista realizando el análisis para los fines pertinente del investigador.

La calidad y confiabilidad de cualquier evaluación depende, en gran medida, de la cantidad y la competencia de los evaluadores (expertos). La cantidad de expertos (n) mínima necesaria para que los resultados se consideren validados se obtuvo mediante la ecuación (1).

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2} \quad (1)$$

Donde:

Z: valor asociado al nivel de confianza deseado, se utilizó un nivel de confianza del 95 %: 1,96.

p: estimación inicial de la proporción poblacional (probabilidad de éxito). Como no se tuvo una estimación previa, se aplicó 0,5, que es lo recomendado en estos casos.

e: margen de error deseado (la precisión con la que se quiere estimar la proporción), rango: 1 – 5 %, se asumió 2 %

La ecuación (1) corresponde a un enfoque estadístico, para modelar fenómenos inciertos, que sigue una distribución binomial (distribución de probabilidad discreta), para describir el número de éxitos en una secuencia de n ensayos independientes. Permite cuantificar la incertidumbre y calcular probabilidades exactas para distintos enarios [10].

La cantidad de expertos (n) mínima necesaria se obtuvo por cálculo, ecuación (1), resultó: 8,6 (9 expertos).

Conformación del equipo de trabajo (9 expertos): Analista en gestión, Técnico Mantenimiento Eléctrico, Ayudante Mecánico, Técnico Agua/Vapor, Supervisor Gestor Mantenimiento, Inspector revisor, Jefe Mantenimiento Mecánico, Gerente de Planta, Técnico Líder Operaciones. Los expertos seleccionados cumplieron el siguiente perfil: 1) ser o haber sido técnico o especialista en operación o mantenimiento de calderas; 2) experiencia laboral en la gestión de temas de agua mayor a dos años; 3) haber participado anteriormente en otros trabajos de investigación o de publicación en el área de sistemas de agua; 4) tener capacitación o experiencia formativa sistemática.

La característica más importante es la competencia del experto, por eso el método de selección de los expertos utilizado fue el Coeficiente de Competencia Experta (K), donde, por medio de la autoevaluación el experto expresa su conocimiento en relación con el tema en estudio, y los argumentos que sustentan ese conocimiento [11]. El coeficiente se calcula, para cada experto potencial, ecuación (2).

$$K = 0,50 \cdot (K_c + K_a) \quad (2)$$

Donde:

0,50: constante.

K_c: Coeficiente de Conocimiento o Información, que tiene el experto acerca del tema o problema planteado. Se calculó a partir de la valoración que realiza el experto en la escala del 0 al 10, donde 0 implica no poseer conocimiento y 10 un conocimiento total del tema, multiplicado por 0,10 (10,00 % el peso específico a cada uno).

K_a: Coeficiente de Argumentación o Fundamentación de los Criterios de los expertos. Se obtuvo atendiendo a seis posibles fuentes de argumentación en una escala predefinida considerando la fuente original, que es la Tabla Patrón de las Fuentes de Argumentación [11], y donde los valores de la escala permanecen ocultos. Se contemplaron adaptaciones a los ítems de los indicadores de la fuente de argumentación, en concordancia al tema investigado (los pesos específicos permanecen con los valores de las fuentes originales).

Se confeccionó un cuestionario, como herramienta clave del diagnóstico. Conformado por 15 preguntas abiertas de carácter cualitativas sobre el tema en estudio, que tributan a definir las causas potenciales que influyen en el estado actual de los sistemas de agua de las calderas. El cuestionario se aplicó a los 9 expertos seleccionados de manera presencial.

La consistencia interna o fiabilidad del cuestionario, fue evaluada a través del Coeficiente Alpha de Cronbach, ecuación (3), que permite evaluar si un instrumento cumple con los lineamientos establecidos en cuanto a materia metodológica y técnica. Este coeficiente es una medida estadística, expresada numéricamente, que evalúa la consistencia interna de un instrumento de medición, como cuestionarios o escalas, indicando qué tan bien se correlacionan entre sí los ítems que lo componen [12], confirma su confiabilidad (validez del grado en que el instrumento mide lo que debería medir).

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{S_t^2} \right] \quad (3)$$

Donde:

α: Coeficiente Alpha de Cronbach (%)

k: número de ítems.

S_i²: sumatoria de varianzas de los ítems.

S_t²: varianza de la suma de los ítems.

Para la obtención de la varianza de la suma de los ítems en el Coeficiente Alfa de Cronbach se utilizó la escala de Rensis Likert, [12], que califica la confiabilidad en categoría alta y muy alta a partir del valor de α => 0,80.

El valor obtenido, utilizando la ecuación (3) resultó: 0,8146 (para k = 15 y el cálculo de las varianzas: $\sum S_i^2 = 20,7787$ y $S_t^2 = 86,6944$). Este valor es superior a 0,80, lo que indica que, es un instrumento clasificado con rango de alta confiabilidad [12].

La herramienta Microsoft Office Excel [13] se utilizó para tabular los valores de casi todos los métodos aplicados, por lo tanto, se obtuvieron cuadros y gráficos, que fueron analizados con el fin de obtener información real sobre el estado actual de los sistemas de alimentación de agua en calderas.

Se aplicó el Método Delphi [14], en particular, la técnica del Coeficiente de Concordancia o estadígrafo w de Kendall, la ecuación (4) y la tabla 1, que es un método estadístico para determinar el consenso de los expertos.

Este estadígrafo posee un alto rigor estadístico matemático y es totalmente confiable, siempre que hayan 7 o más criterios. Permite estimar el grado de acuerdo en datos ordinales a partir del grado de varianza de los rangos obtenidos por los diferentes expertos. Ofrece un valor que tributa a decidir si las respuestas ofrecidas por los expertos están correlacionadas, es decir, si existe o no concordancia en las respuestas emitidas.

$$w = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})^2}{E^2 \cdot (C^3 - C)} \quad (4)$$

Donde:

E: número de expertos

C: número de criterios (componentes)

Se calculó $\chi^2_{\text{práctico}}$ (valor que se obtiene a partir de los datos reales utilizados para la solución del problema, de la matriz tabla 1), a través de la ecuación (5):

$$\chi^2_{\text{práctico}} = E \cdot (C - 1) \cdot w \quad (5)$$

Se determinó el $\chi^2_{\text{teórico}}$. Su valor se obtiene por la Tabla Estadística del Percentil de la Distribución χ^2 [15] con un nivel de significación α (o nivel de confianza, $nc = 1 - \alpha$) y $(C - 1)$ grados de libertad ($glc - 1$).

Se contrastó si: $\chi^2_{\text{práctico}} > \chi^2_{\text{teórico}}$, si esto ocurre, es que el método estadístico constata que hay consenso, por tanto, definir el orden de criticidad de los componentes, sobre la base de su correspondiente valor del peso específico, tabla 1 (fila ponderación, %) es confiable. La alternativa que obtiene mayor ponderación es la de mayor criticidad.

Tabla 1. Matriz del Método Delphi, estadígrafo w de Kendall: 7 componentes vs 9 expertos. Sin sesgo (ligas).

Fuente: autores

Componente Experto	Tubería	Bombas de alimentación	Válvulas de llenado CV	Caldera	Sistemas de monitoreo	Válvulas de apertura y cierre MV	Válvulas y juntas		
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7		
Calificación otorgada por los expertos a los componentes (máx. - 7; min.-1)									
E1	7	3	4	5	2	1	6		
E2	6	3	1	7	4	2	5		
E3	5	4	1	6	3	2	7		
E4	7	4	2	5	3	1	6		
E5	5	4	1	6	3	2	7		
E6	6	3	1	7	4	2	5		
E7	7	3	2	4	5	1	6		
E8	7	3	2	4	5	1	6		
E9	6	3	2	7	4	1	5		
Procesamiento de las calificaciones								Suma	Media
$\sum r_{ij}$	56	30	16	51	33	13	53	252	36
$\sum r_{ij} - r_{ij\text{media}}$	20	-6	-20	15	-3	-23	17		
$(\sum r_{ij} - r_{ij\text{media}})^2$	400	36	400	225	9	529	289	1888	
Ponderación (%)	22,22	11,90	6,35	20,24	13,10	5,16	21,03		

3. Resultados y Discusión

Mediante las respuestas al cuestionario los 9 expertos definieron 9 causas potenciales, a saber:

1. Uso ineficiente Mantenimiento Predictivo
2. Deficiente Mantenimiento Preventivo basado en el uso
3. Mal manejo de la gestión de repuestos
4. Falencias en el proceso de limpieza
5. Insuficiente capacitación y especialización del Capital Humano
6. Inadecuada externalización selectiva de servicios
7. Mala revisión y racionalización del diseño del sistema
8. Ausencia de evaluación del ciclo de vida de los equipos

9. Escaso Mantenimiento Colaborativo y mejora continua

Con la colaboración de los 9 expertos, y usando la Tormenta de Ideas, se puntualizaron las subcausas correspondientes a las 9 causas potenciales definidas anteriormente, con las cuales se confeccionaron:

- El Diagrama Causa-Efecto, figura 1, [16].
- La descripción de las subcausas del Diagrama Causa-Efecto, tabla 2

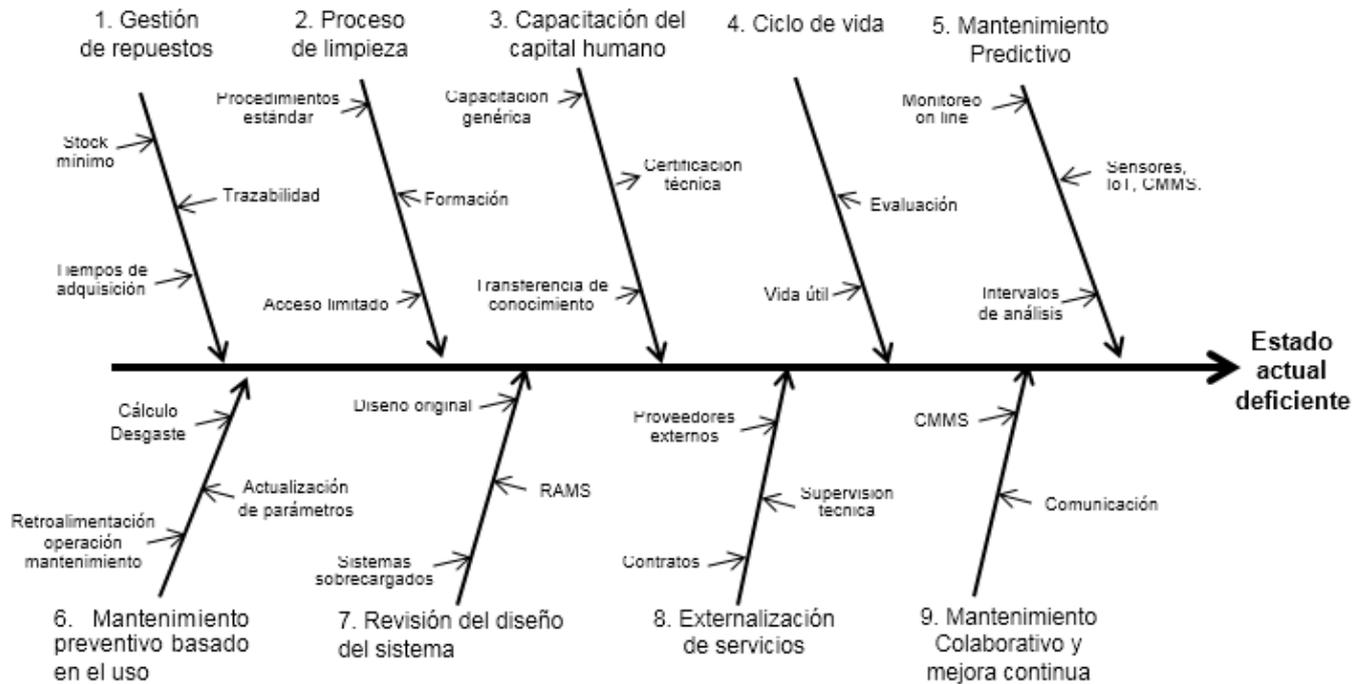


Fig. 1. Diagrama Causa-Efecto. Fuente: autores

Tabla 2. Descripción de las subcausas del Diagrama Causa-Efecto. Fuente: autores

Causa	Subcausas. Descripción
1. Gestión de repuestos	- Falta de análisis crítico del stock mínimo versus criticidad de equipos. - Tiempos largos de adquisición por proveedores no estratégicos. - Ausencia de trazabilidad de repuestos instalados (no se sabe vida útil real).
2. Proceso de limpieza	- Procedimientos estándar no adaptados a las condiciones reales: frecuencia, productos químicos. - Acceso limitado a zonas críticas por diseño inadecuado. - Formación insuficiente del personal en limpieza técnica específica.
3. Capacitación y especialización del CH	- Capacitación genérica y no específica al equipo crítico. - Escasa transferencia de conocimiento entre turnos y generaciones. - Falta de certificaciones técnicas actualizadas para soldadura y análisis vibracional.
4. Evaluación del ciclo de vida de los equipos	- No se evalúa, pues no se maneja este concepto en la práctica. - El principal elemento que se tiene en cuenta es la vida útil de los equipos.
5. Mantenimiento predictivo	- Uso ineficiente de tecnologías de monitoreo en tiempo real: vibraciones, ultrasonido y termografía. - Falta de integración entre sensores, IoT y Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador, GMAO, en inglés <i>Computerized Maintenance Management System</i> , CMMS. - Intervalos de análisis mal definidos o no actualizados (fallos no detectados a tiempo).
6. Mantenimiento preventivo basado en el uso	- Ausencia de modelos fiables para calcular desgaste por horas/uso real. - Falta de actualización de parámetros según condiciones operativas. - Escasa retroalimentación desde la operación hacia el plan de mantenimiento.
7. Revisión y racionalización del diseño del sistema	- Diseño original no actualizado tras modificaciones en operación. - Sistemas sobrecargados por integración de nuevos equipos sin redimensionamiento. - Ausencia de análisis RAMS (<i>Reliability, Availability, Maintainability Safety</i>) herramienta de ingeniería que evalúa fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de un sistema o equipo, posterior a su puesta en marcha.
8. Externalización selectiva de servicios	- Selección inadecuada de proveedores externos (criterios solo económicos). - Falta de supervisión técnica interna sobre el trabajo externalizado. - Contratos mal definidos en cuanto a tiempos de respuesta y calidad esperada.
9. Mantenimiento colaborativo y mejora continua	- CMMS no está al servicio del mantenimiento colaborativo. - Ausencia de herramientas adecuadas, para una comunicación óptima y eficaz entre todas las partes interesadas en el mantenimiento.

Con las 9 causas potenciales y los 9 componentes del sistema de agua de calderas se confeccionó la matriz cualitativa que se muestra en la tabla 3. La información contenida en la matriz surge de las entrevistas efectuadas a los expertos.

Tabla 3. Valoración del estado actual de los componentes del sistema de agua de calderas. Fuente: autores

Causa Componente	Mantenimiento Predictivo	Mantenimiento Preventivo basado en el uso	Gestión de repuestos	Proceso de limpieza	Capacitación y especialización del CH	Externalización selectiva de servicios	Revisión y racionalización del diseño del sistema	Evaluación del ciclo de vida de los equipos	Mantenimiento colaborativo y mejora continua
Caldera	R	B	R	R	R	M	R	R	M
Tuberías	B	B	R	R	M	M	M	M	M
Bombas de alimentación	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Válvulas y juntas	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Superficies de intercambio de calor	B	B	B	B	B	R	B	B	R
Sistemas de monitoreo	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Válvulas de control de llenado CV	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Válvulas de apertura y cierre MV	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Trampas de vapor	M	M	M	M	M	M	M	M	M

Observación: M – mal, R - regular, B - bien

Análisis de la tabla 3

- Caldera (2M / 6R / 1B), resumen: estado regular. Necesita atención preventiva para evitar degradación a estado crítico.
- Tuberías (5M / 2R / 2B), resumen: estado regular. Representan un alto riesgo operativo por posibles fugas o fallos estructurales.
- Bombas de alimentación (0M / 9R / 0B), resumen: estado regular. Funcionan adecuadamente, pero requieren mantenimiento preventivo para garantizar su estabilidad y evitar fallos.
- Válvulas y juntas (0M / 9R / 0B), resumen: estado regular. Desgaste progresivo que, de no atenderse, podría ocasionar fallos en la estanqueidad del sistema.
- Superficies de intercambio de calor (0M / 2R / 7B), resumen: estado bien. Aunque su estado es bien, 2 causas requieren seguimiento y mantenimiento para mantener su eficiencia.
- Sistemas de monitoreo (0M / 9R / 0B), resumen: estado regular. Los 9 elementos muestran desgaste o posibles deficiencias en el monitoreo. Es necesario revisar su precisión y funcionalidad.
- Válvulas de control de llenado CV (0M / 9R / 0B), resumen: estado regular. Los 9 elementos requieren ajustes preventivos debido al desgaste acumulado.
- Válvulas de apertura y cierre MV (0M / 9R / 0B), resumen: estado regular. Similar a las válvulas de control de llenado, necesitan revisión y mantenimiento preventivo
- Trampas de vapor (9M / 0R / 0B), resumen: estado mal. Están completamente deteriorados, generando pérdidas de energía y riesgo operativo significativo.

De acuerdo al análisis anterior se infiere lo siguiente:

- Superficies de intercambio de calor: estado bien (no necesita el análisis de criticidad).
- Trampas de vapor: estado mal, no necesita el análisis de criticidad, se deduce que es la prioridad 1).
- Como es manifiesto, del análisis de la tabla 3, se puede observar que 7 componentes del sistema de agua califican en condición regular. Se impone decidir donde se presenta la mayor criticidad, para lo cual se aplicó el Método Delphi estadígrafo w de Kendall, tabla 1:

Los resultados de la matriz, tabla 1, son:

$$w = 0,8325$$

$$\chi^2_{\text{práctico}} = 44,95$$

$\chi^2_{\text{teórico}} (0,99; 6)$, por la Tabla Estadística del Percentil de la Distribución $\chi^2 [15]$, se obtuvo que: $\chi^2 = 16,812$

Debido a que: $44,95 > 16,812$, implica que hay consenso.

Aceptada la hipótesis de que hay consenso, se admite el resultado de la matriz, en cuanto a la criticidad de los componentes, y de hecho su prioridad de atención. Según el valor de la ponderación (%), tabla 1, la criticidad queda establecida en el siguiente orden:

1. Tuberías
2. Válvulas y juntas
3. Caldera
4. Sistemas de monitoreo
5. Bombas de alimentación
6. Válvulas llenado CV
7. Válvulas de apertura y cierre MV

Por último, con la colaboración de los expertos, (técnica entrevista) se efectuó la valoración cualitativa de 7 medidores claves del desempeño del sistema de agua de calderas, en función de sus componentes, tabla 4.

Tabla 4. Valoración cualitativa de los medidores claves del desempeño. Fuente: autores

Componente \ Medidores claves	Seguridad	Vida útil	Costo Anual del Mantenimiento	Frecuencia de fallo	Confiabilidad	Mantenibilidad	Disponibilidad
1. Caldera	M	B	A	A	B	M	B
2. Tuberías	B	B	A	M	M	B	B
3. Bombas de alimentación	M	B	B	B	M	B	B
4. Válvulas y juntas	M	M	M	M	A	B	A
5. Superficies de intercambio de calor	M	M	A	B	M	B	B
6. Sistemas de monitoreo	B	M	A	A	M	A	A
7. Válvulas de control de llenado CV	M	M	A	A	M	M	M
8. Válvulas de apertura y cierre MV	M	M	A	M	M	A	M

Observación: B – bajo, M – medio, A - alto

Análisis de la tabla 4

- Seguridad (3B / 6M / 0A). Ningún componente tiene un nivel alto. Las tuberías, los sistemas de monitoreo y las trampas de vapor presentan un nivel bajo. Esto indica que, hay peligros inminentes, existen puntos críticos donde se deben reforzar las medidas preventivas e implementar inspecciones más frecuentes para evitar eventos que comprometan la integridad del sistema. Presentan riesgos moderados que deben ser gestionados con programas de Mantenimiento Preventivo más efectivos. Esto indica la necesidad de inspecciones regulares para garantizar el cumplimiento de estándares.
- Vida Útil (4B / 5M / 0A). Ningún componente tiene un nivel alto. Los resultados apuntan a un desgaste notable en varios de ellos, es evidente que el paso del tiempo y la intensidad del uso han reducido su rendimiento. Calderas, tuberías, bombas de alimentación y trampas de vapor, muestran claros signos de fatiga operativa, lo que sugiere la necesidad de renovar o actualizar algunos de estos activos. Hay que estar atentos, pues existen componentes que aún se encuentran en un nivel medio, pero requieren seguimiento para garantizar su operatividad a largo plazo.
- Costo Anual de Mantenimiento (1B / 1M / 7A). Los costos son altos para la mayoría de los componentes, lo que refleja problemas de confiabilidad y frecuencia de fallos. Esto refleja que existe una estrategia de Mantenimiento Reactivo. Este comportamiento podría explicarse por la alta frecuencia de intervenciones, la dificultad para conseguir repuestos o prácticas de mantenimiento poco eficientes. Es preocupante ver que incluso sistemas tan importantes como los de monitoreo y las válvulas CV presentan esta problemática.
- Frecuencia de Fallo (2B / 3M / 4A). La frecuencia de fallos es elevada en la mayoría de los componentes, por lo que hay que atenderlos sistemáticamente, pues afectan la confiabilidad y la disponibilidad del sistema. La frecuencia de fallos es elevada en varios componentes clave como la caldera, los sistemas de monitoreo, las válvulas CV y las trampas de vapor. Esta recurrencia en los fallos no solo incrementa los costos, sino que también afecta directamente la estabilidad del sistema general.
- Confiabilidad (2B / 6M / 1A). La confiabilidad general del sistema no es buena, algunos componentes muestran alto riesgo de fallos. Aunque algunos elementos, como las válvulas y juntas, se desempeñan bien, otros como la caldera y las trampas de vapor aún presentan bajos niveles de confianza operativa. Estos contrastes abren la puerta a intervenciones más focalizadas y a la aplicación de estrategias como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), que pueden ayudar a mejorar este indicador.
- Mantenibilidad (4B / 3M / 2A) La facilidad de mantenimiento no es buena, algunos componentes presentan dificultades para las tareas de mantenimiento. Mientras que ciertos componentes, como las

válvulas MV y los sistemas de monitoreo, muestran buena mantenibilidad, otros como las tuberías y la caldera enfrentan dificultades que obstaculizan las intervenciones. Esto sugiere que, además de las rutinas de mantenimiento, también deben considerarse aspectos de rediseño o mejoras en accesibilidad. Existen componentes que aún se encuentran en buenas condiciones, pero requieren seguimiento para garantizar su operatividad.

- Disponibilidad (5B / 2M / 2A). La disponibilidad general del sistema no es buena, hay componentes que requieren máxima atención. Muchos activos no están operando con la continuidad deseada. Este problema se vincula con los altos costos de mantenimiento y la alta frecuencia de fallos mencionados anteriormente. Pese a este panorama, algunos elementos, como las válvulas y juntas y los sistemas de monitoreo, obtienen evaluaciones altas, lo que demuestra que es posible alcanzar buenos resultados con una gestión más eficiente. Algunos componentes clave están en riesgo de afectar la operación global.

Conclusiones

El estado actual general de los sistemas de agua en calderas de la Central Térmica es deficiente, se afecta la eficiencia operativa, la rentabilidad, la seguridad, la vida útil y la sostenibilidad.

Para mejorar este estado, se deben realizar las siguientes acciones:

- Priorizar componentes críticos: superficies de intercambio de calor, tuberías, válvulas y juntas, calderas deben recibir atención inmediata mediante reemplazo o reparación;
- Perfeccionar estrategias de mantenimiento, implementando un enfoque mixto de Mantenimiento Preventivo y Predictivo para reducir costos y frecuencia de fallos;
- Mejorar monitoreo y diagnóstico ampliando el alcance de los sistemas de monitoreo para incluir análisis en tiempo real y diagnóstico de fallos;
- Y evaluar la modernización de equipos, analizando la posibilidad de actualizar los componentes obsoletos.

Referencias

- Du Z. Design and study of water supply system for supercritical unit boiler in thermal power station. AIP Conference Proceedings. 2018;1955(1). <https://doi.org/10.1063/1.5033609>
- Voronov VN, Petrova TI. Improvement of water chemistries and chemical monitoring at thermal power stations. Thermal Engineering. 2010;57(7):543-8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510070013>
- Kutum B, Ospanova D, Nussupbekov B, Oshanov Y. Research of process water of a thermal power plant. EEJET. 2023;2(6 (122)):53-61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276486>
- Wan L, Yang D, Zhou X, Dong L, Li J. Thermal-Hydraulic Calculation and Analysis on Evaporator System of a 1000 MW Ultra-Supercritical Pulverized Combustion Boiler with Double Reheat. Journal of Thermal Science. 2021;30(3):807-16. <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1322-2>
- Benítez Cortes I, Justiz Casas RL, Justiz Esquivei I, Prieto Montenegro LF, Barreto Torrella SI, Pérez Sánchez A. Uso Racional del Agua en Centrales Termoelectricas. Producción + Limpia. 2021;16:92-111. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n2a5>
- Li S, Wang Y. Performance Assessment of a Boiler Combustion Process Control System Based on a Data-Driven Approach. Processes. 2018;6(10):200. <https://doi.org/10.3390/pr6100200>
- Sandoval EA. El trabajo de campo en la investigación social en tiempos de pandemia. Espacio Abierto. Cuaderno Venezolano de Sociología. 2022;31(3):11-22.
- Zavaleta Juárez ME, Castillo Saavedra EF, La Cunza Méndez AD, Noriega Oblitas JM, Reyes Alfaro CE. Validación de un método analítico para la cuantificación de alcaloides totales. Revista Cubana de Medicina Militar. 24;53:1-16.
- Piña Ferrer LS. El enfoque cualitativo: Una alternativa compleja dentro del mundo de la investigación. Koinonía. 2023;8(15):1-3. <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i15.2440>
- Walpole RE, Myers RH, Myers SL, Keying Y. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 9na ed. México DF: Pearson Educación. 2012.
- Marín González F, Pérez González J, Senior Naveda A, García Guliany J. Validación del diseño de una red de cooperación científico-tecnológica utilizando el coeficiente K para la selección de expertos. Información tecnológica. 2021;32:79-88. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000200079>
- Rodríguez-Rodríguez, J., y Reguant-Álvarez, M. (2020). Calcular la fiabilidad de un cuestionario o escala mediante el SPSS: el coeficiente alfa de Cronbach. REIRE Revista d'Innovació i Recerca en Educació, 13(2),1-13. <https://doi.org/10.1344/reire2020.13.230048>
- Jáuregui Campos VS, Polar Cepeda JF, Diaz Centeno LV. Excel como estrategia de enseñanza-aprendizaje de los estados financieros en la especialidad de Contabilidad. Horizontes Revista de Investigación en Ciencias de la Educación. 2022 03/07;6(22):291-6.
- López Gómez E. El Método Delphi en la investigación actual en educación: una revisión teórica y metodológica. Educación XX1. 2017 11/02;21(1). <https://doi.org/10.5944/educxx1.20169>
- Navidi W. Estadística para ingenieros y científicos. 2da edición. México DF: McGraw-Hill/Interamericana. 2006.
- Gutiérrez PH, de la Vara SR. Control estadístico de calidad y seis sigmas. 2da ed. México DF: McGraw-Hill. 2009.

Editor:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores**Kevin Andy Boder Cadena.**

Participó en el diseño de la investigación y en la revisión del estado del arte, diseño teórico y de investigación. Trabajó en la recolección y el procesamiento de los datos usados para el estudio. Realizó contribuciones en los cálculos, el análisis e interpretación de los datos, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del informe final.

Jorge M. Velepucha Sánchez.

Participó en la organización y ordenamiento, contribuyó con criterios, análisis y valoraciones para su mejora, también participó en la recopilación de datos e informaciones, en el diseño teórico y de investigación, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Ángel Arteaga.

Trabajó en la búsqueda y recopilación de información, realizó contribuciones en los cálculos, contribuyó con criterios, análisis y valoraciones, participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Pedro Antonio Rodríguez Ramos.

Realizó contribuciones en los cálculos, contribuyó con criterios, análisis y valoraciones, participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Alejandra García Toll.

Trabajó en la búsqueda y recopilación de información, para contribuir en la conformación y actualización de las referencias bibliográficas usadas en la investigación, en la organización y ordenamiento, contribuyó con criterios, análisis y valoraciones para su mejora, en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.