

Aplicación de pruebas no destructivas para la evaluación y diagnóstico de la integridad mecánica en caldera acuotubular

RESUMEN: La filosofía de integridad mecánica está enfocada a asegurar que los equipos críticos de una empresa sean diseñados, fabricados, instalados, operados, mantenidos y desechados bajo ciertos lineamientos o parámetros para evitar fallos, daños ambientales, daños al personal y minimizar los gastos económicos en la gestión de estos.

Es por esta razón que esta investigación propone desarrollar un diagnóstico y evaluación de la condición mecánica actual de una caldera de tipo acuotubular, esto mediante la aplicación de mantenimiento predictivo, específicamente con la implementación de pruebas no destructivas a todos los componentes que la conforman, lo cual coadyuve a determinar (con base a los resultados obtenidos) las acciones necesarias con respecto a su mantenimiento u operación.

Los resultados obtenidos refieren que no existen signos de deterioro crítico que pudiesen poner en riesgo la seguridad del personal o del proceso en el que está involucrado, es decir, no fueron detectados defectos o fallos potenciales mediante las técnicas aplicadas.

Por último, se concluye que la caldera en cuestión puede continuar en operación siempre y cuando se respeten las condiciones de diseño y operación para la que fue fabricada.

PALABRAS CLAVE: condición mecánica, diagnóstico, equipos críticos, fallos potenciales, mantenimiento predictivo, seguridad industrial.



Colaboración

Mario Alberto Alva Mahé; Yodaira Borroto Pentón
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Aramis Alfonso Llanes; Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba, David Reyes González, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 17 de noviembre de 2022

Fecha de aceptación: 21 de diciembre de 2022

ABSTRACT: The mechanical integrity philosophy is focused on ensuring that the critical equipment of a company is designed, manufactured, installed, operated, maintained, and disposed of under certain guidelines or parameters to avoid failures, environmental damage, and damage to personnel and minimize economic costs in their management.

It is for this reason that this research proposes to develop a diagnosis and evaluation of the current mechanical condition of a water-tube type boiler, through the application of predictive maintenance, specifically with the implementation of non-destructive tests to all the components that make it up, which helps to determine (based on the results obtained) the necessary actions regarding its maintenance or operation.

The results obtained indicate that there are no signs of critical deterioration that could jeopardize the safety of personnel or the process in which it is involved, i.e., no defects or potential failures were detected by means of the techniques applied.

Finally, it is concluded that the boiler in question can continue in operation as long as the design and operating conditions for which it was manufactured are respected.

KEYWORDS: mechanical condition, diagnosis, critical equipment, potential failures, predictive maintenance, industrial safety.

INTRODUCCIÓN

La generación de vapor a escala industrial cuenta con más de 200 años de historia. El primer siglo se caracteriza exclusivamente por calderas comparables con las actuales calderas pirotubulares cuya característica principal reside en que en el interior de los tubos se trasladan los gases de la combustión, años más tarde comenzó la fabricación de las calderas acuotubulares, las

cuales en el interior de sus tubos contienen el agua que se va a producir en vapor [1].

Las calderas acuotubulares han evolucionado desde la alimentación de pequeños trenes de vapor y motores de vapor fijos, hasta convertirse en la fuerza motriz de procesos altamente exigentes con capacidad para ofrecer potencias muy significativas, por lo que en la actualidad este tipo de equipos son fundamentales en medianas y grandes empresas. Es por esta razón que estos equipos se consideran críticos [2].

Con base a lo mencionado con anterioridad es importante señalar que se debe optar por estrategias de mantenimiento que sean las adecuadas para el correcto funcionamiento de estas. Un fallo o algún evento inesperado que provoque el paro de estos equipos puede provocar un paro total de producción provocando pérdidas mayores que pudiesen haber sido evitadas.

Es por esta razón que hoy en día sobresale la necesidad de invertir en su mantenimiento del tipo predictivo, el cual se basa en servicios de seguimiento estudiando los síntomas de falla para predecir la ocurrencia de las mismas, midiendo y analizando los cambios en las variables estudiadas, lo cual proporcione la información necesaria para determinar aquellas acciones futuras de mantenimiento teniendo en cuenta su condición actual [3].



Figura 1. Metodología general para la implementación del Mantenimiento Predictivo.

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 1 que se presenta a continuación se ejemplifica el procedimiento o metodología general en la aplicación del mantenimiento predictivo.

Unas de las herramientas de apoyo para este tipo de mantenimiento se conocen como pruebas no destruc-

tivas (PNDs) cuya función principal es la identificación y caracterización de daños o defectos en la superficie y el interior de los materiales sin dañar físicamente o químicamente el material que se está evaluando [4].

Dada la necesidad de una empresa nacional por conocer el estatus de una de sus calderas, el objetivo general de esta investigación es evaluar la integridad mecánica de una caldera acuotubular mediante la aplicación de pruebas no destructivas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La información expresada en este artículo se considera técnico, ya que permite demostrar resultados prácticos del área involucrada y a su vez, se describen las acciones, métodos o pruebas realizadas para la evaluación de la integridad mecánica de la caldera desde el punto de vista de su condición actual, posterior a estar en servicio a partir de su puesta en marcha.

Metodología

Para el cumplimiento del objetivo de la investigación, se determinaron las siguientes fases mostradas en la Figura 2.



Figura 2. Metodología para evaluar la condición mecánica de la caldera.

Fuente. Elaboración propia.

Fase 1: Caracterización de la caldera acuotubular

La caldera objeto de estudio pertenece al proceso de generación de electricidad propia de la planta, por lo que el vapor generado es enviado o trasladado a una turbina para hacer la conversión de la energía mecánica a eléctrica.

Antes de iniciar el diagnóstico del equipo es necesario conocer sus condiciones de diseño, en la Tabla 1 se muestran algunos parámetros de la misma.

A su vez es importante conocer el funcionamiento de cada uno de sus elementos, por lo que a continuación se presentan las características operativas de cada uno de ellos:

- **Tubería del Hogar:** Es aquella que se encuentra con la radiación directa de la flama producida por el quemador, es ahí donde se concentra la mayor transferencia de calor, provocando que el agua interna de los tubos cambie su fase de estado líquido a gaseoso (vapor saturado).

- **Tubería del sobrecalentador:** Tiene como finalidad aumentar la temperatura de salida del vapor superando su temperatura de saturación. De esta manera se obtiene un vapor sobrecalentado a alta temperatura con las condiciones óptimas para ser trasladado a la turbina.

- **Economizador:** Es un elemento que precalienta el agua antes de ingresar a la caldera, con la finalidad de obtener mayor eficiencia energética, en esta área se aprovechan los gases calientes de la combustión antes de salir a la atmósfera por la chimenea.

- **Domo superior:** Es el área en donde se concentra el vapor antes de ser enviado al proceso en el que se está involucrado.

- **Domo inferior:** Es el área en donde se van depositando todas las impurezas existentes en el agua de alimentación, en este elemento existe una válvula que sirve como purga para la salida de los mismos.

- **Accesorios extra:** Válvulas que permiten el paso de vapor, agua, combustible. Aislamiento externo de la caldera que permite evitar pérdidas de calor que afecte el rendimiento óptimo del equipo.

Tabla 1. Parámetros de la caldera acuotubular

Datos de diseño	
Marca	ZURN ENERGY, Mod. 23M
Año de Fabricación	1980
Presión de diseño	72 kg/cm ² (1025psi)
Presión de operación	63.3 kg/cm ² (900psi)
Espesor nominal de la tubería	4.77mm (0.188")
Diámetro de la tubería	50.8mm (2")
Espesor mínimo requerido en la tubería	2.3749mm (0.0935")
Material tubería	SA-178 Gr. A
Material domos	SA-515-70

Fuente: Documentación oficial del equipo.



Figura 3. Vista Frontal (lado quemador).

Fuente. Elaboración propia.

En la figura 3 se muestra una imagen de la vista frontal de la caldera.

Fase 2: Determinar alcance de inspección

Para determinar el alcance de inspección se efectuó una revisión tanto en campo como de la documentación disponible para identificar aquellas zonas y/o áreas críticas del equipo.

Con base a lo anterior se determinaron las siguientes acciones de inspección:

Tubería del Hogar: Inspección visual, medición de espesores con ultrasonido y réplicas metalográficas.

Tubería del sobrecalentador: Inspección visual, medición de espesores con ultrasonido y réplicas metalográficas.

Tubería del economizador: Inspección visual y medición de espesores con ultrasonido.

Domo superior: Inspección visual, medición de espesores con ultrasonido, réplicas metalográficas, partículas magnéticas en soldaduras y medición de durezas.

Domo inferior: Inspección visual, medición de espesores con ultrasonido, réplicas metalográficas, partículas magnéticas en soldaduras y medición de durezas.

Accesorios externos (válvulas, tuberías, aislamiento, etc.): Inspección visual.

Etapa 3: Aplicación de las pruebas no destructivas (PNDs)

La aplicación de las pruebas se realizó siguiendo los procedimientos técnicos de la empresa tomando en cuenta las consideraciones establecidas en el código de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y lo estipulado en la American Society For Nondestructive Testing (ASNT).

A continuación, se presentan los tipos de ensayos o análisis realizados:

Inspección visual: consiste en la detección de aquellos defectos que son visibles con el ojo humano, a su vez se pueden implementar dispositivos o herramientas para lograr ver en aquellas zonas que se encuentran inaccesibles, mediante esta técnica las indicaciones que pueden ser detectadas son: deformaciones, grietas, poros, desgaste, cavitación, decoloraciones, corrosión, etc., así como el control dimensional [5].

Medición de espesores por ultrasonido: se utiliza un equipo electrónico especializado que consiste en medir el tiempo que tarda una onda ultrasónica en entrar y salir de un objeto sólido.

El espesor de la tubería se determina midiendo el tiempo que la onda tarda en ir y regresar de un extremo al otro, teniendo en cuenta la velocidad de propagación del sonido dentro del material analizado [6].

La aplicación de este método permitió conocer si los espesores de la tubería se encuentran por encima de los mínimos establecidos en los cálculos de diseño.

Réplicas metalográficas: consisten en estudiar los posibles cambios en la microestructura de determinados componentes y materiales, es decir, determinar daños y defectos sufridos durante un proceso de fabricación o sometidos a un determinado servicio, sin necesidad de su destrucción [7].

Partículas magnéticas: se fundamenta en aplicar un campo magnético de la zona a ensayar, luego, la superficie se recubre con pequeñas partículas magnéticas se utiliza para detectar grietas en la superficie de materiales ferromagnéticos [8].

Medición de durezas: radican en determinar en qué condición se encuentra el material ensayado respecto a la resistencia a la deformación permanente original y así evaluar si el material en cuestión aun continua con las propiedades mecánicas adecuadas para seguir en operación o trabajo [9].

RESULTADOS

De acuerdo con los ensayos o técnicas aplicadas a cada uno de los componentes del equipo, los resultados son los siguientes:

Visualmente no se detectaron zonas con corrosión, erosión, fracturas, ampollas, deformaciones o depósitos adheridos en pared interna de la tubería y domos Figura 4.

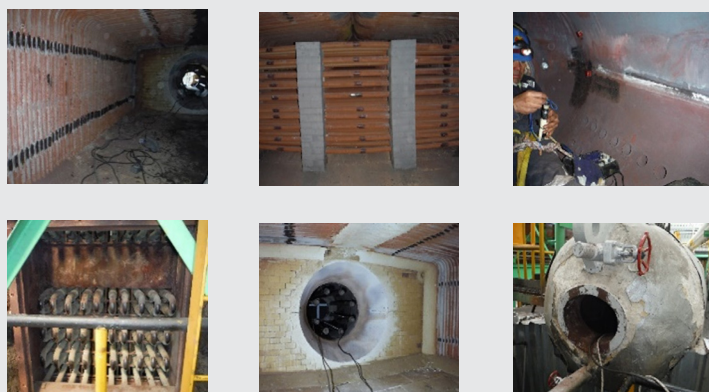


Figura 4: Componentes evaluados.
Fuente. Elaboración propia.

Por su parte para aceptar o rechazar los resultados de la aplicación de partículas magnéticas, el código ASME establece que cualquier indicación lineal mayor a 1.5mm (1/16") se considera relevante y por consiguiente debe ser rechazada, sin embargo, durante esta inspección no fue-

ron detectadas indicaciones lineales relevantes de ningún tamaño.

Los ensayos metalográficos de la tubería se muestran en la Figura 5, cuyos resultados indican que su estado actual aún se considera aceptables, es decir, no se aprecian crecimiento de granos críticos o precipitación de carburos a límite de grado, lo cual provocaría una disminución considerable a las propiedades mecánicas de la tubería.



Figura 5: Microestructura Tubería (SA-178 Gr. A).
Fuente. Elaboración propia.

Así mismo en la Figura 6 se muestra la composición microestructural de los domos, en el cual se observa una estructura típica de perlita en matriz ferrítica en una condición aún aceptable.



Figura 6: Microestructura Domos (SA-515-70).
Fuente. Elaboración propia.

Los ensayos de dureza indican que la resistencia a la tracción o a la deformación permanente aún son aceptables tanto en la tubería como en domos Tabla 2.

Por último, en la Tabla 3 se muestra un resumen de los resultados en la medición de espesores.

Tabla 2. Resultados medición de durezas.

Comparación de resistencias a la tracción	
Resistencia a la tracción original	Resistencia a la tracción mínimo detectado
Tubería: 325MPa (47ksi)	290 (42ksi)
Domos: 620MPa (90ksi)	580 (84ksi)

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de espesores.

Comparación de espesores	
Espesor mínimo requerido	Espesor mínimo detectado durante la inspección
2.3749mm (0.0935")	2.8956 (0.114")

Fuente. Elaboración propia.

Con base a lo anterior se puede establecer que los espesores detectados son superiores que los espesores de mínimos requeridos por su diseño.

CONCLUSIONES

En general, la condición mecánica de los componentes y materiales que conforman la caldera objeto de estudio se consideran aceptables, lo anterior con respecto a los resultados obtenidos y los requerimientos estipulados en los códigos de diseño e inspección, aunado a la normativa nacional. Por lo que puede continuar en operación siempre y cuando se respeten los parámetros de trabajo establecidos por el fabricante de este equipo.

AGRADECIMIENTOS

Al programa de Maestría en Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México (TECNM), Campus Misantla, Veracruz y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante este periodo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Franz, "Comparativa de caldera pirotubular y caldera acuotubular," Gunzenhausen, Alemania, 2018. [Online]. Available: <https://xdoc.mx/documents/comparativa-de-caldera-pirotubular-y-caldera-acuotubular-5f45743db8771>

[2] "Calderas Acuotubulares," Babcock Wanson, 2014. [Online]. Available: <https://www.babcock-wanson.com/es/productos/calderas-de-vapor-industriales/calderas-acuotubulares/>.

[3] E. Dounce Villanueva, *Productividad en el mantenimiento industrial*, 1ra ed. Mexico, 2014.

[4] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, and P. A. Soni, "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 3690–3698, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.

[5] L. F. Buenaño Moyano, E. M. Castillo Cárdenas, B. A. Cuaical Angulo, and C. A. Padilla Padilla, "Ensayos no destructivos y rehabilitación de elevadores de vehículos ferroviarios," *Cienc. Digit.*, vol. 3, no. 1, pp. 283–302, 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v3i1.295.

[6] E. Villarreal, E. A. Celedón, C. A. Buendía, and L. A. García, "Medidor De Espesores Para Materiales Metálicos Usando Ultrasonido," *Umbral científico*, vol. 14, pp. 130–142, 2009, [Online]. Available: www.redalyc.org/articulo.oa?id=30415059012.

[7] C. & I. SCI, "Replicas Metalograficas," 2022. <https://scisa.es/replicas-metalograficas/>.

[8] "Nondestructive inspection and structural health monitoring of aerospace materials," *Introd. to Aerosp. Mater.*, pp. 534–557, 2012, doi: 10.1533/9780857095152.534.

[9] M. Ortiz Domínguez, "¿Como se mide la dureza de un material?," *Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo*, pp. 1–6, 2022. [Online]. Available: <https://www.uaeh.edu.mx/divulgacion-ciencia/dureza-material/index.html>.