

Aplicación de la Termografía en la inspección y el diagnóstico de paredes de generadores de vapor bkz-340-140/29m

Application of Thermography on the inspection and diagnostic of steam generator walls type BKZ-340-140/29M.

M.Sc. Michael Pérez-Pérez¹, Dr.C. Francisco Martínez-Pérez¹, Tec. Hilario Reyes-Pacheco^{II}, Ing. Michel Hernández-Hernández^{II}

¹Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (ISPJAE), CUJAE, Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento (CEIM), Marianao, La Habana, Cuba.

^{II}Central Termoeléctrica “Máximo Gómez”, Mariel, Artemisa, Cuba.

RESUMEN. El uso de la Termografía, en la inspección y el diagnóstico de equipos, han mostrado un gran desarrollo en los últimos años, por la influencia directa en la identificación de fallas relacionadas a pérdidas energéticas. El presente trabajo se centra en la aplicación de la Termografía en la inspección y el diagnóstico de una pared de un generador de vapor modelo BKZ-340-140/29M, con el objetivo de identificar un comportamiento térmico de su estado, tanto de condición normal como de condición de falla. Como resultados significativos se identificaron zonas de fallas de interés, su interrelación con valores de temperatura encontrados, haciéndose un estudio estadístico de estas relaciones y obteniéndose la existencia de correlación entre las mismas. Además se realizaron un grupo de consideraciones técnicas acerca del estado de la pared, corroborado posteriormente con una inspección interna visual en el generador.

PALABRAS CLAVE: falla, pérdidas energéticas, comportamiento térmico.

ABSTRACT. The use of thermography is developed in this work for the inspection and diagnostic of a steam generator wall type BKZ-340-140/29M, to identify its thermal condition in normal condition and in failure. As important results were identified failure zones and their relation with the thermal values measured, a statistic study of these relations was developed, and a correlation between them was obtained. Besides, there were done technical considerations about the condition of the wall that were confirmed later.

KEYWORDS: fail, energy losses, thermal behavior.

INTRODUCCIÓN

La identificación de fallas en las paredes y el refractario de los generadores de vapor resulta una tarea fundamental en la planificación de las tareas de mantenimiento de dichos equipos, tanto en paradas de plantas programadas como en no programadas (Pérez y Reyes, 2012). Con la identificación de las fallas previo a las paradas se evitan pérdidas de tiempo en los mantenimientos, ya que con antelación se conoce una serie de información como ubicación y tamaño de deterioros en el material refractario de las paredes.

Existen evidencias del uso de la Termografía Infrarroja con fines de inspección en el aislamiento térmico de turbinas a vapor (Basit, 2011), del uso de esta misma técnica en la estimación de las pérdidas por transferencia de calor en las

paredes de generadores de vapor (Hurtado y González, 2011) y en la identificación de defectos en las mismas (Pérez y Hernández, 2012), así como en la estimación del espesor del material refractario en hornos de fundición de cobre (Vázquez y Castillo, 2004). En todos estos casos se carece de una explicación de los métodos utilizados para la extracción de información de los termogramas, elementos cruciales para el análisis termográfico.

La Termografía Infrarroja se presenta hoy como una de las tecnologías más utilizadas en la inspección, el diagnóstico y en el monitoreo de condición en general de las máquinas en la industria (Hurtado y González, 2011; López, 2007; Pérez y Duffus, 2013), capaz de brindar información muy útil de la

distribución de los campos de temperaturas de las superficies analizadas (Muñoz y Pencue, 2011; Olarte y Botero, 2011).

Por las características del basamento teórico que sustenta a esta técnica (Incropera & D'witt, 1999), resulta fundamental para su correcta explotación, como está definido en la norma ISO 18 434:2008 (ISO, 2008), el uso de patrones de comparación tanto de estados normales como anormales. Elementos estos a utilizar de referencia tanto en el método de Comparación Cua-

litativa como en el de Comparación Cuantitativa y en función de un programa de monitoreo de condición (ISO, 2003).

Con el interés de implementar esta técnica para en la inspección y el diagnóstico de las paredes de generadores de vapor modelos BKZ-340-140/29M, cuyas principales características tecnológicas se muestran en la Tabla 1 (Téllez, 2007), se procedió a identificar valores representativos de áreas en condición normal y áreas en condición de falla.

TABLA 1. Parámetros nominales del generador de vapor BKZ-340-140/29M

Descripción	Valor	U/M
Producción nominal de vapor	340	t/h
Presión nominal del vapor sobrecalentado	140	kg/cm ²
Temperatura nominal del vapor sobrecalentado	545	°C
Presión del vapor a la entrada del recalentador	29	kg/cm ²
Temperatura del vapor a la entrada del recalentador I	340	°C
Temperatura del vapor a la salida del recalentador II	545	°C
Flujo del vapor recalentado	303	t/h
Temperatura nominal del agua de alimentar	230	°C
Volumen del agua de la caldera	96.6	m ³
Temperatura de los gases de salida	162	°C

Las paredes de estos tipos de generadores de vapor están formadas, entre otros elementos, por una capa de material refractario y una capa de material termoaislante, y tienen como objetivo cumplimentar tres funciones fundamentales: (Oliva y Beatón, 1988).

- Garantizar la hermeticidad del horno y de los conductos de gases con el objetivo de disminuir considerablemente las infiltraciones de aire frío en los generadores de vapor con tiro balanceado. (Oliva y Beatón, 1988; Wilson, 1959).
- Garantizar el aislamiento térmico manteniendo las pérdidas de calor al medio ambiente dentro de los límites permisibles, lo cual equivale a un ahorro de combustible y en consecuencia, a la disminución de los gastos de explotación. Se considera permisible un valor de estas pérdidas entre 290 W/m² y 340 W/m², a una temperatura ambiente de 25 °C. (Oliva y Beatón, 1988; Wilson, 1959).
- Garantizar condiciones higiénico-sanitarias aceptables al personal de explotación y mantenimiento, para lo cual la temperatura de la superficie exterior del refractario no debe sobrepasar los 55 °C (Oliva y Beatón, 1988; Wilson, 1959).

Las mismas están sometidas a diferentes condiciones de trabajo, las cuales dependen fundamentalmente de las características constructivas del equipo y de la zona del generador de vapor donde esté situada (Guevara, 1996; Oliva y Beatón, 1988; Wilson, 1959).

Las paredes ubicadas en la zona convectiva, específicamente la parte interior a la altura del tercer paso del economizador del generador donde se centrará este estudio, tienen como características constructivas las mostradas en la Figura 3 (Guevara, 1996), aquí se puede apreciar la complejidad de la pared y el uso de variados materiales, cumpliendo estos materiales distintas funciones.

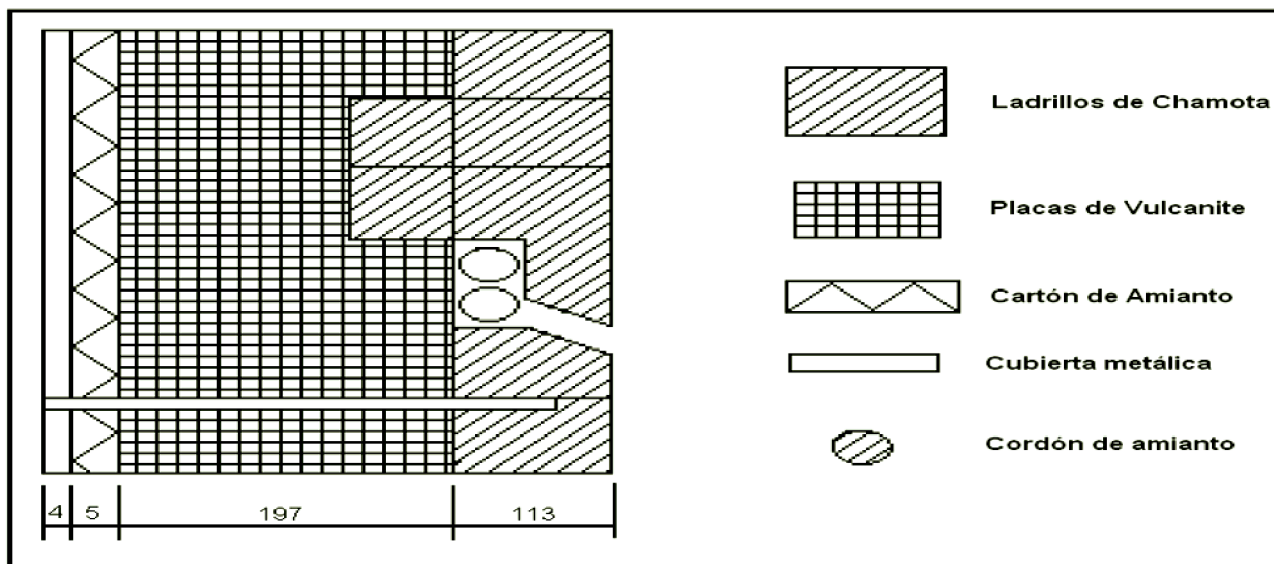


FIGURA 1. Esquema de montaje de las paredes trasera de la zona convectiva en la parte de los economizadores. Las dimensiones son en milímetros.

Producto de la propia explotación, se dan en las paredes determinados deterioros que van a afectar el cumplimiento de las funciones de las mismas, dos ejemplos de estos eventos se muestran en la Figura 2, son los casos del desprendimiento del material refractario y la separación del mismo.

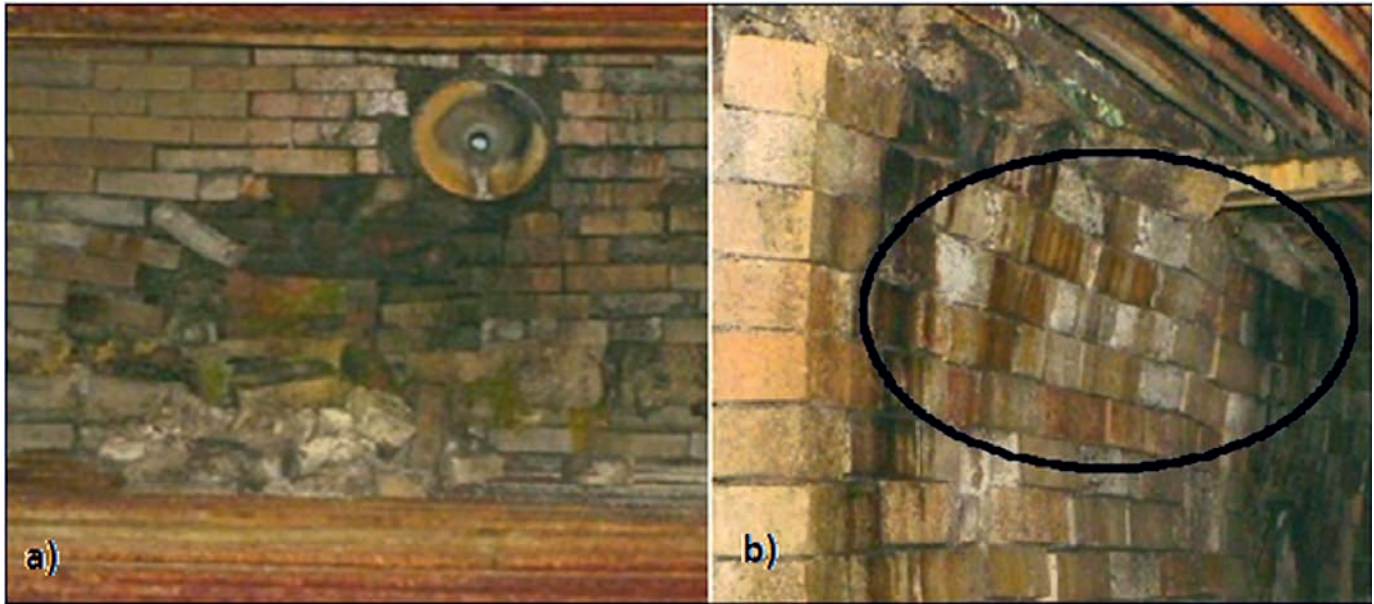


FIGURA 2. Deterioros en la zona convectiva. a) Caída del material refractario. b) Separación del material refractario.

MÉTODOS

La tecnología de Termografía Infrarroja utilizada, en la inspección y análisis de las mediciones, está compuesta por el instrumento de medición y el *software* para el procesamiento de las imágenes. El instrumento de medición lo constituye la cámara infrarroja portátil IR FlexCam® modelo Ti55 de la marca Fluke (Figura 3). Esta cámara tiene como características generales las mostradas en la Tabla 2.

TABLA 2. Características generales de la cámara termográfica

Parámetros	Característica
Detector	Microbolómetro de óxido de vanadio (VOX) sin refrigeración, y matriz de plano focal (FPA)
Resolución	320 x 240
Banda espectral	8 μm – 14 μm
Frecuencia de actualización	60 Hz
Sensibilidad térmica	$\leq 0,050$ °C a 30 °C (50 mK)
Precisión	± 2 °C o $\pm 2\%$
Peso	≈ 2 kg
Dimensiones	71 mm x 262 mm x 196 mm

El instrumento tiene la posibilidad de poder usar lentes distintas en dependencia de las necesidades. Por las características de las lentes que presenta la más apropiada para la medición de las paredes seleccionadas es la lente *gran angular* (10,5 mm, f 0,8, 42° H x 32° V), por la posibilidad que brinda de aumentar el campo de visión con respecto a las otras. También por el hecho de que las inspecciones se tienen que hacer a distancias relativamente cortas (3 o 4 m), debido al poco espacio que

hay disponible para ello. Con esta lente se podrá garantizar mayor área de inspección por termograma, permitiendo que no se generen muchas mediciones para cubrir las secciones de paredes de interés.



FIGURA 3. Cámara infrarroja portátil IR FlexCam®.

El *software* para el procesamiento y análisis de las mediciones es el SmartView 3.2, que permite la manipulación de determinados parámetros, brindando además herramientas de diversas características para el análisis.

Las mediciones se planificaron para que se realizaran cuando existían un grupo de condiciones que garantizaran que las mismas pudieran compararse entre sí. La Tabla 3 muestra un grupo de estas consideraciones tomadas para la realización de las mediciones además de algunos elementos presentes en la configuración de las mismas. Esto contribuyó a que la frecuencia de mediciones no respondiera a un valor fijo establecido, se logró un tiempo promedio entre mediciones entre 7 y 10 días.

TABLA 3. Consideraciones en las mediciones

Elemento	Observación
Emisividad	0,85
Temperatura Ambiente	30 °C- 40 °C
Banda espectral	8 μm – 14 μm
Lente	gran angular (42° H x 32° V)
Distancia de medición	4 m
Ángulo de medición	45 °
Horario de medición	9:00 am – 10:00 am
Carga de la unidad	≥75 MW
Viento	≤ 25 km/h

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se muestra una imagen termográfica representativa de las mediciones realizadas a esta pared, en la cual se ilustra un marcador que encierra una zona de aparente condición normal, relacionada con una zona identificada previamente como de condición normal. Obsérvese en esta figura además, el ajuste realizado en el rango de la escala de colores (entre 50 °C y 150 °C), quedando en color negro (por debajo del valor inferior del rango) los elementos identificados como no pertenecientes a la pared pero presentes en las mediciones como son escaleras, barandas, tuberías entre otros más.

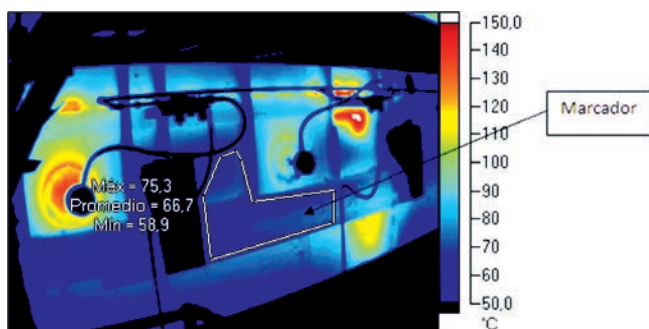


FIGURA 4. Identificación del marcador en la zona de aparente condición normal.

Los datos relacionados con este marcador, las temperaturas máxima y mínimas que encierran así como el promedio de las temperaturas de los puntos que encierra el marcador y la desviación estándar, para la secuencia de las mediciones efectuadas, se muestran en la Tabla 4. Esta información es brindada por el software de análisis.

En el termograma de la Figura 5 se destacó una alarma de color por encima del valor resultante de aplicar la expresión 1 (criterio de zona caliente), en este caso relacionado con la última medición del análisis, la temperatura para la alarma de color es de 73 °C.

En la imagen de la Figura 5, como en el resto de la secuencia de las mediciones, se pueden observar cuatro zonas de interés circuladas en rojo y marcadas con los números 1, 2, 3 y 4. La zonas 3 y 4 están relacionadas con las presencia de dos “cornetas” (elementos encargados de la limpieza periódica de los intercambiadores de calor) colocadas en esta pared, lo cual incide en el incremento de la temperatura, debido a la diferencia en el material aislante empleado para ellas. Las zonas 1 y 2,

se valoraron como defectos o deterioros ya que no tienen otra causa que justificase su presencia.

TABLA 4. Datos del marcador en la zona de condición normal

Mediciones	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura promedio (°C)	Desviación estándar (°C)
1	63,6	38,8	48	4,48
2	79,2	56,1	66,6	4,3
3	70,5	35,4	46,8	4,92
4	89,8	54,1	66,4	5,54
5	89,5	56,6	67,6	4,04
6	72,1	47,1	55,6	4,17
7	66	42,5	55,3	3,7
8	72,3	52,4	61,7	3,85
9	72,8	55,3	63	3,59
10	72	53,5	62,8	3,3
	74,78	48,7		

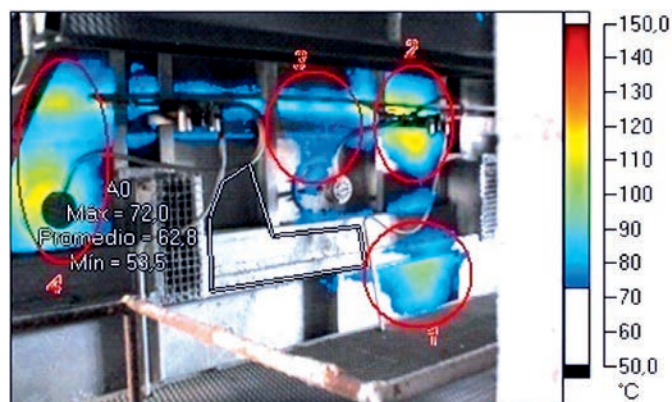


FIGURA 5. Termograma donde se ha aplicado el criterio de zona caliente.

En relación con las zonas que están asociadas con las cornetas (3 y 4) se puede apreciar significativa diferencia en cuanto a área y temperatura, donde la zona 4 muestra los mayores valores. Esto demuestra la posible influencia de la corneta en el deterioro del material aislante de la pared por encima de ella. La zonas 2 y 3 muestran una posible relación e influencia mutua y la zona 1 parece más aislada.

El análisis se centró en las zonas 1 y 2 por estar presuntamente asociadas a fallas en el material aislante y de las mismas se extrajeron los valores máximos de temperatura para analizar su evolución.

Como descriptores de las mediciones de esta pared se establecieron los siguientes: valores de temperatura mínima, promedio y máxima de la zona marcada como de condición normal (Tabla 4), T_1 para la zona caliente 1 y T_2 para la zona caliente 2. Los valores de estos descriptores se muestran en la Tabla 5.

En la Figura 6 se muestra graficado el comportamiento de las temperaturas máximas, mínimas y promedio, a lo largo de la secuencia de medición en la zona identificada como de condición normal, así como de la carga de la unidad. Como se puede apreciar existe la misma forma de variación para las tres temperaturas del área de interés, no siendo relacionada gráficamente esta variación con la variación de la carga durante las mediciones.

TABLA 5. Descriptores de las zonas de interés 1 y 2

Mediciones	T_{base} (°C)	Zona 1		Zona 2	
		T_{int} (°C)	$\Delta T1$ (°C)	T_{int} (°C)	$\Delta T2$ (°C)
1	48	85,8	37,8	119	71
2	66,6	122,9	56,3	153,2	86,6
3	46,8	82,7	35,9	124,5	77,7
4	66,4	114,4	48	151,8	85,4
5	67,6	114,9	47,3	154,8	87,2
6	55,6	85,9	30,3	112,5	56,9
7	55,3	97,6	42,3	129,8	74,5
8	61,7	111,2	49,5	136	74,3
9	63	100,1	37,1	134,6	71,6
10	62,8	102,9	40,1	136	73,2

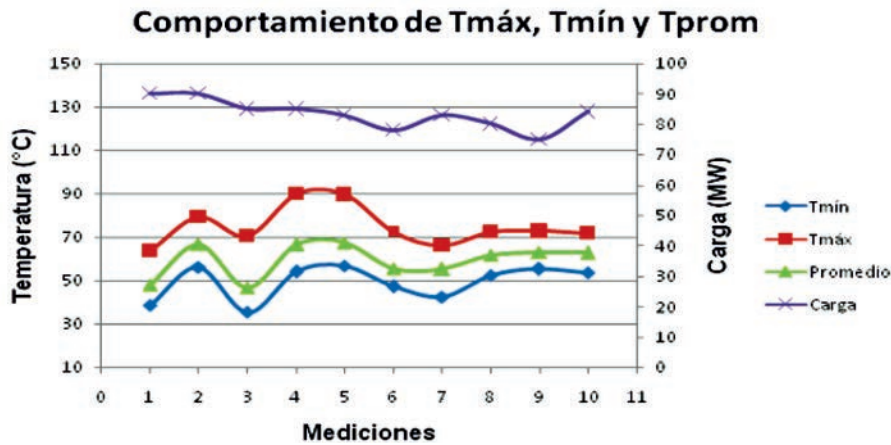


FIGURA 6. Comportamiento de las temperaturas de interés y la carga durante el período de medición.

Estadísticamente se evidenció correlación entre las tres temperaturas del área de interés para los datos obtenidos ($P < 0,05$), no siendo así entre dichas temperaturas y la carga de la unidad ($P > 0,05$). Este hecho resulta significativo dado que se puede desvincular el estado de las paredes con la carga de la unidad en la realización de las mediciones. El análisis de correlación se realizó con ayuda del *software* STATGRAPHICS Plus, versión 5.1, edición profesional para Windows.

En el gráfico de la Figura 7 se muestra el comportamiento de T_1 y T_2 , así como el de T_{prom} ya visto en la Figura 6 como temperatura promedio. Se puede apreciar la misma forma de variación aproximadamente para las tres curvas.

La prueba estadística de correlación entre T_1 y T_2 de las zonas 1 y 2 arroja la correlación existente entre dichas variables para el período de tiempo analizado ($P < 0,05$). Además se evidencia estadísticamente correlación entre los descriptores T_1 y T_2 y las temperaturas base y máximas que los definen.

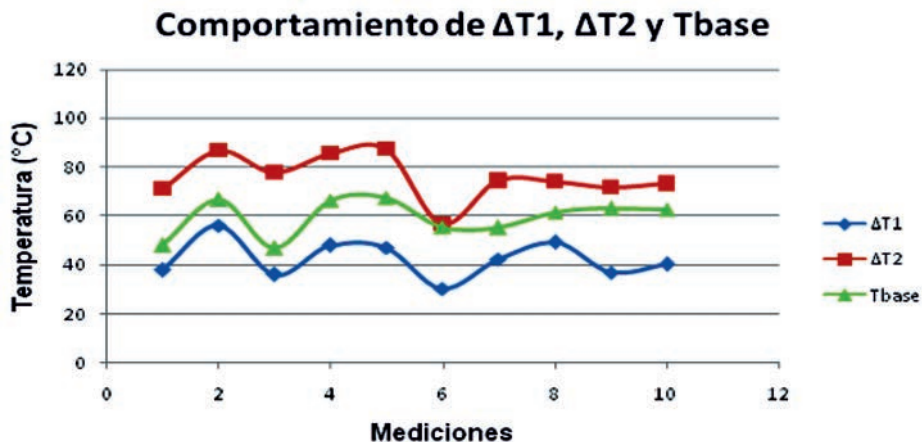


FIGURA 7. Comportamiento de los descriptores durante el período de medición.

A partir del análisis se elaboraron las siguientes conclusiones referentes al estado de la pared objeto de estudio:

Se identificó una zona de aparente normalidad cuyos valores promedio de cada medición, para las condiciones de medición establecidas, fueron como promedio 59,4 °C con una desviación estándar de 7,7 °C.

Se identificaron cuatro zonas calientes, bien definidas en todas las mediciones. De las cuales dos están asociadas a las cornetas y se puede considerar normal su presencia, hasta cierto punto, y las otras dos apuntan a deterioros de la pared imposibilitándola de cumplir su función de aislar térmicamente al generador de vapor.

Por las características mostradas durante el período de análisis se consideró el no crecimiento de los deterioros identificados.

Por las diferencias en cuanto a temperatura de las zonas de posibles deterioros, se puede inducir que la profundidad de dichas zonas no es la misma, teniendo mayor profundidad la zona 2, tal como puede ser apreciado en la Tabla 5.

Producto de una avería se detuvo la unidad, permitiendo de esta forma acceder al interior del generador de vapor en la parte

del eje convectivo y corroborar las conclusiones elaboradas sobre el estado de la pared en cuestión.

En la inspección visual realizada por el interior de esta pared, se pudo comprobar la existencia de las fallas correspondientes a la zona 1 (Figura 8a) y Figura 9) y a la zona 2 (Figura 8b) y Figura 9). Además se comprobó el correcto estado del resto de la pared en la cual se encontraba la zona marcada como de aparente normalidad, esta información se recoge en la Figura 9 donde se muestra una imagen del interior de esta pared.

Se pudo constatar que las fallas son de tamaño pequeño en comparación con otras observadas históricamente en el generador, esto está dado producto del poco tiempo de explotación, después del mantenimiento. Este hecho se considera significativo ya que destaca la sensibilidad de la Termografía para detectar tempranamente las fallas en estas paredes. Dado que se evidenciaron desde la primera medición surgió una interrogante, y fue la de si estos defectos tuvieron su inicio en un mal trabajo de mantenimiento o si surgieron en el período entre la puesta en marcha de la unidad y la primera medición. Interrogante a la cual no se le pudo dar respuesta según la información que se tenía. Aspecto que aún puede ser profundizado en trabajos posteriores.

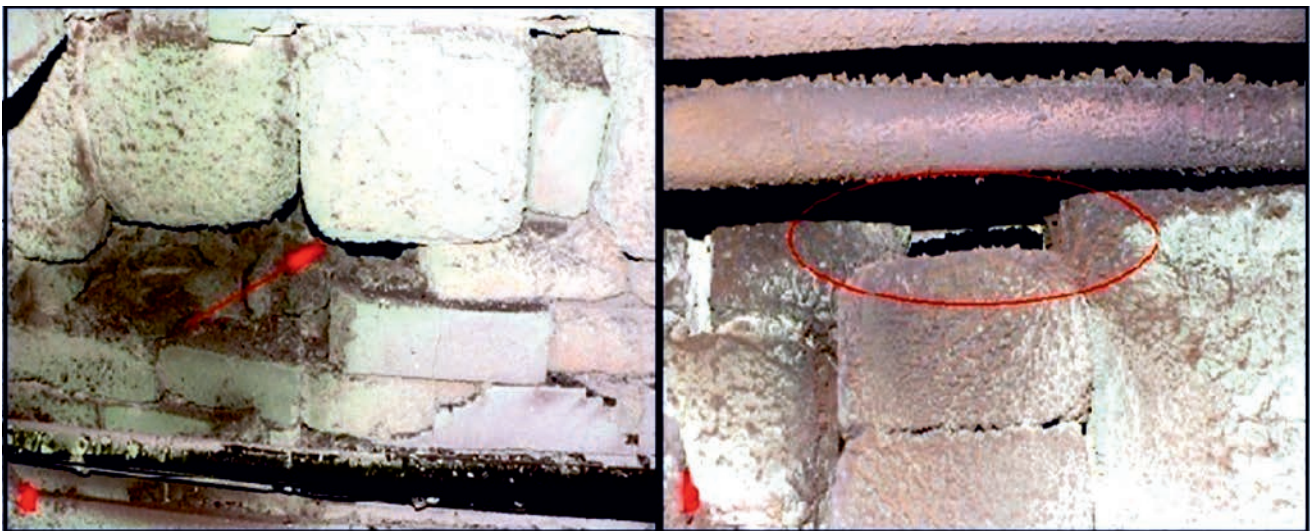


FIGURA 8. Fallas encontradas en la inspección visual interna. a) deterioro zona 1. b) deterioro zona 2.

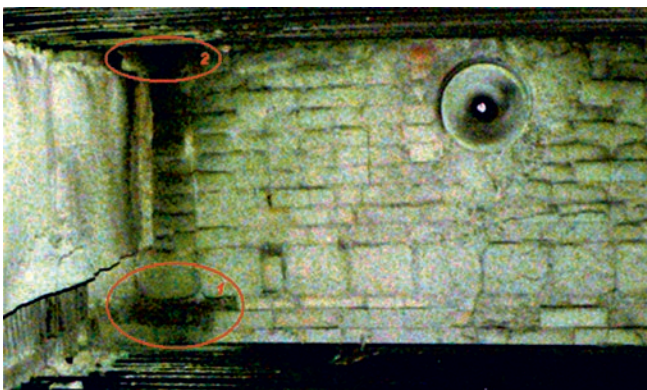


FIGURA 9. Interior de parte de la pared objeto de estudio.

La hipótesis de que las fallas pudieran presentar distintas profundidades, en función de la temperatura, se pudo compro-

bar, dado que el deterioro relacionado con la zona 1 llegaba hasta donde comienzan las placas de vulcanite y el de la zona 2 se adentraba en estas.

CONCLUSIONES

Como resultados destacados se pueden resumir los siguientes:

- Se determinó un comportamiento térmico durante las mediciones para la zona de condición normal de la pared interior del convectivo a la altura del tercer paso del economizador, definidas por las temperaturas máximas, mínimas y promedio, cuyos valores promedio son 74,8 °C, 48,7 °C y 59,4 °C respectivamente.
- En los datos obtenidos a lo largo de las mediciones en la pared interior del convectivo a la altura del tercer paso del economizador, se evidenció la relación estadística de

las temperaturas que definen el comportamiento térmico de la zona de condición normal (temperatura máxima, promedio y mínima); sin embargo no se muestra correlación estadística entre la carga de la unidad y dicho

comportamiento térmico.

- Durante la aplicación se evidenció la alta sensibilidad de la Termografía Infrarroja en la identificación de fallas en las paredes de los generadores de vapor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASIT, A. *Implementation of Infrared Thermography in Power Utilities Sudan [en línea]*, Disponible en: <http://www.ndt.net/article/afndt2008/papers/tahir.pdf> [Consulta: abril 4 2011].
- GUEVARA, L. *Catálogo de revestimiento de los bloques de 100 MW*. Editado por INEL, La Habana, Cuba, 1996.
- HURTADO, M.; GONZÁLEZ, J.: *Análisis Termográfico de pérdidas de calor en aislamiento de calderas*. Colombia: [en línea], Disponible en: http://objetos.univalle.edu.co/files/Analisis_termografico_de_perdidas_de_calor_en_aislamiento_de_calderas.pdf [Consulta: febrero 24 2011].
- IAEA. *Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants*, IAEA, 175pp., ISBN 92-0-103907-7, IAEA-TECDOC, Vienna, 2007.
- INCROPERA, F. y D'WITT, D.: *Fundamentals of heat and mass transfer*, 912pp., 4ta ed. Prentice Hall, ISBN 0-471-30460-3, México DF, 1999.
- ISO: *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques. ISO 13379:2003 (E)*. Switzerland: ISO, Vig. 2003.
- ISO: *Condition monitoring and diagnostics of machines-Thermography. Part 1: General procedures. ISO 18434-1:2008 (E)*. Switzerland: ISO, Vig. 2008.
- LOPEZ, S.: *Implantación de un Programa de Inspección de Termografía en Centrales de Ciclo Combinado. Tutor: Plaza Pérez, L. Trabajo de Diploma, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Universidad Pontificia Comillas Madrid [en línea] 2007.*, Disponible en: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/466e379adde8a.pdf>
- MUÑOZ-POTOSÍ, A.; PENCUE-FIERRO, L.: "Análisis Termográficos para la Determinación de Puntos Críticos en Equipos Mecánicos y Eléctricos.". *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. 2009, vol. 7, n° 1, p. 1-5. [en línea], Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=90312171013> [Consulta: septiembre 20 2011].
- OLARTE, W.; BOTERO, M.: "Técnicas de Mantenimiento Predictivo Utilizadas en la Industria". *Scientia Et Technica*. 2010, vol. XVI, n° 45, p. 223-226. [Consultado el: 20 de septiembre 2011]. ISSN 0122-1701. [en línea], Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=84917249041> [Consulta: septiembre 20 2011].
- OLIVA, L.; BEATÓN, P.: *Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor*, Ediciones ISPIAM, 292pp., Santiago de Cuba, 1988.
- PÉREZ-ZAPICO, E.; DUFFUS-SCOTT, A.: "Observación y cuantificación de defectos en soldaduras a través del procesamiento digital de imágenes termográficas", ISSN 1815-5944, *Ingeniería Mecánica*, 16(3): 246-256, 2013.
- PÉREZ, M.; HERNÁNDEZ, J.: La Termografía como herramienta para reducir los tiempos de reparación de las paredes de los generadores de vapor. En: XXXIII Convención Panamericana de Ingenierías (UPADI), ISBN 978-959-247-094-1, La Habana, Cuba, 2012.
- PÉREZ, M.; REYEZ, H.: Experiencias en el diagnóstico termográfico de paredes de generadores de vapor BKZ-340-140-29/M. En: 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, ISBN 978-959-261-405-5, La Habana, Cuba, 2012.
- TÉLLEZ, M.: *Propuesta para mejorar la Confiabilidad Operacional en la Central Termoelectrica "Máximo Gómez". Mariel. Tutor: Sánchez Rodríguez, Á. Tesis en opción al título de Master en Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana [en línea] 2007*, Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Maestria/Maestria140.pdf>
- VÁZQUEZ, C.; CASTILLO, R.: Estudio de la correlación entre las termografías y espesor de revestimientos refractarios en hornos y convertidores de cobre de la fundición y refinería ENAMI, Ventanas. En: Congreso de Metalurgia y Materiales CONAMET/SAM, ISBN 987-22443-0-8, Chile, 2004.
- WILSON, A. C.: *Industrial Thermal Insulation*, 274pp., ISBN 59-9996, New York, 1959.

Recibido: 13 de julio de 2013.

Aprobado: 22 de julio de 2014.

Michael Pérez-Pérez, Prof. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (ISPJAE), CUJAE, Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento (CEIM), Marianao, La Habana, Cuba, Correo electrónico: mperez@ceim.cujae.edu.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.