

27

Fecha de presentación: febrero, 2020

Fecha de aceptación: marzo, 2020

Fecha de publicación: mayo, 2021

PÉRDIDAS

POR RADIACIÓN EN GENERADORES DE VAPOR CON EL APOYO DE LA TÉCNICA TERMOGRÁFICA

RADIATION LOSSES IN STEAM BOILERS WITH THE SUPPORT OF THERMOGRAPHIC TECHNIQUE

Reinier Jiménez Borges¹

E-mail: rjborges@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3430-0322>

Luis Ángel Iturralde Carrera¹

E-mail: luisiturralde97@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5595-9329>

José Pedro Monteagudo Yanes¹

E-mail: jpmyanes@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7234-7853>

Yoisdell Castillo Alvarez²

E-mail: c19773@utp.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8105-6206>

¹ Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” Cuba.

² Universidad Tecnológica del Perú. Perú.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

AJiménez Borges, R., Iturralde Carrera, L. Á., Monteagudo Yanes, J. P., & Castillo Alvarez, Y. (2021). Pérdidas por radiación en generadores de vapor con el apoyo de la técnica termográfica. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(3), 262-270.

RESUMEN

En el trabajo se realiza un análisis termográfico con ayuda de la cámara térmica testo-875 desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo al generador de vapor pirotubular modelo CMS/C-660, y se particulariza en la dependencia que existe entre el rendimiento y la radiación que este equipo emite. Se realiza la revisión de la literatura y se seleccionan las diferentes expresiones para calcular las pérdidas por radiación (q_r) y su dependencia con el área superficial y la temperatura exterior de las paredes. Mediante el uso de la termografía se determinan las áreas con carencia de aislamiento en la superficie del generador, así como se cuantifican las áreas seleccionadas como críticas mediante la modelación en 2D a partir del software AutoCAD 2019. Fueron estimadas las pérdidas por radiación en cada una de las zonas críticas, donde la cuantificación de dicha pérdida reflejó deficiencias en el aislamiento térmico. Finalmente se determinó la cantidad de potencia irradiada al medio para cada una de las condiciones evaluadas, para el caso de las zonas críticas la potencia irradiada fue de 6 336 kJ/h mientras que para las zonas no-críticas 2 880 kJ/h, demostrándose el mal estado técnico en el generador de vapor.

Palabras clave: Generadores de vapor, radiación, mantenimiento, técnica termográfica.

ABSTRACT

In the work, a thermographic analysis is carried out with the help of the testo-875 thermal camera from the qualitative and quantitative point of view to the model CMS / C-660 fire-tube steam boiler, and is particularized in the dependence that exists between the performance and the radiation that this equipment emits. The literature review is carried out and the different expressions are selected to calculate the radiation losses (q_r) and their dependence on the surface area and the exterior temperature of the walls. Through the use of thermography, the areas with a lack of insulation on the surface of the boiler are determined, as well as the areas selected as critical are quantified by means of 2D modeling from AutoCAD 2019 software. Radiation losses were estimated in each one critical areas, where the quantification of said loss reflected deficiencies in thermal insulation. Finally, the amount of power irradiated to the medium was determined for each of the evaluated conditions, for the case of critical areas the irradiated power was 6 336 kJ / h while for non-critical areas 2 880 kJ / h, demonstrating the poor technical condition of the steam generator.

Keywords: Steam boilers, radiation, maintenance, thermographic technique.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia de un generador de vapor caracteriza la efectividad con que este equipo absorbe la energía liberada por el combustible para la generación de vapor. Durante la producción de vapor existen pérdidas energéticas que ocasionan que este rendimiento disminuya, importante son las pérdidas de calor sensible con los gases de salida (q_2) que en calderas del tipo pirotubulares bajo condiciones de cargas parciales oscilan entre un 8 a 30 % y en las del tipo acuotubular son del orden del 8 al 10%, por ello es que resulta importante bajo ciertas condiciones tener la temperatura de los gases lo más baja posible. Otro tanto sucede con la pérdida por radiación (q_5), a menudo existen zonas donde se alcanzan temperaturas elevadas debido a la falta de aislamiento térmico o a la insuficiencia de este, llegando a alcanzar valores de hasta un 5 % o superiores y menores del 2 % en calderas acuotubulares.

Durante el funcionamiento de los generadores de vapor, las superficies exteriores del horno y los conductos, los colectores, el domo, conductos de gases, tuberías, etc., alcanzan una temperatura superior a la ambiental. Este gradiente de temperatura genera una transferencia de calor al medio exterior que se efectúa por dos mecanismos fundamentales: convección y radiación, lo que representa una pérdida de calor, en ocasiones significativa, que afecta la eficiencia del generador de vapor. A este tipo de pérdidas generalmente se les denomina "pérdidas por radiación", y su magnitud depende fundamentalmente de las dimensiones de la unidad (capacidad nominal), carga y de la temperatura y velocidad del aire exterior (Lapido Rodríguez, et al., 2015).

Las pérdidas por radiación superficial y convección se pueden determinar indirectamente midiendo la temperatura superficial media del generador de vapor y la ambiental próxima a ella (0.5-1.5 m). La temperatura de la superficie, la temperatura ambiente y la velocidad del aire ambiente deben determinarse en un número suficiente de lugares para determinar valores medios representativos; normalmente oscila entre 0-5% de la energía de entrada del sistema.

La termografía infrarroja como método de mantenimiento predictivo, es un recurso importante en el diagnóstico de problemas y fallas de los equipos muy utilizados en grandes industrias (Xinrui & Memari, 2019; Bolum, et al., 2020). 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 de los generadores de vapor o calderas.

Respecto a los trabajos de supervisión y mantenimiento, la termografía ofrece mayor seguridad ya que permite medir temperaturas a distancia, conservando exactitud y sin tener contacto físico con los objetos a estudiar (Nardi, et al., 2018).

Como parte de las posibilidades que aporta esta técnica se presenta como objetivo principal de este trabajo la integración de ambos aspectos (cualitativos-cuantitativos) para poder determinar las zonas con problemas de aislamiento térmico en un generador de vapor y la cantidad de energía que se pierde en dichas zonas al medio ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la literatura Tanquero, et al., (1987); González (2007); y Çengel (2011), presentan diversas expresiones de cálculo para cuantificar la cantidad de calor que pasa al medio según los diferentes procesos de transferencia de calor. En todas existen diferentes variables para caracterizar los procesos de convección y radiación, sin embargo, existe un consenso común en la dependencia directa que existe entre el área, la temperatura superficial, y el valor de estas pérdidas.

Según Tanquero, et al. (1987), las pérdidas por radiación y convección al exterior se determinan mediante la ecuación 1:

$$q_5 = \frac{A}{B} \left\{ \alpha_c (t_p - t_{af}) + C_0 \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{af}}{100} \right)^4 \right] \right\}$$

Ecuación 1. Pérdidas por radiación y convección al exterior q_5 .

Donde F_{gv} : Área superficial (m^2), B: Flujo de combustible (kg/s), α_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección para gases ($W/m^2.K$), T_p : Temperatura superficial de las paredes (K), T_{af} : Temperatura ambiente (K), C_0 : Constante de Stefan Boltzmann ($W/m^2.K^4$)

Por otro lado González (2007), presenta para la determinación de la pérdida q_5 la ecuación 2:

$$q_5 = \frac{1000 * A}{B Q_d} (\alpha_c + \alpha_{rad}) (T_p - T_{af})$$

Ecuación 2. Pérdidas por radiación y convección al exterior q_5 .

Donde Q_d : Calor disponible (kJ/kg), α_{rad} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m^2K).

Para el caso de los gases el coeficiente de transferencia de calor por convección (α_c) se encuentra en el intervalo de 2-25 W/m² K (Çengel, 2011). La Constante de Stefan

$$\text{Boltzmann } C_0 = 5,97 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \text{ (Çengel, 2011)}$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación puede ser determinado mediante la ecuación 3

$$\alpha_{\text{rad}} = E * C_0 (T_p + T_{\text{af}})(T_p^2 + T_{\text{af}}^2)$$

Ecuación 3. Coeficiente de transferencia de calor por radiación (α_{rad}).

Donde E: Emisividad del material del generador de vapor E=0,91

La potencia irradiada en cada una de las zonas críticas se determina mediante la ecuación 4

$$P = \alpha_{\text{rad}} * A * (T_p - T_{\text{af}})$$

Ecuación 4. Potencia irradiada en cada una de las zonas críticas.

Existen métodos prácticos para la determinación de la magnitud de estas pérdidas, aunque las mismas podrían determinarse por las ecuaciones convencionales que describen los procesos de transferencia de calor, no obstante, es necesario para ello, la estimación de la temperatura superficial por lo que la medición directa de temperatura permite cuantificar más exacto dicho valor de pérdida. Existe además para la determinación de estas pérdidas fundamentalmente para generadores de mediana y alta capacidad, el método propuesto por la ("American Boiler Manufacturers Association", ABMA), donde se ha generalizado un nomograma para la estimación de estas pérdidas en función de la capacidad nominal, producción y características de los generadores de vapor. Para cálculos aproximados, González (2007), presenta para la determinación de la pérdida q_5 la ecuación 5, esta se basa en determinar la pérdida de calor por enfriamiento externo para la capacidad nominal de un generador de vapor.

$$q_5 = q_5^{\text{nom}} \left(\frac{D_{\text{nom}}}{D} \right) [\%]$$

Ecuación 5. Pérdida de calor por enfriamiento exterior (q_5).

Donde q_5^{nom} : Pérdida de calor por enfriamiento externo para capacidad nominal (%).

D_{nom} : capacidad nominal (kg/h), D: Flujo de vapor real (kg/h)

La termografía es un método de medición pasivo que se basa en el estudio de temperaturas de equipos sin necesidad de interrumpir el proceso productivo. Es una técnica relativamente moderna, que se fundamenta en la Ley de Stefan Boltzmann, donde se utiliza la radiación emitida por los cuerpos por estar a temperaturas mayores al cero absoluto, como variable relacionada con la temperatura (Sen & Al-Habaibeh, 2019). Diversas han sido las aplicaciones de esta técnica, la cual por ser no invasiva ha encontrado aplicaciones en los campos de la medicina (Hamlym Jones, et al., 2002), en el análisis de circuitos, como herramienta para el control predictivo (Olarte, et al., 2011) y para diagnosticar temperaturas en paredes de los generadores de vapor (Pérez, et al., 2014).

La tabla 1 presenta las características técnicas de la cámara termográfica modelo testo 875 utilizada para las mediciones de temperatura exterior del generador de vapor.

Tabla 1. Características técnicas de la cámara termográfica modelo testo 875.

Medición	Valores
Rango	-30 a +100 °C / 0 a +350 °C
Exactitud	±2 °C, ±2 % del valor medido
Medición de alta temperatura - opcional	+350 ... +550 °C
Exactitud	±3 % del v.m. a +350 ... +550 °C
Emisividad / temperatura reflejada	0.01 ... 1 / manual
Temperatura funcionamiento	-15 ... +40 °C
Temperatura almacenamiento	-30 ... +60 °C
Humedad del aire	20 a 80 % HR sin condensación
Peso	900 g

Para el procesamiento de las imágenes termográficas se utilizó el Software IRISoft. Este permite el manejo de las imágenes a una escala visual con un alto contenido en la calidad de las representaciones, permitiendo también ajustes en la emisividad del material. Con él se pueden ajustar también parámetros en la temperatura reflejada, temperatura ambiente, así como posibilitar perfiles completos de temperatura en una zona a analizar. La temperatura promedio en una zona determinada, el punto más frío o caliente, así como la superposición de la imagen real con la imagen termográfica.

El caso de estudio corresponde a un generador de vapor del tipo pirotubular CMS/C-660 (Figura 1), fabricado en el año 2008. Las características técnicas de este equipo se ofrecen en la tabla 2.

Tabla 2. Principales características técnicas del generador de vapor pirotubular CMS-660.

Características	Parámetros
Modelo	CMS/C-660
Producción de vapor nominal	660 kg/h
Volumen de agua	1,90 m ³
Superficie de calefacción	19,6 m ²
Presión de diseño	980,6 kPa
Peso de la caldera seca	3,66 t
Peso de la caldera en operación	5,56 t



Figura 1. Caldera pirotubular modelo CMS/C-660.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el estudio se determinaron a partir de imágenes termográficas, las zonas críticas en la caldera, estas presentaban valores altos de temperaturas donde se evidencia claramente falta de aislamiento térmico.

Las mediciones en el lateral de la caldera fueron efectuadas en tres puntos (T1, T2, T3) situados en ambos laterales de la misma (Figura 2a). Para el caso de las regiones posterior y frontal de la caldera (Figura 2b) se consideraron en la primera seis puntos de mediciones (T1...T6), y para el caso de la zona frontal cuatro puntos de mediciones (T1...T4). La tabla 3 ofrece los valores medidos en el generador de vapor, así como la temperatura media en la superficie exterior.

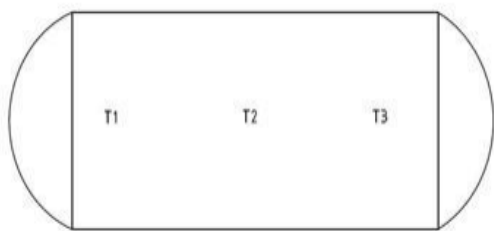


Figura 2 a). Puntos de mediciones en Lateral izquierdo y derecho del generador de vapor

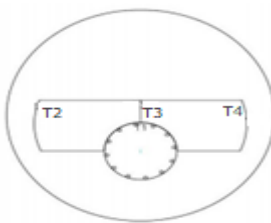


Figura 2 b). Puntos de mediciones en la Región frontal y posterior de la caldera



Tabla 3. Temperaturas medidas en los laterales, zona frontal y posterior del generador de vapor modelo CMS/C-660.

Puntos	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C
Lateral izquierdo	57	42	40			
Lateral derecho	40,9	46,6	38,8			

Temperatura promedio de la superficie total	44,21 °C					
Zona Posterior	161	161	138	90	189	171
Temperatura promedio de la superficie total	151,67 °C					
Zona Frontal	186	160	175	160		
Temperatura promedio de la superficie total	170,25 °C					

Las temperaturas medidas, ponen de manifiesto que los laterales del generador de vapor presentan de manera general una buena situación en el aislamiento térmico. Las temperaturas medidas en ambos laterales no sobrepasan los 60 °C, donde la temperatura promedio en las superficies laterales fue de 44,21 °C. Las zonas frontal y posterior fueron las zonas con mayores deficiencias detectadas. En la zona frontal se determinó como temperatura promedio 170,25 °C, fundamentalmente en pérdidas que están presente entre las tapas que recubren el haz de tubos de la caldera, mientras que en la zona posterior se alcanzan valores de 150,67 °C detectándose que no existe presencia de aislamiento térmico en la zona central de dicho equipo.

Las áreas críticas se definieron (Tabla 4) a partir del software AutoCAD 2019, el cual permitió la modelación en 2D de cada una de estas zonas y la obtención de las secciones de áreas con el propósito de cuantificar la pérdida de potencia irradiada al medio en ellas, así como las pérdidas por radiación y convección q_5 .

Tabla 4. Modelación de las áreas críticas en las zonas frontal y posterior del generador de vapor modelo CMS/C-660.

Denominaciones	Valores (Zona Frontal)	Valores (Zona Posterior 1)	Valores (Zona Posterior 2)
I_1 (mm ⁴)	283 618x10 ⁵	367 199 x10 ⁵	287 652 x10 ⁵
I_2 (mm ⁴)	39 197,3x10 ⁵	367 199 x10 ⁵	74 715,4 x10 ⁵
S_c (mm)	700	465	665
S_t (mm)	700	465	665
A (mm ²)	147 234,26	679 290,8	162 559,93

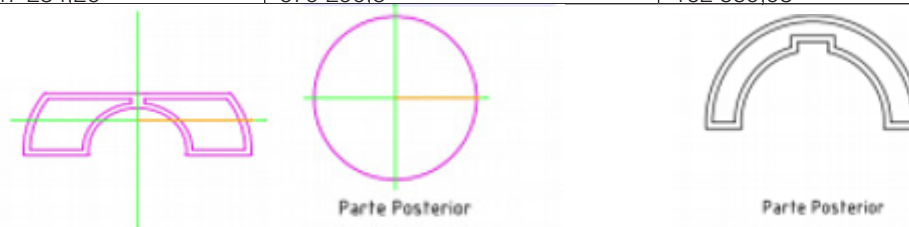


Figura 3. Determinación de las áreas de las zonas críticas en mm² a partir del software AutoCAD 2019.

Donde

I_1 , I_2 : Momento de inercia centroidal para las zonas críticas.

S_c , S_t : Posición centroidal para las superficies de las zonas críticas.

A: Área de la sección transversal de las zonas críticas evaluadas.

El área de la zona crítica frontal estimada mediante AutoCAD fue de 147 234,26 mm²(0,15 m²) (Figura 3) que representa un 8% de la superficie total frontal, y la correspondiente a la zona posterior 841 850,73 mm² (0,84 m²) (Figura 3).

El análisis termográfico se realizó a la caldera después de esta haber estabilizado su régimen de trabajo en la jornada matutina. En el estudio se realizaron las mediciones termográficas en la parte frontal donde se encuentra el quemador, la zona lateral y la parte posterior (figuras 4-6). En cada una de las imágenes se señala una zona crítica. Como criterio para seleccionar cada una de dichas zonas fue considerado que la región tuviera una diferencia superior a los 20°C relativo a la zona donde se visualiza una mejor distribución de temperatura. La figura 4 presenta la imagen real y termográfica del frente de la caldera y la zona crítica señalada en color rojo. De manera general la zona frontal presenta buen

aislamiento térmico (temperaturas inferiores a los 50 °C), excepto la zona crítica, donde los valores de temperatura exceden los 150 °C. Dicha zona crítica corresponde a los bordes que rodean las tapas del haz de tubos de la caldera, cuya inspección visual coincide con que en dicho lugar no existe aislamiento térmico.

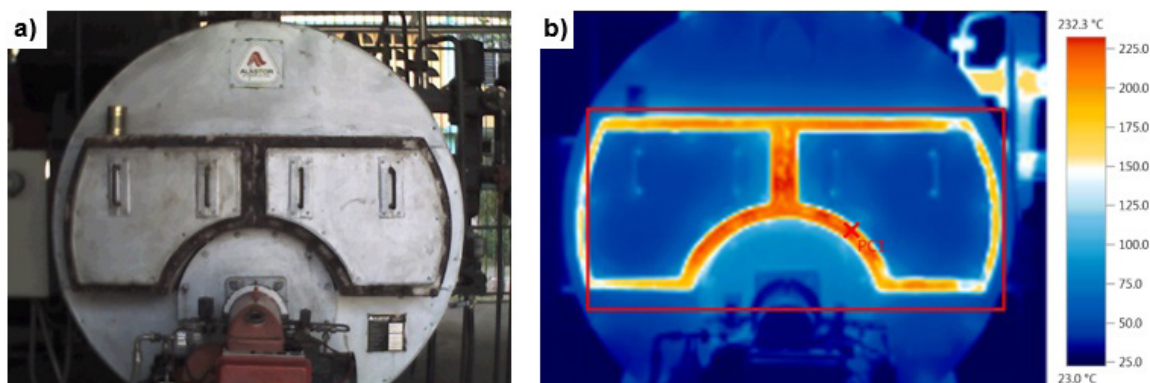


Figura 4. Vista frontal del generador de vapor. a) imagen real. b) imagen termográfica.

En la figura 5 se presenta la imagen tomada al lateral de la caldera, esta refleja imperfecciones en las uniones cuando fue colocado el material aislante y que permanecen hasta la fecha. Como se observa en cuatro zonas longitudinales de 0,05 m cada una de espesor alrededor de toda la superficie de la caldera se alcanzan temperaturas en torno a los 60 °C, dichas imperfecciones crean un área total de 1 m². Una distribución no homogénea de la temperatura en una gran área superficial con diferencias de hasta 25 °C es la característica fundamental obtenida con la termografía en este plano. Sin embargo, se observan valores superiores a 70 °C en una zona muy pequeña (parte superior derecha figura 5b) que corresponde a la argolla de levantamiento de la caldera que no es de interés para el estudio.

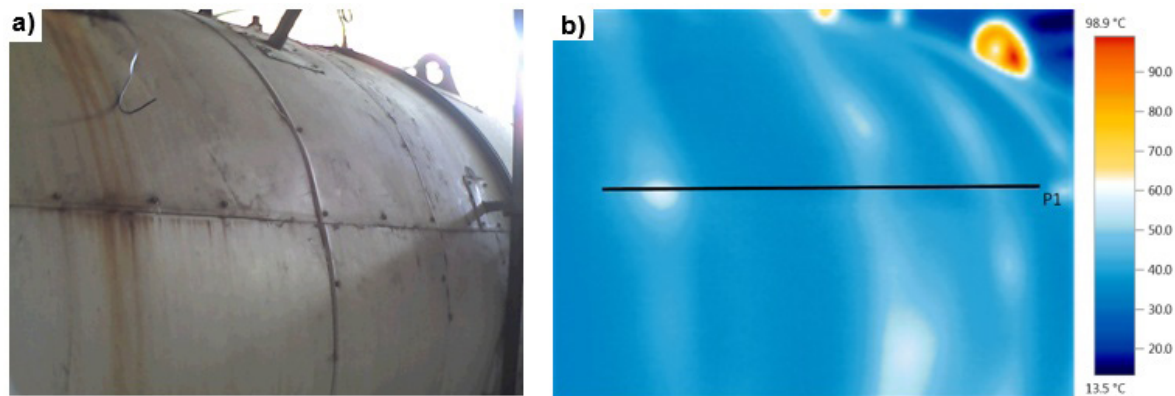


Figura 5. Vista lateral del generador de vapor. a) imagen real. b) imagen termográfica.

La imagen termográfica de la parte posterior (Figura 6) evidencia donde están las mayores pérdidas de calor por radiación y convección de la caldera en estudio. Con un área crítica que llega a alcanzar el 45% (0,84 m²) de la superficie total de la parte posterior y un valor promedio de temperatura en dicha zona alrededor de los 175 °C. Existe un valor tan alto de energía calorífica que hace prácticamente imposible el tacto en la superficie o hasta pasar muy cerca de ella. La figura 6 presenta la imagen real y térmica de la vista posterior del generador de vapor.

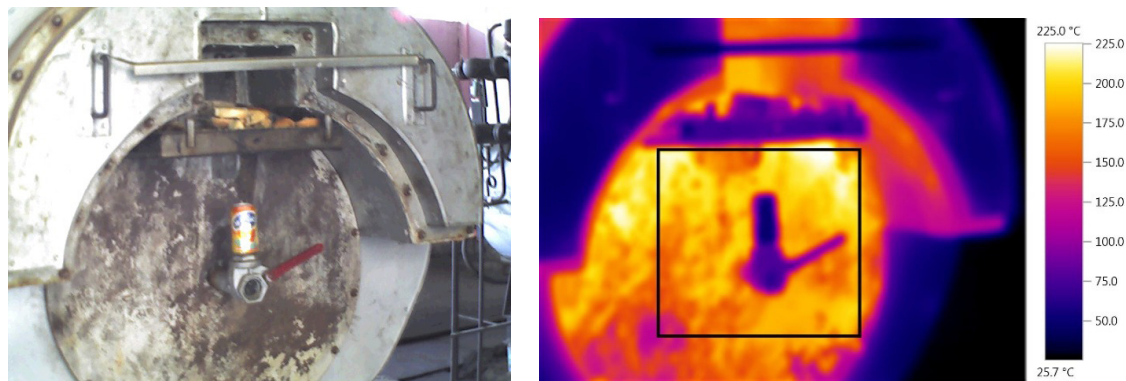


Figura 6. Vista posterior del generador de vapor. a) imagen real. b) imagen termográfica.

De acuerdo con las ecuaciones 1 y 4 se calcularon las pérdidas de calor por radiación y convección que se producen para cada una de las zonas señaladas como críticas, posteriormente se determinó la cantidad de potencia total irradiada al medio. La pérdida total q_5 se estimó como la suma algebraica del % de las pérdidas por radiación en cada una de las zonas. En la tabla 5 se resumen los principales valores obtenidos con el apoyo de la termografía en las zonas con deficiencias en el aislamiento.

Tabla 5. Pérdidas q_5 que se producen por las zonas críticas.

Método de cálculo	Zonas	% de pérdida por radiación	Total (%)	Potencia irradiada al medio (kW)	Potencia irradiada total (kJ/h)
(Tanquero, et al., 1987)	1	1,70	$q_5=14,7$	Región 1 = 0,2	6 336
	2	2,90		Región 2= 0,23	
	3	10,1		Región 3= 1,33	
(González, 2007)	1	1,65	$q_5=13,7$	Región 1 = 0,2	
	2	2,25		Región 2= 0,23	
	3	9,84		Región 3= 1,33	

El generador de vapor en estudio se encuentra operando de manera general al 50% de su carga nominal. La pérdida total por radiación q_5 promedio estimada en las zonas críticas fue de 14,2%, muy superior a la reportado por González (2007), donde reflejan que en zonas donde se alcanzan temperaturas elevadas debido a la falta de aislamiento térmico o a la insuficiencia de este, se llegan a alcanzar valores de q_5 hasta un 5 % o superiores. Por otro lado, la tabla 6 refleja la cuantificación por varios autores de la pérdida q_5 en generadores de vapor pirotubulares. Para todos los casos dicha pérdida no supera el 4%, siendo notable el desfavorable estado técnico de la caldera en estudio.

Tabla 6. Valores de pérdidas q_5 reportado en la literatura.

Referencia	q_5 (%)
(González, et al., 2019)	0,5
(Pérez Sánchez, et al., 2017)	0,57
(Caetano Barbieri, et al., 2019)	4,0
(Horna Paredes, 2019)	3,88
(Mamani Montesinos & Ramos Velez, 2018)	0,43
(Pérez Sánchez, et al., 2017)	0,57

Sin embargo Lapido Rodríguez, et al. (2015), en el estudio Funcionamiento y pérdidas en calderas pirotubulares, para un análisis de 10 calderas de este tipo, refleja que la pérdida por radiación se encuentra entre el 5,32 % y el 14,39%, valores cercanos a lo reportado por Borges, et al., (2016) donde expone un método para la evaluación de la eficiencia energética y el impacto ambiental de un generador pirotubular, estimando la pérdida por radiación en un 13,6% valor

similar al obtenido de acuerdo a la ecuación considerada por González (2007). La potencia total irradiada al medio como consecuencia de la ausencia o deterioro en el aislamiento térmico fue de 6 336 kJ/h, esto representa un gasto de energía y combustible diésel. La tabla 7 presenta la cuantificación de las pérdidas de calor por radiación y convección y la potencia irradiada al medio para las zonas no consideradas como críticas de este equipo.

Tabla 7. Cuantificación de las pérdidas en las zonas no críticas.

Método de cálculo	Zona	% de pérdida por radiación	Total (%)	Potencia irradiada al medio (kW)	Potencia irradiada total (kJ/h)
(Tanquero, et al., 1987)	1	1,05	$q_5 = 11,65$	Región 1 = 0,12	2 880
	2	9,56		Región 2= 0,47	
	3	1,04			
(González, 2007)	1	0,78	$q_5 = 8,65$	Región 3= 0,21	
	2	7,09			
	3	0,78			

La pérdida por radiación y convección siguiendo la expresión propuesta por Tanquero, et al., (1987) para el caso de las zonas no críticas con relación a las zonas críticas fue de un 20,7% inferior. La diferencia considerando la ecuación de González (2007), fue de 36,9%. Aun con estas diferencias todavía estas pérdidas son muy superiores a lo reportado en la literatura para calderas con un correcto aislamiento térmico. La figura 7 presenta un generador de vapor pirotubular con un aislamiento térmico en su superficie muy eficiente, las temperaturas alcanzadas medidas no superan los 30 °C. La potencia total irradiada al medio obtenida fue de 2 880 kJ/h, un 54,5 % inferior a la irradiada en las zonas críticas. Comparando la zona crítica posterior, la de mayor dificultad en el aislamiento térmico y considerando la superficie de calefacción total en dicha zona (0,84 m²) se obtienen 2 095,2 W/m² valor crítico muy superior a lo recomendado por Pérez, et al., (2014) de 290 W/m² y 340 W/m², a una temperatura ambiente de 25 °C.



Figura 7. Vista posterior real y termográfica de una caldera con buen aislamiento térmico.

CONCLUSIONES

En el estudio se determinaron a partir de imágenes termográficas, los valores de temperatura en las zonas críticas en un generador de vapor del tipo pirotubular modelo CMS/C-660. El valor de temperatura promedio en los laterales, posterior y frontal de dicho equipo fueron de 44,21 °C, 151,67 °C y 170,25 °C respectivamente. Las áreas calculadas con ayuda del software AutoCAD mediante la modelación en 2D fueron de 1m², 0,84 m² y 0,15 m² lo que permitió estimar el por ciento de pérdidas en cada una de estas áreas seleccionadas.

A partir del análisis termográfico con la cámara testo-875 fueron estimadas las temperaturas superficiales que permiten cuantificar las pérdidas por radiación y convección (q_5) en las zonas identificadas como críticas y no-críticas mediante dos expresiones de cálculo. Para el caso de las zonas críticas las pérdidas de calor por radiación (q_5) fueron de 14,7 % y 13,7 % respectivamente. Sin embargo, estas pérdidas del calor para el caso de las zonas no-críticas fueron un 20,7 % inferiores.

La potencia total irradiada al medio calculada en las zonas críticas considerando la superficie de calefacción fue de 2 095 W/m² muy superior a lo reportado en la literatura, sin lugar a dudas este valor representa un gasto de energía y combustible, lo que lleva a considerar una correcta insulación térmica que permita disminuir al máximo posible estos gastos y ayude a mejorar el rendimiento del equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bolum, D., Yigang, H., Yunze, H., & Chaolong, Z. (2020). Progress and trends in fault diagnosis for renewable and sustainable energy system based on infrared thermography: A review. *Infrared Physics & Technology*, 109(1).
- Caetano Barbieri, R., Costa Campos, J. C., Fernández Brito, R., Marcos Siqueira, A., Minette, L. J., & Acevedo, E. J. (2019). Análisis de la Eficiencia Energética de una Caldera Industrial Alimentada por Leña. *Research, Society and Development*, 9(1), 1-20.
- Çengel, Y (2011). *Termodinámica*. McGraw-Hill.
- González, A. (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. Universo Sur.
- González, A. V., Suárez, J. M., & Molina, L. R. (2019). Evaluación termoexergética del generador de vapor del campus Lenin de la Universidad de Las Tunas. *Opuntia Brava*, 12(1), 454-468.
- Hamlym, G.J., Stoll, M., Santos, T., De Sousa, C., Manuela Chaves, M., & Grant, O. M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of experimental botany*, 53(378), 2249-2260.
- Horna Paredes, L. D. (2019). Evaluación del sistema de generación, distribución y consumo del vapor en el Hospital Regional "Eleazar Guzman Barrón" – Nuevo Chimbote". Chimbote, (Trabajo de titulación). Universidad Nacional del Santa.
- Lapido Rodríguez, M.J., Vidal Molla, D.A., Madrigal Monzón, J.A. (2015). *Funcionamiento y pérdidas en calderas piro-tubulares*. Estudios de Casos. Universo Sur.
- Mamani Montesinos, C. M., & Ramos Velez, F. W. (2018). Optimización energética del generador de vapor (caldera) del comedor universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno con capacidad de 150 kg de vapor/hora. (Trabajo de titulación). Universidad Nacional del Altiplano.
- Nardi, I., Lucchi, E., De Rubeis, T., & Ambrosini, D. (2018). Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. *Building and Environment*, 146(1), 190-205.
- Olarte, W., Botero, M., & Cañón Zabaleta, B. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. *Scientia et Technica*, 2(48), 253-256.
- Pérez Pérez, M., Martínez Pérez, F., Reves Pacheco, H., & Hernández Hernández, M. (2014). Aplicación de la Termografía en la inspección y el diagnóstico de paredes de generadores de vapor bkz-340-140/29m. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4), 69-75.
- Pérez Sánchez, A., Fernández Tejeda, Y., & González de la Cruz, R. (2017). Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos 23 de Agosto en Camagüey. *Mutis*, 7(1), 7-19.
- Sen, A., & Al-Habaibeh, A. (2019). The design of a novel approach for the assessment of thermal insulation in buildings using infrared thermography and artificial intelligence. *International Journal of Design Engineering*, 9(1), 65-77. _
- Tanquero, N., Aballe, L. M., & Reyes, N. (1987). *Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor*. Ministerio de Educación Superior.
- Xinrui, L., & Memari, A. (2019). Application of infrared thermography for in-situ determination of building envelope thermal properties. *Journal of Building Engineering*, 26(1), 870-885.