

**Análisis de pérdidas y cálculo de eficiencia  
en una caldera pirotubular de 2bhp**

**Analysis of losses and efficiency  
calculation in a 2bhp firetube boiler**

**Alejandro Sebastián Sánchez-Mendoza <sup>1</sup>**  
Universidad Estatal de Milagro - Ecuador  
Asanchezm29@unemi.edu.ec

**Milton Alfonso Criollo-Turusina <sup>2</sup>**  
Universidad Estatal de Milagro - Ecuador  
mcriollot2@unemi.edu.ec

**Miguel Ángel Lema-Carrera <sup>3</sup>**  
Universidad Estatal de Milagro | Universidad de las Fuerzas  
Armadas "ESPE" - Ecuador  
mlemac2@unemi.edu.ec

**[doi.org/10.33386/593dp.2024.6.2713](https://doi.org/10.33386/593dp.2024.6.2713)**

V9-N6 (nov-dic) 2024, pp 521-531 | Recibido: 08 de agosto del 2024 - Aceptado: 25 de septiembre del 2024 (2 ronda rev.)

---

1 ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0618-3162>

2 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3394-1160>

3 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7934-8891>

Sánchez-Mendoza, A., Criollo-Turusina, M., Lema-Carrera, M., (2024). Análisis de pérdidas y cálculo de eficiencia en una caldera pirotubular de 2bhp. 593 Digital Publisher CEIT, 9(6), 521-531, <https://doi.org/10.33386/593dp.2024.6.2713>

Descargar para Mendeley y Zotero

## RESUMEN

El uso de calderas a nivel residencial e industrial es muy común en diversas aplicaciones y procesos generando grandes consumos de combustible y GLP. Por esta razón el análisis de eficiencia energético es importante para reducir las pérdidas generadas por pérdidas de calor e implementar mantenimiento y cambios en su proceso de generación. La metodología utilizada en el presente estudio describe las pérdidas generadas por calor con la utilización de una cámara termográfica, visor de nivel de agua, termómetro de vapor y analizador de combustión ambiental para determinar la composición de gases de combustión. A través de la toma de datos se realizó el cálculo de eficiencia aplicando el método directo e indirecto de eficiencia energética. Los resultados obtenidos a través del cálculo determinaron una eficiencia del 67,8%, aprovechando 7,45kW de 11 kW que ingresan al sistema. Se concluye que la mayor pérdida de eficiencia se produce debido a la transferencia de calor por radiación y a los gases no quemados. Estos hallazgos sugieren la necesidad de mejorar el aislamiento de los componentes y el mantenimiento de los tubos para reducir el índice de Bacharach y minimizar las pérdidas.

**Palabras claves:** caldera, eficiencia energética, termografía, temperatura.

## ABSTRACT

The use of boilers at residential and industrial levels is very common in various applications and processes, leading to significant fuel and LPG consumption. For this reason, energy efficiency analysis is important to reduce losses caused by heat dissipation and to implement maintenance and changes in the generation process. The methodology used in the present study describes the heat losses using a thermal camera, water level gauge, steam thermometer, and environmental combustion analyzer to determine the composition of combustion gases. Efficiency calculations were performed through data collection using both direct and indirect methods of energy efficiency. The results obtained through the calculations determined an efficiency of 67,8%, utilizing 7,45 kW out of the 11 kW entering the system. It is concluded that the greatest efficiency loss occurs due to heat transfer by radiation and unburned gases. These findings suggest the need to improve component insulation and tube maintenance to reduce the Bacharach index and minimize losses.

**Keywords:** boiler, energy efficiency, thermography, temperature.

## Introducción

Las calderas pirotubulares están diseñadas con tubos rodeados por agua y permiten que los gases de combustión fluyan a través de ellos (Sanz & Patiño, 2023). Entre sus principales ventajas se encuentran la facilidad de fabricación y operación, lo que las hace menos complejas en comparación con otros tipos de calderas (Almaza, 2013). Sin embargo, presentan desventajas como un tiempo más largo para generar vapor y una capacidad limitada para responder rápidamente a cambios en la demanda de carga (Patro, 2016). Este tipo de calderas se caracteriza por estar compuesto principalmente de un recipiente a presión y un fluido, generalmente agua, que circula para funciones de calefacción o para la generación de vapor en procesos posteriores (Annaratone, 2008). Son ampliamente utilizadas para generar vapor saturado de mediana o baja capacidad, con un rango de eficiencia generalmente entre el 88% y 92% (Barbieri et al., 2020). Operan a presiones que varían entre 1000 kPa y 2000 kPa, con una capacidad de hasta 166,7 kg/s de vapor. Estos equipos se destacan por su bajo costo, construcción compacta y eficiencia espacial, la optimización de los parámetros operativos es esencial para maximizar la eficiencia energética en estos generadores de vapor. (Jiménez et al., 2016)

La mayoría de los dispositivos para generación de vapor dependen de combustibles fósiles como el diésel y el GLP, lo cual conlleva una considerable huella ambiental debido a la emisión de gases y su origen no renovable. Por lo tanto, alcanzar la máxima eficiencia posible es crucial para reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental, especialmente la emisión de CO<sub>2</sub> (Barma et al., 2017). La eficiencia de la caldera, según lo prescrito por el método de balance de calor de ASME, incluye las pérdidas en la chimenea, así como las pérdidas por convección y radiación. (Fuentes & Lillo, 2022)

La utilización de calderas en la actualidad es crucial para la producción de agua caliente o vapor a altas presiones mediante

transferencia de calor, típicamente generado por combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón, induciendo un cambio de estado del agua de líquido a vapor. (Barma et al., 2017; Menjívar et al., 2015). Estos dispositivos son indispensables en aplicaciones industriales de calefacción, hospitales, y procesos de cocción de alimentos, entre otros. Sin embargo, mejorar la eficiencia de estos sistemas es un desafío debido a las complejas interacciones entre sus componentes (Pronobis, 2020).

El análisis de rendimiento es fundamental para evaluar la eficiencia en sistemas térmicos, identificando las pérdidas de energía a lo largo del proceso mediante ecuaciones simples de energía. Una baja eficiencia en una caldera no solo afecta la economía y la productividad, sino que también incrementa la contaminación ambiental (Jiménez et al., 2016). Por ejemplo, en países europeos, la eficiencia de las calderas no debería ser inferior al 91%, lo que minimiza las pérdidas y promueve mejoras continuas (Zala, 2019).

Mejorar la eficiencia no solo implica una reducción en las emisiones de gases, sino también en el impacto ambiental derivado de la liberación de CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> durante la combustión de compuestos carbonados. Aunque el CO<sub>2</sub> en sí no es tóxico, su acumulación afecta la absorción de oxígeno, lo que puede causar malestar, dolores de cabeza y fatiga en entornos con alta densidad de personas como hospitales y universidades (García et al., 2020). Por lo tanto, es crucial monitorear y reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en estos lugares para garantizar la salud y el bienestar de quienes los ocupan. (Bulla et al., 2015)

La finalidad de esta investigación es determinar la eficiencia del sistema actual mediante cálculos basados en la transferencia de calor. Para ello, se utilizaron temperaturas obtenidas a través de una cámara termográfica y valores de combustión medidos por un analizador de gases. Con estos resultados, se evaluará si el dispositivo requiere mejoras para reducir costos y aumentar la producción de vapor.

## Método

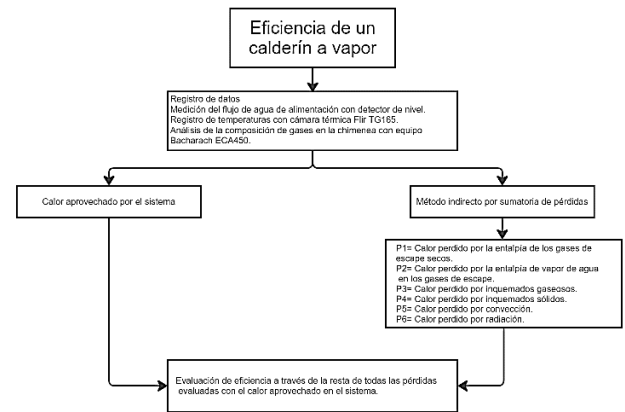
La metodología empleada para la evaluación de la eficiencia del calderín de vapor se basa en el registro de los datos de entrada de combustible y la medición del flujo de agua mediante un detector de nivel en el cilindro de la caldera. Durante el funcionamiento, se determina la temperatura de trabajo en los diferentes componentes, registrando la temperatura máxima a partir de un promedio de tres mediciones realizadas con una cámara térmica Flir TG165, situada a una distancia de 60 cm, de acuerdo con el mínimo recomendado de 26 cm, según el manual de usuario.

La metodología empleada para la evaluación de la eficiencia del calderín de vapor se basa en el registro de los datos de entrada de combustible y la medición del flujo de agua mediante un detector de nivel en el cilindro de la caldera. Durante el funcionamiento, se determina la temperatura de trabajo en los diferentes componentes, registrando la temperatura máxima a partir de un promedio de tres mediciones realizadas con una cámara térmica Flir TG165, situada a una distancia de 60 cm, de acuerdo con el mínimo recomendado de 26 cm, según el manual de usuario.

Adicionalmente, se lleva a cabo la toma de datos en la salida de los gases de combustión utilizando el equipo Bacharach ECA450, con tres mediciones para obtener un promedio de los valores de cada gas. Con todos los datos registrados, se procede a calcular el calor aprovechado por el sistema, según lo descrito en la ecuación 1. A continuación, se determinan las pérdidas, conforme a la ecuación 2, las cuales se restan del calor aprovechado para calcular la eficiencia del sistema. Este proceso se ilustra en la Figura 1. Adicionalmente, se lleva a cabo la toma de datos en la salida de los gases de combustión utilizando el equipo Bacharach ECA450, con tres mediciones para obtener un promedio de los valores de cada gas. Con todos los datos registrados, se procede a calcular el calor aprovechado por el sistema, según lo descrito en la ecuación 1. A continuación, se determinan las pérdidas, conforme a la ecuación

2, las cuales se restan del calor aprovechado para calcular la eficiencia del sistema. Este proceso se ilustra en la Figura 1.

**Figura 1.**  
*Método de evaluación de eficiencia*



## Equipos para medición de gases y temperatura

Para la medición de gases de combustión, se empleó un analizador de gases Bacharach ECA 450 (figura 2), el cual permitió determinar los porcentajes de oxígeno (O<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como se muestra en la figura 2.

Además, la temperatura de las superficies de cada elemento se midió utilizando una cámara térmica FLIR TG165(figura 2), cuyo uso fue fundamental en este estudio. Esta herramienta aplicó los principios de la termografía y utilizó el índice de emisividad establecido en el manual de usuario y en el libro de transferencia de calor de Holman (Olarte et al., 2011).

**Figura 2**  
*Bacharach ECA 450 y Cámara Térmica Flir TG165*



### Calor aprovechado por el sistema

Se define por la multiplicación por el flujo másico del combustible y el calor cedido.

$$Q = \dot{m}_{GLP} * PCI \quad \text{Ecuación ( 1 )}$$

### Donde:

PCI= poder calorífico inferior del combustible

= flujo másico del GLP

El flujo másico del GLP es determinado con un medidor volumétrico y el poder calorífico inferior se obtiene mediante las propiedades del GLP utilizado.

### Cálculo de eficiencia por el método indirecto

Se conoce como método de pérdidas de calor, el cual se obtiene mediante un balance energético que considera el intercambio de calor entre el combustible, el fluido y el medio circundante durante el proceso de combustión. Para determinar la eficiencia de este proceso, se calcula restando los porcentajes del 100%, que representa la eficiencia ideal (Solís Pérez & Custodio Rodríguez, 2017).

El método indirecto se fundamenta en la normativa técnica NTP 350.300.2008, que

establece la ecuación 2 para calcular la eficiencia de manera precisa:

$$\eta = 100 - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \quad \text{Ecuación ( 2 )}$$

### Donde:

$\eta$ = Eficiencia

P1= Calor perdido por la entalpía de los gases de escape secos.

P2= Calor perdido por la entalpía de vapor de agua en los gases de escape.

P3= Calor perdido por inquemados gaseosos.

P4= Calor perdido por inquemados sólidos.

P5= Calor perdido por convección.

P6= Calor perdido por radiación.

Según esta fórmula, es necesario evaluar las pérdidas. Sin embargo, antes de hacerlo, se debe calcular el calor aprovechado por el sistema. Esto comienza con los cálculos de combustión, utilizando la estequiometría y considerando la presencia de carbono e hidrógeno del propano. Además, se deben tomar medidas de la salida de gases, especialmente de CO y CO<sub>2</sub>.

### Pérdidas por gases de combustión (P1)

La pérdida generada proviene de la entalpía de los gases de combustión, tal como se establece en la ecuación 3. Para calcularla, se utiliza la constante de Siegert basada en los valores especificados en la tabla 1, mientras que el contenido de CO<sub>2</sub> se obtiene mediante la medición de gases (Cengel, 2016).

$$P_1 = k * \frac{T_g - T_a}{CO_2} \quad \text{Ecuación ( 3 )}$$

### Donde:

k = Constante de Siegert para el combustible [4]

$T_{g}$  = Temperatura de los gases de combustión [171°C]

$T_a$  = Temperatura Ambiente [17°C]

$CO_2$  = % de  $CO_2$  de los gases de combustión [11,83%]

**Tabla 1:**  
*Constante de Sievert según combustible*

Tipo	Constante de Sievert (K)	$CO_2$ max
Residuales	0.53	15.8
Destilados	0.48	15.5
GLP	0.4	13.8
Gas natural	0.35	11.9

**Fuente:** (INDECOPI, 2009)

### Pérdidas por entalpía del vapor de agua (P2)

Se refiere a la energía térmica que se pierde debido a la evaporación del agua presente en el combustible o en el aire de combustión. Estas pérdidas se cuantifican utilizando la ecuación 4, que permite determinar la cantidad de energía desviada del proceso principal hacia la formación de vapor (Holman, 1999).

$$P_2 = \frac{([H_2O] + 9[H]) * (210 - 4,2 \cdot T_a + 2,1 \cdot T_g)}{PCS} \quad \text{Ecuación ( 4 )}$$

**Donde:**

H = % de H de los gases de combustión [6%]

$H_2O$  = % de  $H_2O$  de los gases de combustión [13%]

PCS = poder calorífico superior [52123 kJ/kg]

### Pérdida por inquemados gaseosos (P3)

La energía perdida debido a la presencia de gases combustibles que no se queman completamente durante el proceso de combustión se calcula a partir de la ecuación 5, la constante se obtendrá de la tabla 2 mientras que el CO y  $CO_2$  a través de la medición de gases (Cengel, 2016).

$$P_2 = k_1 * \left( \frac{CO}{CO_2 + CO} \right) \quad \text{Ecuación ( 5 )}$$

**Donde:**

$K_1$  = Constante para el combustible [48]

CO = % de CO de los gases de combustión [0,708]

**Tabla 2:**  
*Constante k según combustible*

Tipo	Constante( $K_1$ )
Residuales	54
Destilados	53
GLP	48
Gas Natural	40

**Fuente:**(INDECOPI, 2009)

### Pérdidas por inquemados sólidos (P4)

Fracción de material sólido en un proceso industrial, especialmente en la combustión, que no se ha quemado completamente. Estos residuos sólidos, que pueden ser cenizas, escorias u otros tipos de residuos para este caso se ha tomado el número 3 como una presencia regular de hollín, se calcula mediante la ecuación 6. (Cengel, 2016)

$$P_3 = 0.4 * B^2 + 0.8B + 0.07 \quad \text{Ecuación ( 6 )}$$

B = Índice de Bacharach [4]

**Tabla 3:**  
*Índice de Bacharach*

Índice de Bacharach	Calificación	Efectos
1	Excelente	No hay hollín
2	Buena	Hollín muy reducido
3	Regular	Cierta cantidad de hollín
4	Pobre	Hollín visible
5	Muy Pobre	Hollín muy visible
6-9	Pobrísimas	Hollín muy muy visible

**Fuente:**(INDECOPI, 2009)

## Pérdidas por convección (P5)

### Para tapa cilindro y paredes

Para estimar estas pérdidas de convección natural se calcula mediante la ecuación 11 aplicada a las superficies de cada componente. Esta ecuación emplea correlaciones empíricas del número de Nusselt, las cuales se basan en el número de Prandtl y la viscosidad cinemática del fluido. Estos parámetros se determinan a partir de la temperatura ambiente del caso de estudio, que fue de 17°C. Los valores específicos se obtienen mediante interpolación entre las temperaturas de 15°C y 20°C (Cengel, 2016; Soto, 1996).

El primer cálculo que se realiza es el número de Grashof dado por la ecuación 7.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \quad \text{Ecuación ( 7 )}$$

#### Donde:

Gr: Número de Grashof

g: Aceleración gravitacional [9.8 m/s<sup>2</sup>]

β: Coeficiente de expansión volumétrica [1/408.5]

T<sub>s</sub>: Temperatura superficial [408.5°K]

T<sub>∞</sub>: Temperatura ambiente [290°K]

L: Longitud característica de la configuración geométrica [0.15 m]

ν: viscosidad cinemática [1.488x10<sup>-5</sup>]

A partir del número de Grashoff se calcula el número de Rayleigh en la ecuación 8.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{Ecuación ( 8 )}$$

#### Donde:

Ra: Número de Rayleigh

Pr: Número de Prandtl

Con el número de Rayleigh se obtiene el número de Nusselt para convección natural según la ecuación 9.

$$Nu = 0.15 \cdot (Ra)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación ( 9 )}$$

A partir del número de Nusselt se calcula el coeficiente de convección a partir de la ecuación 10.

$$h = \frac{k}{d} \cdot Nu \quad \text{Ecuación ( 10 )}$$

#### Donde:

h: Coeficiente de convección [W/m<sup>2</sup>°C]

K: Conductividad térmica [0.02491W/m<sup>2</sup>°C]

d: Diámetro [0.42m]

Finalmente se determina el calor por pérdida en convección.

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación ( 11 )}$$

#### Donde:

A<sub>s</sub>: Área superficial [0.198m<sup>2</sup>]

### Paredes de Chimenea

En este caso se toma en cuenta las ecuaciones de Holman determinando si el flujo es laminar o turbulento para hallar el factor de convección.

$$h = 1.31 \cdot (T_s - T_\infty)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación ( 12 )}$$

#### Donde:

T<sub>s</sub>: Temperatura superficial [98°C]

T<sub>∞</sub>: Temperatura ambiente [24.5°C]

Ahora se procede a calcular el calor por pérdida en convección a partir de la Ecuación (11)

### Pérdidas por radiación (P6)

Estas pérdidas se calculan utilizando la teoría de radiación, que define la interacción entre un emisor y un absorbedor para determinar la radiación máxima. Este cálculo se realiza a través del índice de emisividad de la superficie, utilizando los siguientes datos (Cengel, 2016).

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * \sigma * \tilde{A} * T^4 \quad \text{Ecuación (13)}$$

#### Donde:

$\varepsilon$  = Emisividad del material

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann  
 $5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$

$T$  = Promedio de temperatura de la superficie y temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{K}$ ]

Para la evaluación previamente estudiada, es necesario considerar el tipo de material del sistema y su recubrimiento. A partir de ello, se deben tomar en cuenta el valor de emisividad y la constante de Stefan-Boltzmann definidos en el libro de Holman, tal como se muestra en la tabla 4.

#### Tabla 4:

*Propiedades de radiación.*

Material	Emisividad ( $\varepsilon$ )	Constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ) [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
Aluminio	0.8	$5.670 \times 10^{-8}$
Pintura azul	0.8	$5.670 \times 10^{-8}$

Fuente: (Holman, 1999)

### Resultados

Las técnicas de termografía sin contacto revelaron una distribución de temperatura uniforme en el sistema, sin puntos de discontinuidad que sugieran posibles defectos de aislamiento. Las mediciones mostraron temperaturas máximas de alrededor de 135 °C en la tapa superior del cilindro y temperaturas mínimas de aproximadamente 35 °C en el cilindro. Se identificaron las mayores pérdidas por transferencia de calor en la chimenea, llegando a un 12.3% de pérdida equivalente a

1.36 kW, atribuidas a altas temperaturas en la salida de gases, falta de aislamiento térmico y una gran área de exposición. A continuación, se expone las pérdidas por convección y radiación debido a las altas temperaturas presentes en cada una de las partes del calderín.

### Resultados de convección

Las pérdidas por convección en cada uno de los componentes son los siguientes:

#### Tabla 5:

*Pérdidas mediante convección*

Componente	Pérdida energética kW	Pérdida porcentual
Tapa superior	0.066	0.599 %
Cilindro	0.137	1.240 %
Paredes de gases en calderín	0.0302	0.273 %
Paredes de chimenea	0.58	5.250 %
Total	0.8132	7.360 %

En la tabla 5 se observa que las mayores pérdidas térmicas se registran en el cilindro, con una pérdida de 0,137 kW, y en las paredes de la chimenea, con 0,58 kW. La pérdida más insignificante se detecta en la tapa superior de la caldera, con una pérdida de 0,066 kW. En total, las pérdidas por convección ascienden al 7,36%. La chimenea constituye la principal fuente de pérdidas debido a la alta temperatura de los gases de combustión y su longitud de 4 metros, a través de la cual estos gases se dispersan.

### Resultados de radiación

La tabla 6 ilustra las pérdidas por radiación

#### Tabla 6:

*Pérdidas mediante radiación*

Componente	Pérdida energética kW	Pérdida porcentual
Tapa superior	0.187	1.694 %
Cilindro	0.107	0.96 %
Paredes de gases en calderín	0.0352	0.319 %
Paredes de chimenea	0.786	7.123 %
Total	1.1152	10.10 %

En la Tabla 6 se presentan las pérdidas de energía por radiación en los distintos



componentes del sistema. Según los datos, la mayor pérdida de energía se observa en las paredes de la chimenea, con un valor de 0,786 kW. En contraste, la pérdida más baja se registra en la tapa del cilindro, con 0,107 kW.

### Pérdida total en el sistema

La tabla 7 ilustra las pérdidas a lo largo del sistema en kW y porcentaje de pérdidas.

**Tabla 7:**  
*Pérdida de calor en el sistema*

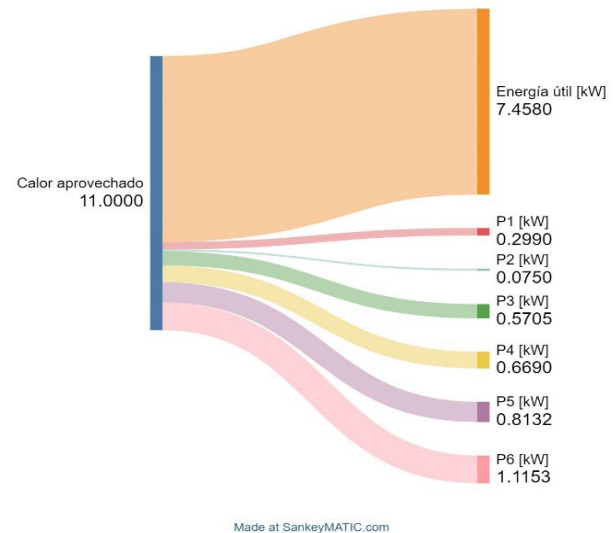
Pérdidas	Pérdida energética kW	Pérdida porcentual
Entalpía de los gases de escape secos	0.2990	2.71 %
Entalpía de vapor de agua en los gases secos	0.075	0.69%
Inquemados gaseosos	0.5705	5.17 %
Inquemados sólidos	0.6698	6.07 %
Convección	0.8132	7.360 %
Radiación	1.1152	10.10 %
Total	3.5428	32.2 %

Los porcentajes de pérdidas según los distintos parámetros analizados revelan que la mayor pérdida se debe a los factores de radiación, con una pérdida de 1,11 kW, lo que representa el 10,10% de la eficiencia total. Esta es seguida por las pérdidas por convección, que ascienden a 0,8132 kW y constituyen el 7,36% de la eficiencia total. La pérdida más baja se observa en la entalpía del vapor de agua, con una pérdida de 0,075 kW, equivalente al 0,69% de la eficiencia del sistema.

### Diagrama de Sankey

En la figura 3 se puede observar que la energía útil del sistema es de 7,45kW representando un porcentaje de 67,8%, mientras tanto las pérdidas se dividen en 7.36% por convección; 10.10% por radiación y 14,64% por gases e inquemados.

**Figura 3**  
*Diagrama de Sankey para pérdidas de calor en el sistema.*



La mayor parte de las pérdidas energéticas se originan en los procesos de combustión y en la liberación de gases, representando un 14% de pérdida, aproximadamente 2 kW. Además, se calcularon pérdidas adicionales por convección natural (7.3%) y radiación (10.1%).

La eficiencia actual del calderín se determinó en un 67,8%, lo que refleja la capacidad de aprovechar 7.45 kW de los 11 kW de energía que ingresan al sistema. Las pérdidas por transferencia de calor y combustión se estimaron en un 31.6%, equivalente a 3.47 kW.

### Discusión

Según la Corporación Interamericana de Inversiones, el porcentaje de CO<sub>2</sub> oscila entre 11 y 11.5, mientras que el de O<sub>2</sub> varía entre 2.7 y 3. Comparando estos datos con los obtenidos (11.8% y 3%, respectivamente), se observa que se encuentran cercanos a los rangos normales de pérdidas en un sistema de generación de calor. (2018). Por otro lado, el exceso de aire tiene un rango entre 1.22 y 1.17. En el cálculo realizado en la caldera se obtuvo un valor de 1.16, lo cual se encuentra dentro del rango normal. Sin embargo, es importante destacar que los tubos de calor en mal estado o sucios pueden aumentar

la temperatura de los gases, reduciendo así su eficiencia como en el caso de la caldera estudiada.

En un estudio realizado por Ana Arjona, se identifican diferentes métodos para determinar las pérdidas de calor, entre ellos la radiación y la convección. Esto se logra a través de una comparación gráfica de la capacidad de la caldera versus el calor perdido, representado en una curva. En dicho estudio, se establece que una pérdida de calor del 6,5% es un parámetro normal para la caldera en cuestión. Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que la pérdida generada es del 17,36% (2019).

### Conclusión

Este estudio examina el uso del método indirecto, conocido como método de pérdidas de calor, para evaluar la eficiencia de las calderas. Este enfoque es reconocido por su alta precisión en la determinación de la eficiencia. Se analizan diversos parámetros que influyen en la eficiencia, y se calculan diferentes tipos de pérdidas. Entre los factores más relevantes se encuentran las pérdidas generadas por convección, radiación e inquemados sólidos. Es importante saber que los combustibles con un mayor poder calorífico bruto se muestran como elementos clave para optimizar la eficiencia en calderas de vapor.

Las pérdidas por convección se muestran como la principal fuente de pérdidas térmicas debido a su alta temperatura de los gases de combustión y su considerable longitud de 4 metros. Este diseño permite que una cantidad significativa de calor se pierda a medida que los gases se dispersan a través de la chimenea. Dado que la chimenea y el cilindro son responsables de las pérdidas más elevadas se puede trabajar en la mejora del aislamiento en la chimenea y el cilindro, así como la revisión de su diseño para minimizar la pérdida de calor

El análisis de radiación revela que las características estructurales y térmicas de cada componente del sistema tienen un impacto notable en la disipación de energía. La chimenea, con su amplia superficie expuesta y la

alta temperatura de los gases que transporta, es responsable de una proporción significativa de las pérdidas. En contraste, la tapa del cilindro, al tener una menor área expuesta y una temperatura más baja, resulta en pérdidas mínimas.

### Referencias bibliográficas

- Almaza, O. (2013). Apuntes para una estrategia en el desarrollo de la energética azucarera. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. <http://revistacuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/51>
- Annaratone, D. (2008). *Steam generators: Description and design*. Springer Science & Business Media. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0qvUKv-sl\\_oC&oi=fnd&pg=PA1&dq=baoilero+for+generation+steam+&ots=vhxssue-O5e&sig=pm\\_mNz1DpoD9J7sBYw-z18dlWmk0](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0qvUKv-sl_oC&oi=fnd&pg=PA1&dq=baoilero+for+generation+steam+&ots=vhxssue-O5e&sig=pm_mNz1DpoD9J7sBYw-z18dlWmk0)
- Arjona, A. (2019). *Revisión de métodos para la determinación de pérdidas y eficiencia energética en generadores de vapor*. <https://idus.us.es/handle/11441/93221>
- Barbieri, R. C., Campos, J. C. C., Brito, R. F., Siqueira, A. M., Minette, L. J., & Acevedo, E. J. (2020). Análisis de la Eficiencia Energética de una Caldera Industrial Alimentada por Leña. *Research, Society and Development*, 9(1), e58911606-e58911606.
- Barma, M. C., Saidur, R., Rahman, S. M. A., Allouhi, A., Akash, B. A., & Sait, S. M. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 970-983.
- Bulla, E. A., Guerrero-Fajardo, C. A., & Sierra-Vargas, F. E. (2015). Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares. *Iteckne*, 12(1), 44-53.
- Cengel, Y. (2016). *Transferencia de calor y masa* (3ra ed.). McGrawHill.
- Corporación Interamericana de Inversiones. (2018). *Reducción de facturación de combustibles fósiles a través del uso racional de la energía*.

- <https://www.pesic.org/wp-content/uploads/2018/05/2-Eficiencia-en-Calderas.pdf>
- Fuentes, O. F., & Lillo, S. M. (2022). Desarrollo de un simulador para la enseñanza de procesos térmicos en una caldera pirotubular de cuatro pasos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 26(2), 25-36.
- García, J. A. C., Aya, Á. A. R., Luna, J. A. F., & Contreras, R. H. P. (2020). Sistema de monitoreo en tiempo real de gases CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> en la ciudad de Villavicencio. *Memorias*. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/memorias/article/view/4172>
- Holman, J. (1999). *Transferencia de calor* (10ma ed.). Continental S.A.
- INDECOPI. (2009). *Normatía Técnica Peruana 350.300*.
- Jiménez, R., Madrigal Monzón, J. A., Lapido Rodríguez, M. J., & Vidal Moya, D. A. (2016). Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor. *Ingeniería Energética*, 37(2), 135-143.
- Menjívar, I., Morán, L., & Chávez, F. (2015). *Rutina para la estimación del rendimiento energético de distintos combustibles de caldera*. <http://repositorio.uca.edu.sv/jspui/handle/11674/6068>
- Olarte, W., Botero, M., & Zabaleta, B. C. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. *Scientia et Technica*, 2(48), 253-256.
- Patro, B. (2016). Efficiency studies of combination tube boilers. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.007>
- Pronobis, M. (2020). *Environmentally oriented modernization of power boilers*. Elsevier. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SeXEDwAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=3Pronobis,+M.+2020\).+Environmentally+Oriented+Modernization+of+Power+Boilers.+Pa%C3%ADses+Bajos:+Elsevier+Science.&ots=nYG0XBKh-Bo&sig=VwDwKt5kw-FoH-A1VLFD-SA8r3CY](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SeXEDwAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=3Pronobis,+M.+2020).+Environmentally+Oriented+Modernization+of+Power+Boilers.+Pa%C3%ADses+Bajos:+Elsevier+Science.&ots=nYG0XBKh-Bo&sig=VwDwKt5kw-FoH-A1VLFD-SA8r3CY)
- Sanz, M., & Patiño, R. (2023). *Manual práctico del operador de calderas industriales 3*. Ediciones Paraninfo, SA. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9SnFEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=tipos+de+calderas&ots=dCchCgzzln&sig=L LcCHn4-Xt2ggJXnqj99Q\\_qeACU](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9SnFEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=tipos+de+calderas&ots=dCchCgzzln&sig=L LcCHn4-Xt2ggJXnqj99Q_qeACU)
- Solís Pérez, E. P., & Custodio Rodríguez, J. C. (2017). *Evaluación del sistema de recuperación de purgas de fondo y de nivel de las calderas pirotubulares en la empresa pesquera Austral Group saa-Coishco*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3340309>
- Soto, J. (1996). *Fundamentos sobre ahorro de energía*. Yucatán., México: FOMES.
- Zala, A. R. S. (2019). *Performance Analysis of Industrial Boiler*. [https://www.researchgate.net/profile/Aniruddhasinh-Rana/publication/376400321\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_Industrial\\_Boiler/links/6576fbf7fc4b416622b82739/Performance-Analysis-of-Industrial-Boiler.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Aniruddhasinh-Rana/publication/376400321_Performance_Analysis_of_Industrial_Boiler/links/6576fbf7fc4b416622b82739/Performance-Analysis-of-Industrial-Boiler.pdf)