# Aprovechamiento del calor residual en calderas pirotubulares mediante economizadores: una estrategia para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de combustible

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

Mónica Alejandra Méndez Recinos, María de los Angeles Tojín Pérez, Humberto José Alvarado Molina, Jacquelin Andrea García Flores, Kylie Yonely Asabá Bautista, Marjorie Julieta Martínez Barrios, Dorcas Jaquelin Cojti Barrios[1]

**RESUMEN**

El presente artículo analiza el potencial de recuperación energética mediante el uso de economizadores en calderas pirotubulares, con el objetivo de reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia térmica del sistema de generación de vapor. La metodología empleada es de carácter documental y de cálculo, basada en principios de transferencia de calor y balance de energía. Se evaluaron tres escenarios con distintos incrementos de temperatura del agua de alimentación (35 °C, 40 °C y 45 °C), determinando en cada caso el calor recuperado, el ahorro de combustible por hora y el ahorro energético anual. Los resultados indican que, para un incremento de temperatura de 45 °C, se recuperan 104.56 kW de calor, lo que representa un ahorro de 9.41 kg/h de combustible, equivalente a 75,280 kg por año. Se concluye que existe una relación directamente proporcional entre el incremento de temperatura del agua de alimentación y la reducción del consumo de combustible, aunque se advierte que temperaturas de gases de salida demasiado bajas pueden generar condensación y corrosión en las superficies metálicas de la caldera.

**Palabras clave:** economizador, caldera pirotubular, eficiencia térmica, recuperación de calor, ahorro de combustible.

**ABSTRACT**

This article analyzes the energy recovery potential using economizers in fire-tube boilers, with the aim of reducing fuel consumption and improving the thermal efficiency of steam generation systems. The methodology applied is documentary and calculative in nature, based on heat transfer principles and energy balance equations. Three scenarios were evaluated with different feedwater temperature increments (35 °C, 40 °C, and 45 °C), determining in each case the recovered heat, the hourly fuel savings, and the

annual energy savings. The results indicate that, for a temperature increment of 45 °C, 104.56 kW of heat is recovered, representing a fuel savings of 9.41 kg/h, equivalent to 75,280 kg per year. It is concluded that a directly proportional relationship exists between the feedwater temperature increment and the reduction in fuel consumption, although it is noted that excessively low flue gas outlet temperatures may lead to condensation and corrosion on the metallic surfaces of the boiler.

**Keywords:** economizer, fire-tube boiler, thermal efficiency, heat recovery, fuel savings.

[1] *Estudiantes de último año de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Email: 3338942351301@ingenieria.usac.edu.gt, 2755769570401@ingenieria.usac.edu.gt, 1744289520101@ingenieria.usac.edu.gt, 3367898661908@ingenieria.usac.edu.gt, 3051094480117@ingenieria.usac.edu.gt, 3004044410101@ingenieria.usac.edu.gt, cojtirabinaljaquelin@gmail.com*

# Aprovechamiento del calor residual en calderas pirotubulares mediante economizadores: una estrategia para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de combustible

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

## INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales que requieren generación de vapor, las calderas pirotubulares representan uno de los equipos mayor consumo energético. En este tipo de calderas, los gases de combustión recorren tubos sumergidos en agua, transfiriendo calor para producir vapor a las condiciones de presión y temperatura requeridas por el proceso. Sin embargo, una parte significativa de la energía generada por la combustión se pierde a través de los gases de escape, los cuales son evacuados hacia la atmósfera a temperaturas considerablemente elevadas, sin que dicha energía sea aprovechada (Lahijani & Supeni, 2018; U.S. Department of Energy, 2012).

Ante esta problemática, los economizadores se presentan como una solución técnica eficiente y ampliamente utilizada en la industria. Un economizador es un intercambiador de calor ubicado en la trayectoria de los gases de combustión, cuya función es aprovechar el calor residual de dichos gases para precalentar el agua de alimentación antes de que ingrese a la caldera. Al elevar la temperatura del agua de entrada, se reduce la cantidad de energía que la caldera debe suministrar por combustión para alcanzar las condiciones de operación, lo que se traduce directamente en una disminución del consumo de combustible y, por consiguiente, en una mejora de la eficiencia térmica global del sistema (U.S. Department of Energy, 2012; Spirax Sarco, s. f.).

El objetivo del presente trabajo es evaluar cuantitativamente el potencial de ahorro energético que representa la incorporación de un economizador en una caldera pirotubular, mediante el desarrollo de un análisis de cálculo basado en ecuaciones de transferencia de calor y balance energético. Para ello, se consideran variables como el flujo másico del agua, el calor específico, las temperaturas de entrada y salida, el poder calorífico inferior del combustible y la eficiencia térmica de la caldera, con el fin de estimar el calor recuperado, el ahorro de combustible por hora y el beneficio energético acumulado en un año de operación.

## METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Las variables consideradas para el análisis corresponden a la temperatura del agua de alimentación antes y después del economizador, temperatura de los gases de combustión, flujo másico de agua, flujo de vapor, consumo de combustible, poder calorífico inferior del combustible y eficiencia térmica de la caldera. Estas variables permiten estimar el calor recuperado en el economizador y relacionarlo con el ahorro potencial de combustible en una caldera pirotubular.

**Tabla No. 1** Variables utilizadas para el análisis energético del economizador.

| Variable | Unidad |
|---|---|
| Temperatura de entrada del agua | °C |
| Temperatura de salida del agua | °C |
| Flujo másico de agua | kg/s |
| Calor específico | KJ/kg°C |
| Temperatura de gases de combustión | °C |
| Eficiencia térmica | % |
| Entalpía del vapor | kJ/kg |
| Consumo de combustible | kg/s |
| Poder calorífico inferior | kJ/kg |
| Horas de operación | h/año |
| Ahorro energético | kg/año |
| Calor recuperado | kW |

Fuente: Elaboración propia con base en Çengel y Ghajar (2011), Moran et al. (2018) y U.S. Department of Energy (2012).

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

Una vez establecidas las variables de cálculo, se procede al desarrollo de las ecuaciones necesarias para estimar la recuperación de energía mediante el economizador, tomando como base los principios de transferencia de calor y balance de energía.

### 1. Calor recuperado en el economizador.

El calor recuperado se calculó a partir del incremento de temperatura del agua de alimentación al pasar por el economizador. Para ello se aplicó la ecuación de calor sensible, utilizada cuando el fluido no presenta cambio de fase (Çengel & Ghajar, 2011):

Ecuación No. 1

$$Q_{rec} = m_{agua} \cdot Cp\left(T_{agua,salida} - T_{agua,entrada}\right)$$

Donde $Q_{rec}$ es el calor recuperado, $m_{agua}$ es el flujo másico del agua de alimentación, Cp es el calor específico del agua, $T_{salida}$ es la temperatura del agua después del economizador y $T_{entrada}$ es la temperatura del agua antes del economizador.

### 2. Eficiencia térmica de la caldera

La eficiencia térmica se determinó mediante la relación entre la energía útil absorbida por el agua o vapor y la energía suministrada por el combustible. Esta ecuación permite comparar el funcionamiento de la caldera antes y después de incorporar el precalentamiento del agua de alimentación. (Moran et al., 2018):

Ecuación No. 2

$$\eta = \frac{m_{vapor} \cdot \left(h_{vapor} - h_{agua}\right)}{\left(m_{combustible} \cdot PCl\right)} \times 100$$

Donde η es la eficiencia térmica de la caldera, $m_{vapor}$ es el flujo másico de vapor generado, $h_{vapor}$ es la entalpía del vapor, $h_{agua}$ es la entalpía del agua de alimentación, $m_{combustible}$ es el flujo másico de combustible y PCI es el poder calorífico inferior.

### 3. Ahorro de combustible

El ahorro de combustible se estimó relacionando el calor recuperado por el economizador con la energía aportada por el combustible. Este criterio se fundamenta en que el precalentamiento del agua reduce la cantidad de energía que debe suministrarse directamente por combustión dentro de la caldera. (U.S Department of Energy, 2012).

Ecuación No. 3

$$m_{combustible,\,ahorrado} = \frac{Q_{rec}}{(PCl \cdot \eta)}$$

Donde $m_{combustible,ahorrado}$ representa el combustible que deja de consumirse por efecto del economizador, $Q_{rec}$ es el calor recuperado, PCI es el poder calorífico inferior del combustible y η es la eficiencia térmica expresada en forma decimal.

### 4. Ahorro energético anual

Para estimar el beneficio anual del economizador, el ahorro horario de combustible puede relacionarse con las horas de operación de la caldera durante el año. Este cálculo permite evaluar el impacto energético del economizador en condiciones normales de operación. (U.S. Department of Energy, 2012).

Ecuación No. 4

$$Ahorro\ anual = m_{combustible,\,ahorrado} \cdot H_{op}$$

Donde ahorro anual, representa el combustible ahorrado durante el año y $H_{op}$ corresponde a las horas anuales de operación de la caldera.

### 5. Consideraciones del análisis

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

El análisis se realizó bajo un enfoque documental y de cálculo, por lo que los resultados dependen de los datos reportados en la literatura y de las condiciones de operación consideradas para la caldera pirotubular. La instalación de un economizador debe evaluarse tomando en cuenta le temperatura de los gases de combustión, el tipo de combustible utilizado, el flujo de agua de alimentación y los límites de operación segura, esto debido a que una disminución excesiva de la temperatura de gases puede favorecer la condensación y corrosión en la chimenea o superficies metálicas. En algunos estudios aplicados a calderas pirotubulares se ha reportado que el uso de economizador mejora el aprovechamiento del calor residual y contribuye a incrementar la eficiente del sistema de generación de vapor (Lahijani & Supeni, 2018)

## RESULTADOS

El resultado principal del estudio mostró que la incorporación de un economizador en una caldera pirotubular permitió recuperar parte del calor residual contenido en los gases de combustión, elevando la temperatura del agua de alimentación antes de su ingreso a la caldera y reduciendo, en consecuencia, el consumo de combustible requerido para la generación de vapor.

La recuperación de calor en calderas pirotubulares mediante economizadores se analizó a partir de un caso base de cálculo, en el cual se consideró una producción de vapor de 2000 kg/h, un flujo másico de agua de 0.556 kg/s, una temperatura de entrada del agua de alimentación de 30 °C, una temperatura de salida del agua del economizador de 75 °C, una eficiencia térmica de la caldera de 80 % y un poder calorífico inferior del gas natural de 50,000 kJ/kg. Con base en estas condiciones, se estimó el calor recuperado, el ahorro de combustible y el ahorro energético anual del sistema.

**Tabla No. 2:** Datos de referencia y justificación de variables empleadas en la muestra de cálculo.

| Variable | Valor | Fuente/justificación |
|---|---|---|
| **T** agua, entrada | 30° | Supuesto de caso base |
| **T** agua, salida | 75° | Supuesto de caso base |
| Cp | 4.18 kJ/kg·°C | Propiedad termodinámica estándar |
| n | 0.80 | Valor típico de caldera industrial |
| PCI | 50,0004. KJ/Kg | Valor típico de gas natural |
| Horas de operación | 8000 h/año | Valor típico |
| Consumó de combustible | 140 kg/h | Supuesto de caso base |

Fuente: Elaboración propia con base en Spirax Sarco, para la justificación del economizador y para calentamiento del agua de alimentación y valores termodinámicos de referencia.

**Incremento de temperatura del agua de alimentación antes del ingreso a la caldera**

$$\Delta T_{agua} = T_{agua,salida} - T_{agua,entrada}$$

$$\Delta T_{agua} = 75 - 30 = 45°C$$

**Calor recuperado en el economizador**

$$Q_{rec} = m_{agua} \cdot Cp\left(T_{agua,salida} - T_{agua,entrada}\right)$$

$$Q_{rec} = \left(0.556\ \frac{kg}{s}\right) \cdot \left(4.18\ \frac{kJ}{kg\ °C}\right)(75°C - 30°C)$$

$$Q_{rec} = 104.56\ \frac{kJ}{kg} = 104.56\ kW$$

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

**Ahorro de combustible.**

$$\dot{m}_{combustible,\,ahorrado} = \frac{Q_{rec}}{PCI \cdot n}$$

$$\dot{m}_{combustible,\,ahorrado} = \frac{104.56}{50{,}000 \cdot 0.80}$$

$$\dot{m}_{combustible,\,ahorrado} = 0.002614\ \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{combustible,\,ahorrado} = 9.41\ \frac{kg}{h}$$

**Ahorro energético anual**

$$Ahorro_{anual} = m_{comb,\,ahorrado} \cdot H_{op}$$

$$Ahorro_{anual} = 9.41\ \frac{kg}{h} * 8000\ \frac{h}{año}$$

$$Ahorro_{anual} = 75{,}280 \frac{kg}{año}$$

**Porcentaje de ahorro de combustible**

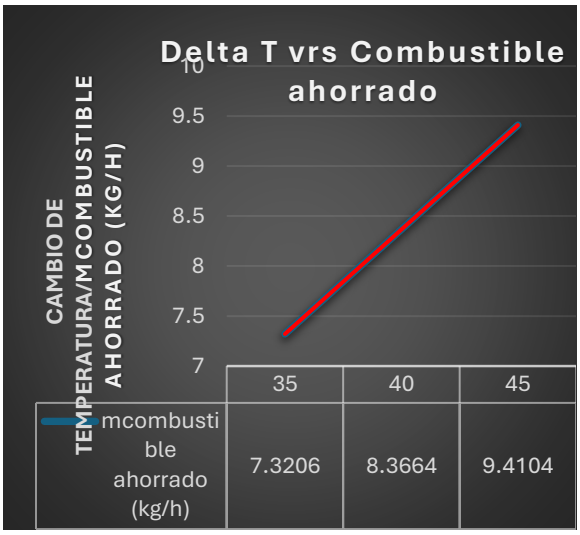
Tomando como referencia un consumo aproximado de 140 kg/h de combustible para producir 2000 kg/h de vapor.

**Tabla No. 3:** Cambio de temperatura vs ahorro de combustible.

| Caso | ΔT H20 | mcombustible ahorrado (kg/h) |
|---|---|---|
| 1 | 35 | 7.3206 |
| 2 | 40 | 8.3664 |
| 3 | 45 | 9.4104 |

Fuente: Resultados

**Gráfico No.1** Cambio de temperatura vrs ahorro de combustible.




Fuente: Tabla No.3 Resultados, elaboración propia.

## DISCUSIÓN

Con base en el objetivo planteado de evaluar el potencial de recuperación energética mediante economizadores en calderas pirotubulares, los resultados obtenidos permiten afirmar que el precalentamiento del agua de alimentación representa una estrategia que favorece el aprovechamiento del calo residual contenido en los gases de combustión y disminuye la demanda térmica requerida durante la generación de vapor.

Con un incremento de temperatura del agua de 45 °C se obtuvo un calor recuperado de 104.56 kW y un ahorro de combustible de 9.4104 kg/h, equivalente a 75,280 kg/año. Adicionalmente, el análisis comparativo desarrollado mediante la Tabla No. 1 y el Gráfico No. 1 evidenció que al disminuir el incremento de temperatura del agua de alimentación también disminuye el ahorro de combustible, obteniéndose valores de 8.3664 kg/h para ΔT = 40 °C y 7.3206 kg/h para ΔT = 35 °C.

Este comportamiento sugiere que existe una relación directamente proporcional entre el aumento de temperatura del agua de

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

alimentación y reducción del combustible requerido para la generación de vapor, debido a que el sistema necesita aportar una menor cantidad de energía dentro de la cámara de combustión para alcanzar las condiciones de operación.

Los resultados obtenidos presentan una tendencia similar a la reportada por U.S. Department of Energy (2012), donde se establece que la incorporación de economizadores permite recuperar energía de los gases de escape y mejorar el desempeño térmico del sistema. Asimismo, Lahijani y Supeni (2018) reportaron que el ahorro energético asociado a economizadores depende principalmente del diferencial térmico alcanzado y de las condiciones reales de operación.

Una interpretación alternativa de los resultados es que el ahorro calculado puede variar si cambian las condiciones reales de operación, como el tipo de combustible, el exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión, las pérdidas térmicas, el ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor o la eficiencia real de la caldera. Además, el análisis se desarrolló mediante una metodología documental y de cálculo, por lo que no se consideraron mediciones experimentales directas, pérdidas de calor al ambiente ni variaciones de carga durante la operación. Estas limitaciones pueden provocar diferencias entre el ahorro teórico estimado y el ahorro real obtenido en una instalación industrial.

También debe considerarse que una reducción excesiva de la temperatura de los gases de salida puede generar condensación de vapor de agua y compuestos ácidos, especialmente cuando el combustible contiene azufre. Esta condición podría favorecer problemas de corrosión en la chimenea o en las superficies metálicas del economizador.

Sin embargo, aunque el mayor ahorro fue obtenido para el caso de $\Delta T=45°C$, no puede afirmarse que incrementos mayores generen necesariamente beneficios proporcionales, ya que temperaturas excesivamente bajas en los gases de salida pueden favorecer fenómenos de condensación y corrosión, disminuyendo el rendimiento esperado del sistema.

Los resultados muestran que el uso de un economizador puede ser una alternativa favorable para mejorar el aprovechamiento del calor residual en calderas pirotubulares. Al elevar la temperatura del agua de alimentación, se reduce la energía que debe aportar el combustible, lo cual se refleja en un menor consumo y en una operación más eficiente. Sin embargo, este beneficio depende de las condiciones reales de trabajo y de los límites seguros de temperatura de los gases, ya que una recuperación excesiva de calor podría provocar condensación y problemas de corrosión. Por ello, la aplicación de economizadores debe analizarse de forma técnica antes de su implementación.

## CONCLUSIONES

1. El análisis permitió cuantificar el aprovechamiento energético asociado al uso de un economizador en una caldera pirotubular. Para las condiciones evaluadas, se determinó una recuperación de 104.56 kW de calor, confirmando que una parte importante de la energía contenida en los gases de combustión puede reincorporarse al proceso antes de ser liberada al ambiente.

2. Al comparar los tres escenarios estudiados, se observó una variación apreciable en el ahorro de combustible conforme aumentó la temperatura del agua de alimentación. El caso de $\Delta T = 45\ °C$ presentó el resultado más

Fecha de recepción: 16 septiembre 2026 Fecha de corrección: 20 octubre 2026

favorable, con un ahorro cercano a 9.41 kg/h, mientras que para incrementos menores los valores obtenidos fueron inferiores. Esta diferencia evidencia la importancia que tiene el diferencial térmico disponible sobre el desempeño del economizador.

3. Aunque el ahorro horario obtenido puede parecer reducido al analizarse de forma aislada, al proyectarlo a un año de operación continua se alcanza un valor de 75,280 kg de combustible. Este resultado permite apreciar con mayor claridad la relevancia económica y energética que puede representar la recuperación de calor residual en sistemas de generación de vapor utilizados de manera permanente.

## BIBLIOGRAFÍA

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill.

Lahijani, A. M., & Supeni, E. E. (2018). Evaluating the effect of economizer on efficiency of the fire tube steam boiler. *Innovative Energy & Research.*

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). John Wiley & Sons.

U.S. Department of Energy. (2012). *Energy tips: Steam—Recover heat from boiler flue gas*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.

Spirax Sarco. (s. f.). *Miscellaneous boiler types, economisers and superheaters*. Spirax Sarco.