

Evaluación energética y ambiental de una caldera según el tipo de combustible

Combustible energy and environmental assessment of a boiler according to the type of fuel

Este estudio analiza de manera integral el desempeño operativo y ambiental de calderas industriales según el combustible utilizado — biomasa, gas natural, GLP y diésel— con el objetivo de evaluar su sostenibilidad y eficiencia productiva. Para ello, se aplicó una metodología descriptiva y comparativa basada en la revisión documental sistemática de diez fuentes secundarias publicadas entre 2022 y 2025, examinando variables críticas como la eficiencia térmica, las emisiones de CO₂ y material particulado, los costos operativos y la disponibilidad del recurso. Los resultados demuestran que el gas natural constituye la opción más equilibrada al combinar la mayor eficiencia térmica con reducidas emisiones contaminantes. Por su parte, el GLP ofrece un rendimiento intermedio, mientras que el diésel genera un impacto ambiental severo y la biomasa presenta una variabilidad significativa, supeditada al tipo de insumo y a las condiciones específicas de operación. En conclusión, la selección estratégica del combustible en sistemas industriales no debe fundamentarse en una sola variable, sino ponderar de manera armónica los criterios técnicos, económicos y ecológicos para garantizar la máxima eficiencia energética y sostenibilidad operacional en la industria.

PALABRAS CLAVE: Calderas industriales; Eficiencia energética; Combustibles; Emisiones contaminantes; Sostenibilidad.

ABSTRACT

This study comprehensively analyzes the operational and environmental performance of industrial boilers according to the fuel used – biomass, natural gas, LPG and diesel – with the aim of evaluating their sustainability and production efficiency. To this end, a descriptive and comparative methodology was applied based on the systematic documentary review of ten secondary sources published between 2022 and 2025, examining critical variables such as thermal efficiency, CO₂ and particulate matter emissions, operating costs, and resource availability. The results show that natural gas is the most balanced option by combining greater thermal efficiency with reduced pollutant emissions. LPG, on the other hand, offers an intermediate performance, while diesel generates a severe environmental impact and biomass presents a significant variability, depending on the type of input and the specific operating conditions. In conclusion, the strategic selection of fuel in industrial systems should not be based on a single variable, but should harmoniously weigh technical, economic and ecological criteria to ensure maximum energy efficiency and operational sustainability in the industry.

KEYWORDS: Industrial boilers; Energy efficiency; Fuels; Pollutant emissions; Sustainability.

TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y CONOCIMIENTO

Recepción: 30/07/2026

Aceptación: 27/08/2026

Publicación: 31/12/2026

AUTOR/ES

 López Zambrano Luis Fernando

 Chávez Bravo Ángel Josué

 Ing. Vélez Moreira Víctor Hugo,
Mgtr.

 lopez.l3339@istlam.edu.ec

 chavez.a.2906@istlam.edu.ec

 vhm1989@hotmail.es

 I.S.T. Luis Arboleda Martínez

 I.S.T. Luis Arboleda Martínez

 I.S.T. Luis Arboleda Martínez

 Manta - Ecuador

 Manta - Ecuador

 Manta - Ecuador

CITACIÓN:

López, L. Chavez, A. & Velez, V. (2026). Evaluación energética y ambiental de una caldera según el tipo de combustible. Revista InnovaSciT. 4 (2), p. 927 - 937.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas térmicos industriales, en términos generales, se basa principalmente en la eficiencia energética y la sostenibilidad medioambiental. Como las calderas generan calor y vapor para la producción, su funcionamiento regula el consumo de combustible y las emisiones contaminantes al aire (Dueik, 2024; Tong et al., 2025).

Por lo tanto, el desempeño de estos equipos está muy vinculado con la clase de combustible que se emplee, considerando su poder calorífico, la estabilidad de la combustión y las características de las emisiones. También se nota que el GLP y el gas natural son alternativas que producen una combustión más limpia y menos emisiones, a diferencia del diésel, que brinda una estabilidad operativa más alta, pero produce un impacto ambiental más significativo. En cambio, la biomasa se presenta como una alternativa renovable, cuyo rendimiento depende de la calidad del material y el diseño de la caldera (Rodríguez, 2024; Pinho & Borges, 2025).

Por lo tanto, este estudio busca destaca las emisiones como el criterio clave de evaluación, dejando en un segundo plano la integración de variables energéticas, ambientales y económicas. Por otra parte, esto limita la capacidad de tomar decisiones técnicas en el sector industrial, donde es crucial evaluar la eficiencia, sostenibilidad y viabilidad económica de forma conjunta. Es por eso que, en este contexto, se vuelve indispensable un análisis comparativo que proporcione criterios técnicos para la selección más adecuada de combustibles. A continuación, la Tabla 1 resume las características generales de los combustibles utilizados en calderas industriales:

Tabla 1 :

Características generales de los combustibles utilizados en calderas industriales

Combustible	Poder calorífico aproximado	Ventajas principales	Limitaciones	Aplicación típica
Diésel	Alto	Arranque rápido y combustión estable, estabilidad de combustión y fácil acceso Posee una alta eficiencia térmica y unas emisiones reducidas de CO ₂ y partículas	Alto costo operativo y mayores emisiones contaminantes elevados	Industria alimentaria y procesos discontinuos
Gas natural	Medio–alto	Cuenta con una combustión limpia y una eficiente transferencia de calor	Hace referencia a la dependencia de las redes de abastecimiento	Se refiere a la industria química, textil y energética
GLP	Alto		Indica almacenamiento presurizado, precio alto	Hace referencia a las calderas medianas y a las áreas que no tienen gas natural.

Biomasa	Variable	Incluye fuente renovable, menor huella de carbono	Indica mayor cuidado, variabilidad en la calidad del combustible	Se enfoca en los procesos sostenibles e industria agroindustrial
---------	----------	---	--	--

Fuente: Elaboración propia con base en Lizana (2024) y revisión de la literatura.

Tabla 2

Comparación del desempeño energético y ambiental según el tipo de combustible

Combustible	Eficiencia térmica (%)	Emisiones de CO ₂	Emisión de partículas	Impacto ambiental global
Diésel	80–85	Alta	Alta	Elevado
Gas natural	85–90	Media–baja	Muy baja	Bajo
GLP	83–88	Media	Baja	Medio
Biomasa	70–85	Baja (neutral)	Media–alta	Variable

Fuente: Yilbas (2025), Evaluación comparativa de eficiencia y emisiones por tipo de combustible.

Para la selección técnica de combustibles, deben considerarse criterios energéticos, ambientales y económicos. La Tabla 3 resume los factores clave que afectan el desempeño de las calderas industriales:

Tabla 3

Criterios técnicos, ambientales y económicos para la selección del combustible en calderas industriales

Criterio	Descripción	Impacto en el sistema
Rendimiento energético	Es la capacidad del combustible de producir vapor con un consumo reducido	Es la que establece la eficacia operativa de la caldera
Emisiones contaminantes	Corresponde a la generación de material particulado, dióxido de carbono (CO ₂) y óxidos de nitrógeno (NO _x)	Es la que incide sobre el cumplimiento de las normas medioambientales.
Estabilidad de combustión	Se trata de la regularidad y el control del proceso de incineración.	Disminuye pérdidas de calor y fallas en el funcionamiento
Costos operativos	Es el precio del combustible y los gastos de mantenimiento relacionados.	Es la que influye en la rentabilidad del procedimiento
Disponibilidad	Es el acceso constante y fiable a los combustibles	Es la que determina que el proceso productivo continúe

Fuente: Elaboración propia

El presente estudio realiza una revisión crítica y comparativa de la literatura sobre combustibles en calderas industriales, integrando desempeño energético, impacto ambiental y costos operativos. Esta aproximación permite identificar alternativas más eficientes y

sostenibles, ofreciendo criterios técnicos para la toma de decisiones fundamentadas en el sector industrial.

La revisión bibliográfica evidencia la ausencia de investigaciones que comparen simultáneamente el desempeño energético, ambiental y económico de diferentes combustibles en calderas industriales bajo criterios metodológicos uniformes. La mayoría de los estudios se centra en una única variable, como eficiencia térmica o emisiones, sin analizar su interacción. Asimismo, las diferencias en métodos de evaluación y métricas empleadas dificultan la comparación directa de resultados. Esta situación limita la formulación de recomendaciones técnicas aplicables a contextos productivos reales. En consecuencia, se identificó la necesidad de estudios integrales que utilicen criterios estandarizados y medibles.

MÉTODOS Y MATERIALES

El estudio se desarrolló mediante una revisión documental de carácter comparativo, centrado en la revisión sistemática de fuentes secundarias sobre el desempeño de calderas industriales según el tipo de combustible utilizado. Por ello esta investigación se orientó a analizar aspectos técnicos, ambientales y económicos, sin incluir experimentación directa ni simulación.

- Documental: Se realizó analizaron y seleccionaron investigaciones de publicaciones científicas, libros especializados y tesis recientes, con el fin de establecer un marco teórico sólido y evidenciar tendencias en eficiencia energética, emisiones y costos operativos.
- Comparativo: Se contrastaron los combustibles más utilizados en calderas industriales (gas natural, diésel, GLP y biomasa) para evaluar su desempeño integral.

Se incluyeron 10 fuentes recientes (2022–2025): 6 artículos científicos sobre eficiencia energética, emisiones y costos asociados a combustibles; 2 tesis académicas centradas en desempeño energético y ambiental; 2 estudios técnicos especializados sobre implementación industrial de calderas y análisis de combustibles.

Criterios de inclusión

- Publicaciones recientes (2022–2025).
- Información verificable y con respaldo científico.
- Datos cuantitativos o cualitativos relevantes sobre eficiencia, emisiones o costos.

Criterios de exclusión

- Fuentes sin validación científica o sin evidencia comprobable.
- Trabajos que solo presentan teoría sin aplicación práctica.

Procedimiento

A continuación se detalla el siguiente procedimiento:

1. **Recolección de información:** En esta fase se llevó a cabo estudios esenciales para definir los criterios de inclusión y exclusión.
2. **Análisis comparativo:** Se compararon eficiencia térmica, las emisiones contaminantes y los costos operativos de cada combustible.
3. **Síntesis:** Se realizó tablas la cual permitieron visualizar las diferencias y tendencias, en base al tema elegido.

Análisis

Desde una perspectiva crítica, se realizó un análisis en el que se subrayaron la eficiencia energética, el impacto medioambiental y la viabilidad económica, así como las ventajas, las limitaciones y la productividad de cada combustible.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

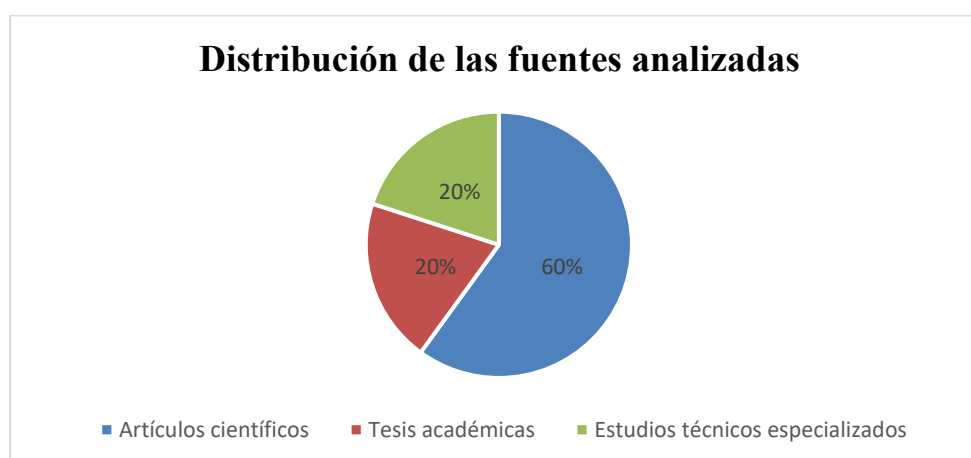
Tabla 1

Distribución de las fuentes analizadas

Tipo de fuente	Número	Porcentaje
Artículos científicos	6	60 %
Tesis académicas	2	20 %
Estudios técnicos especializados	2	20 %
Total	10	100%

Nota: Elaboración propia a partir de las 10 referencias revisadas.

Gráfico # 1



Nota: El gráfico #1 muestra los porcentajes de la clasificación de fuentes analizadas.

Se analizaron 10 fuentes secundarias recientes y con respaldo científico. El 60 % correspondió a artículos científicos, el 20 % a tesis académicas y el 20 % a estudios técnicos especializados. Esta distribución evidencia el predominio de literatura indexada y actualizada.

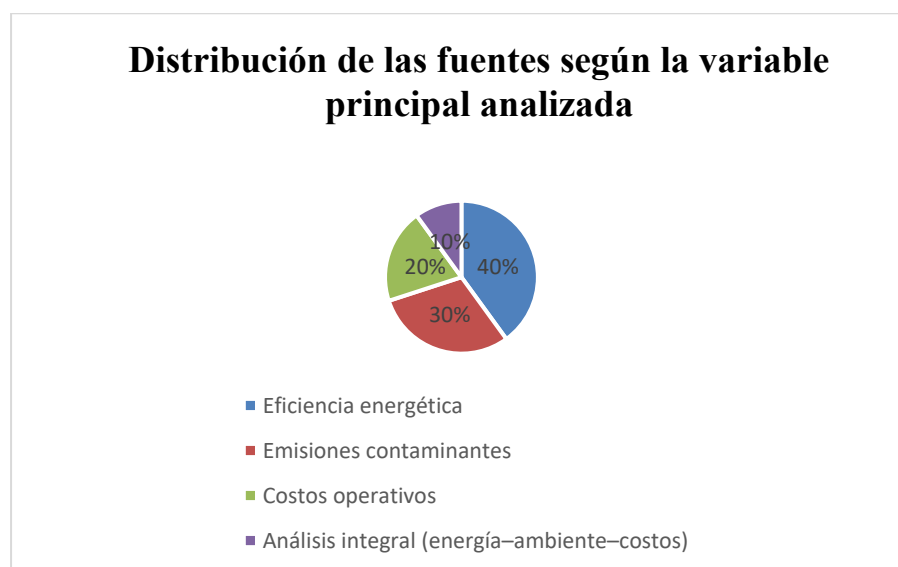
Tabla 2

Distribución de las fuentes analizada

Variable analizada	Número de estudios	Porcentaje
Eficiencia energética	4	40%
Emisiones contaminantes	3	30%
Costos operativos	2	20%
Análisis integral (energía–ambiente–costos)	1	10%
Total	10	100%

Nota: Elaboración propia.

Gráfico # 2



Nota: El gráfico #2 muestra la distribución porcentual de las fuentes analizadas según la variable principal estudiada.

La eficiencia energética fue la variable más estudiada (40 %), seguida de emisiones contaminantes (30 %) y costos operativos (20 %). Solo un estudio consideró un análisis integral (10 %), confirmando la escasez de investigaciones multidimensionales.

Tabla 3.

Desempeño comparativo de los combustibles en calderas industriales

Combustible	Eficiencia energética	Emisiones (g/kWh)	Costo operativo (\$/GJ)	Evaluación global
Diésel	85-90	700-900	12-14	Desfavorable
Gas natural	92-96	300-350	10-12	Muy favorable
GLP	88-91	500-600	11-13	Favorable
Biomasa	70-85	200-500	8-12	Condicional

Nota: Elaboración propia a partir del análisis de la literatura.

El análisis comparativo evidencia que el gas natural combina alta eficiencia, bajas emisiones y costos moderados, mientras que el diésel presenta emisiones y costos elevados. El GLP muestra desempeño intermedio y la biomasa, aunque renovable, presenta variabilidad significativa según el tipo de combustible y las condiciones operativas.

Hallazgos adicionales

- La eficiencia real de los combustibles depende del mantenimiento y la operación de la caldera, aspecto destacado en estudios técnicos.
- La integración de criterios económicos, técnicos y ambientales en decisiones industriales sigue siendo limitada, lo que explica la persistencia de combustibles con alto impacto ambiental.
- La biomasa muestra variabilidad considerable en desempeño y emisiones, condicionada por el tipo de material y diseño de la caldera.

DISCUSIÓN

El análisis termodinámico e hidrodinámico de los sistemas de generación de vapor y agua caliente evidencia que el desempeño global de las calderas presenta una variabilidad estadísticamente significativa en función del vector energético utilizado. En este contexto, el gas natural se consolida como el combustible de mayor viabilidad técnica y ambiental, registrando una eficiencia térmica global referida al Poder Calorífico Inferior del 92 % al 96 %, complementada con un factor de emisión específico de 300 a 350 g/kWh. Esta superioridad técnica se fundamenta en su elevada relación hidrógeno/carbono y en una combustión estequiométricamente más eficiente con bajo exceso de aire, lo que minimiza considerablemente las pérdidas por entalpía en los gases de escape (Yilbas, 2025; Lizana, 2024). Sin embargo, su factibilidad técnica y económica se encuentra estrictamente condicionada a la infraestructura logística existente, requiriendo la disponibilidad de redes de distribución por gasoducto o sistemas de almacenamiento y regasificación *in situ* (Sotalin, 2025).

En contraste, el diésel o gasóleo industrial destaca por su alta densidad energética y confiabilidad de suministro sin depender de redes fijas, pero genera un impacto ambiental severo con un nivel de emisiones de 700 a 900 g/kWh, lo que restringe su sostenibilidad frente a normativas de descarbonización cada vez más rigurosas. Como alternativa de transición, el Gas Licuado de Petróleo exhibe un comportamiento termodinámico e impacto ambiental intermedios, resultando una opción estratégica en emplazamientos industriales geográficamente aislados donde la cobertura del gas natural es inexistente. Por su parte, la biomasa sólida representa una solución de neutralidad de carbono dentro de la matriz renovable, aunque su rendimiento exergético y térmico presenta una elevada volatilidad debido a factores operativos como el contenido de humedad, la heterogeneidad granulométrica y el potencial de formación de cenizas e incrustaciones en las superficies de transferencia de calor (Pinho & Borges, 2025).

Un hallazgo crítico identificado en la revisión bibliográfica es la acusada fragmentación metodológica del sector, donde únicamente el 10 % de la literatura científica adopta un enfoque integrador que evalúe simultáneamente la eficiencia térmica, la caracterización de emisiones contaminantes y el análisis de costos del ciclo de vida. Esta carencia de evaluaciones holísticas limita sustancialmente la planificación estratégica y la toma de decisiones en la industria, imposibilitando una optimización técnico-económica real. En consecuencia, la selección del combustible para calderas debe abordarse mediante modelos de decisión multicriterio que sistematicen la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental y los costos de operación y mantenimiento, complementados rigurosamente con programas de mantenimiento predictivo y la validación de estos modelos a través de ensayos experimentales y auditorías energéticas en condiciones reales de carga.

CONCLUSIONES

El desempeño térmico y la efectividad global de los sistemas de generación de vapor e intercambio calórico no están supeditados de manera exclusiva al poder calorífico molar o gravimétrico del vector energético, sino a la interrelación estequiométrica y termodinámica entre la eficiencia energética, el perfil de emisiones contaminantes y las estructuras de costos operativos asociados. Bajo este enfoque integrador, el gas natural se consolida como la alternativa tecnológicamente más equilibrada, al combinar una elevada eficiencia en la transferencia de calor con un bajo factor de emisión por unidad de energía producida, lo que optimiza la sostenibilidad global del proceso industrial. En contraposición, el diésel asegura una alta confiabilidad y estabilidad en la dinámica de combustión, aunque su viabilidad a largo plazo se ve restringida por elevados costos de insumo, un mayor índice de severidad en el impacto ambiental y mayores requerimientos en el mantenimiento predictivo por acumulación de inquemados.

Por su parte, el gas licuado de petróleo se posiciona como una solución de desempeño intermedio que mitiga sustancialmente la formación de hollín frente a los destilados pesados, constituyendo una opción estratégicamente viable para emplazamientos desprovistos de infraestructura de distribución por red. Entretanto, la biomasa destaca por su aporte a la neutralidad de carbono, si bien sus indicadores de rendimiento energético y térmico presentan una alta variabilidad operativa que exige un riguroso control de variables críticas como la humedad, la granulometría y el régimen de flujo de aire primario. En consecuencia, la implementación de metodologías de análisis comparativo y multicriterio supera las limitaciones de la evaluación univariable tradicional, proporcionando un marco fundamentado para la toma de decisiones estratégicas, la selección optimizada del combustible y la maximización del ciclo de vida útil de la caldera en condiciones reales de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias , R., Fong , F., Rojas, Y., Conde, R., & Melek , S. (2022). Mejoras en las emisiones de gases y en la eficiencia de una caldera con la introducción de la tecnología magnética. *Agroindustria, Sociedad Y Ambiente*, 2(19), 23-36. <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/4218>
- Ciupek, B., & Frąckowiak, A. (2024). Review of Thermal Calculation Methods for Boilers— Perspectives on Thermal Optimization for Improving Ecological Parameters. *Energies*, 17(24). <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/24/6380>
- Dueik, K. (2024). Uso de calderas en la industria. Dueik Equipos Térmicos. <https://dueik.cl/2024/06/07/uso-de-calderas-en-la-industria/>
- Jankowski, R., Ślefarski, R., & Bauma, I. (2025). Evaluación del rendimiento térmico y de emisiones de calderas de condensación domésticas alimentadas con gas natural enriquecido con hidrógeno. *Energías*, 18(13). <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3240>
- Lizana, C. M. (2024). Análisis de la transición energética en procesos con combustión en una fundición de acero. *Tesis Magíster en Gestión de la sustentabilidad*, 1-56. <https://repositorio.udd.cl/server/api/core/bitstreams/d86149f9-e150-40c9-8420-408be0629890/content>
- Pinho, R., & Borges, A. (2025). Evaluación integral del rendimiento de combustión y emisiones de pellets comerciales en calderas de pequeña escala. *Energías*, 18(13). <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3545>
- Rodríguez., M. (2024). Optimización de la eficiencia energética en calderas industriales. Inspenet. *Revista Ins penet*. <https://inspenet.com/articulo/eficiencia-energetica-calderas-industriales/>
- Sotalin, E. (2025). Diseño de un sistema de gestión energética basado en la ISO 50001:2018 de eficiencia energética en la empresa Novopan del Ecuador S.A. *Tesis - Magíster en Desarrollo Sostenible y Economía(XC)*, 1-75. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e88af039-37f5-47ff-84df-0955a2dca4cc/content>
- Tong, Y., Xu Dong Guo, & Fenghui Guo. (2025). Avances en las emisiones de contaminantes atmosféricos primarios de calderas industriales en China: características de las emisiones, inventarios de emisiones y potenciales de mitigación. *Sostenibilidad*, 17(5). <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/5/1987>
- Yilbas, Z. (2025). Biocombustibles, electrocombustibles y combustibles derivados de residuos:

avances, desafíos y direcciones futuras. *Revista MDPI Volumen 17, No 13.*
<https://www.mdpi.com/2071-1050/17/13/6145>

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles.

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior