



Análisis termo-exergético del cambio de combustible diésel-gas natural en hornos industriales de temple

Thermo-Exergetic Analysis of the Diesel–Natural Gas Fuel Switch in Industrial Quenching Furnaces

Análise termo-exergética da troca de combustível diesel-gás natural em fornos industriais de têmpera

ARTÍCULO ORIGINAL



Frowen Valencia-Lucas¹ 
frowen.valencia@gmail.com

Pedro Noboa-Romero² 
pnoboar@unemi.edu.ec

Juan Paredes-Quevedo² 
jparedesq@unemi.edu.ec

Carlos Campoverde-Pillajo² 
ccampoverdep1@unemi.edu.ec

¹ Universidad de Cuenca, Cuenca, Azuay, Ecuador

² Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Guayas, Ecuador

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v10i26.138>

Artículo recibido 17 de noviembre 2025 / Aceptado 15 de diciembre 2025 / Publicado 05 de enero 2026

RESUMEN

El temple de aceros en hornos industriales demanda altos consumos de energía y genera emisiones relevantes, por lo que es necesario evaluar alternativas de combustible más eficientes. El objetivo fue analizar termo-exergéticamente el cambio de diésel a gas natural en un horno de temple de ballestas de acero, integrando criterios termo-económicos. El enfoque metodológico fue cuantitativo, mediante un estudio de caso de tipo analítico-comparativo aplicado al horno industrial de temple de una fábrica de resortes ubicada en Cuenca, Ecuador. El diseño no experimental transversal. Se realizaron balances de masa, energía y entropía en régimen estacionario para ambos combustibles, modelando la combustión, las pérdidas térmicas y calculando exergía destruida, eficiencias y costes exergo-económicos. Los resultados muestran que, para una misma potencia útil, el gas natural reduce un 47 % el calor de combustión y un 75 % el calor evacuado en los gases de escape, y disminuye un 98 % el coste por unidad de exergía destruida. Se concluye que la conversión a gas natural es técnica y termo-económicamente viable, aunque se requiere refinar el modelo exergético con datos experimentales.

Palabras clave: Diésel; Eficiencia energética; Gas natural; industria automotriz; Termo-económico; Termo-exergético

ABSTRACT

The tempering of steel in industrial furnaces requires high energy consumption and generates significant emissions, making it necessary to evaluate more efficient fuel alternatives. The objective was to analyse the thermo-exergetic change from diesel to natural gas in a steel leaf spring tempering furnace, integrating thermo-economic criteria. The methodological approach was quantitative, through an analytical-comparative case study with a non-experimental cross-sectional design. Mass, energy and entropy balances were carried out under steady-state conditions for both fuels, modelling combustion and thermal losses and calculating destroyed exergy, efficiencies and exergoeconomic costs. The results show that, for the same useful power, natural gas reduces combustion heat by 47 % and heat evacuated in exhaust gases by 75 %, and decreases the cost per unit of destroyed exergy by 98 %. It is concluded that conversion to natural gas is technically and thermo-economically viable, although the exergy model needs to be refined with experimental data.

Key words: Diesel; Energy efficiency; Natural gas; Automotive industry; Thermo-economic; Thermoexergetic

RESUMO

O revenimento do aço em fornos industriais demanda alto consumo de energia e gera emissões significativas, tornando necessária a avaliação de alternativas de combustíveis mais eficientes. O objetivo foi analisar os efeitos termoexergéticos da troca do diesel pelo gás natural em um forno de revenimento de molas de aço, integrando critérios termoeconômicos. A abordagem metodológica foi quantitativa, utilizando um estudo de caso analítico-comparativo com um delineamento transversal não experimental. Balanços de massa, energia e entropia foram realizados em regime permanente para ambos os combustíveis, modelando a combustão e as perdas de calor, e calculando a exergia destruída, as eficiências e os custos exergoeconômicos. Os resultados mostram que, para a mesma potência útil, o gás natural reduz o calor de combustão em 47% e o calor evacuado nos gases de escape em 75%, e diminui o custo por unidade de exergia destruída em 98%. Conclui-se que a conversão para gás natural é técnica e termoeconômica viável, embora o modelo exergético necessite ser refinado com dados experimentais.

Palavras-chave: Diesel; Eficiência energética; Gás natural; Indústria automotiva; Termoeconômica; Termoexergia

INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de energía térmica en la industria manufacturera mantiene un papel central tanto en la competitividad económica como en el impacto ambiental de los procesos productivos (Su et al., 2020). Entre estos procesos, el tratamiento térmico de aceros y, en particular, el temple concentra consumos significativos de combustibles fósiles, elevadas temperaturas de operación y pérdidas de calor que se traducen en ineficiencias energéticas y emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, el análisis termodinámico detallado de los hornos industriales se consolida como una herramienta clave para identificar oportunidades de mejora técnica y económica (Li et al., 2016). Por lo tanto, resulta fundamental caracterizar el desempeño energético de estos sistemas con el fin de orientar decisiones de optimización y cambio tecnológico.

El temple de aceros para la fabricación de componentes automotrices, como ballestas y resortes, exige ciclos térmicos controlados que garantizan propiedades mecánicas específicas, estabilidad dimensional y vida útil en servicio. Estos requisitos se logran mediante hornos que operan a altas temperaturas y que, de manera tradicional, utilizan combustibles líquidos como el diésel, cuya combustión genera tanto la energía requerida para el calentamiento del acero como emisiones contaminantes asociadas. Sin embargo, la manera en que se gestiona la energía dentro del horno y la elección del combustible condicionan de forma directa el

rendimiento global del proceso y su huella ambiental (He et al., 2025). En consecuencia, la selección del combustible adecuado se configura como una decisión estratégica que impacta tanto en los costos operativos como en el cumplimiento de objetivos ambientales.

El cambio de combustible hacia alternativas con menor contenido de carbono, como el gas natural, se ha consolidado como una estrategia de transición en múltiples instalaciones térmicas industriales, debido a su menor emisión específica de CO₂ y a una combustión más limpia frente a fuelóleos y diésel, aunque sigue siendo una fuente fósil que debe gestionarse cuidadosamente en el marco de las metas climáticas de largo plazo (Kheir Abadi y Ebrahimi-Moghadam, 2024). Asimismo, en sistemas de combustión, la sustitución de diésel por gas natural implica modificaciones en la estequiometría, la distribución de temperaturas en el hogar del horno y el perfil de gases de escape, lo que impacta tanto en el desempeño energético como en las pérdidas irreversibles del proceso (Zhang et al., 2021; Rubio y León, 2024). Por otro lado, esta transición también requiere considerar aspectos técnicos como las adaptaciones necesarias en los sistemas de combustión y las implicaciones económicas de la reconversión.

En el caso ecuatoriano, el sector industrial y, en particular, el uso de diésel en procesos térmicos, contribuye de forma importante a las emisiones nacionales de CO₂, en un contexto donde el país ha asumido compromisos formales

de reducción de gases de efecto invernadero a través de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) y estrategias de descarbonización parcial de la matriz energética. En este sentido, estas políticas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), generan presiones adicionales sobre las empresas para revisar sus tecnologías de combustión y a valorar escenarios de reconversión de combustible que permitan mantener la competitividad sin comprometer el desempeño ambiental (Oğur et al., 2025). Por lo tanto, las empresas del sector industrial enfrentan la necesidad de evaluar alternativas tecnológicas que respondan simultáneamente a presiones regulatorias y requisitos de competitividad.

Desde el punto de vista termodinámico, los diagnósticos tradicionales de hornos industriales se apoyan en balances de energía basados en la primera ley de la termodinámica, que permiten cuantificar entradas y salidas de calor y trabajo. Sin embargo, este enfoque no distingue la calidad de la energía ni la capacidad real de producir trabajo útil de las corrientes involucradas (Nie et al., 2025). El análisis exergético, fundamentado en la segunda ley de la termodinámica, introduce el concepto de exergía como medida de la “calidad” o potencial de transformación de la energía respecto a un estado de referencia ambiental, y permite identificar con mayor precisión dónde y cómo se destruye irreversiblemente ese potencial dentro del sistema de combustión y transferencia de calor (Maruf et al., 2021). De esta manera, la combinación de ambos enfoques ofrece una

visión integral del desempeño termodinámico de los procesos industriales.

Diversos estudios de hornos industriales han mostrado que, mientras las eficiencias energéticas globales pueden superar el 90 %, las eficiencias exergéticas suelen ser sustancialmente menores, reflejando altos niveles de destrucción de exergía en la cámara de combustión, en los gases de escape calientes y en pérdidas por paredes. Estos resultados evidencian que una fracción importante del potencial del combustible se disipa sin transformarse en calentamiento útil del producto, lo que refuerza la pertinencia de adoptar indicadores termo-exergéticos para comparar alternativas de diseño, de operación y de tipo de combustible en hornos de temple y recocido (Yang et al., 2023). En efecto, la identificación de las principales fuentes de irreversibilidad permite orientar medidas de mejora hacia los componentes donde el potencial de ahorro es mayor.

En paralelo, la literatura reciente ha incorporado el análisis termo-económico para vincular los indicadores energéticos y exergéticos con los costos asociados al consumo de combustible, a las pérdidas irreversibles y a las posibles medidas de mejora (por ejemplo, recuperación de calor o precalentamiento de aire) (Ouyang et al., 2021). Evaluaciones de cambio de combustible en calderas y hornos muestran que la sustitución y el rediseño de sistemas de combustión pueden reducir de forma simultánea los costos de operación y las emisiones, siempre que los escenarios consideren

precios relativos de combustibles, inversiones en adecuaciones y condiciones de operación reales. Sin embargo, estos trabajos refuerzan la necesidad de abordar los procesos térmicos bajo un enfoque integrado que combine energía, exergía, ambiente y economía (Yu et al., 2025).

No obstante, todavía son pocos los estudios que abordan hornos de temple en la industria automotriz latinoamericana desde una perspectiva termo-exergética aplicada a decisiones de cambio de combustible, particularmente en contextos donde coexisten presiones ambientales, restricciones de costo y marcos regulatorios en evolución (Bulbul et al., 2023). Esta brecha es especialmente relevante en países como Ecuador, donde la industria de autopartes se articula tanto al mercado interno como a cadenas de exportación, y donde las decisiones tecnológicas de empresas ancla pueden tener efectos multiplicadores sobre proveedores, políticas sectoriales y estrategias de mitigación de emisiones (Al-Hamed y Dincer, 2020). Por ello, la investigación en este contexto específico aporta conocimiento relevante para la toma de decisiones empresariales y el diseño de políticas industriales.

En este marco, el análisis termo-exergético en una fábrica de resortes, ubicada en la ciudad de Cuenca (provincia del Azuay, Ecuador), constituye un caso de estudio representativo (Tikadar et al., 2021). La empresa produce ballestas para la industria automotriz y concentra una parte significativa de su consumo energético en la zona de tratamientos térmicos, donde el proceso de temple se realiza en hornos que

emplean diésel como combustible principal. Ante su compromiso con filosofías de producción más limpia y alineación con los ODS, la empresa se plantea la posibilidad de sustituir el diésel por gas natural en los hornos de temple como estrategia de mejora tecnológica y ambiental (Chong et al., 2016). Así, el estudio ofrece respuestas a una necesidad práctica de la industria y a un vacío de conocimiento en el contexto latinoamericano.

El presente análisis incluye balances de energía y exergía, así como simulaciones con diésel y gas natural para comparar la exergía destruida y el desempeño energético del horno bajo cada escenario de combustible (Muth et al., 2005). Sobre esta base, el objetivo de este artículo es analizar termo-exergéticamente el cambio de combustible diésel-gas natural en hornos industriales de temple, para evaluar su impacto en la eficiencia energética y exergética del proceso, en la destrucción de exergía y en indicadores termo-económicos asociados al consumo de combustible y a las emisiones (Tetik y Karagoz, 2025). Para ello, se formulan y resuelven balances de energía y exergía en estado estacionario, se modela la combustión de ambos combustibles y se compara el desempeño del horno bajo escenarios de operación equivalentes. Los hallazgos contribuyen a la literatura al proporcionar evidencia cuantitativa sobre las ventajas termo-exergéticas del cambio de combustible en un contexto industrial específico.

Finalmente, el artículo se organiza como sigue: en la sección de Método se describe el caso de estudio, el sistema analizado y el

procedimiento de modelado termo-exergético y termo-económico; a continuación se presentan y discuten los resultados del análisis para los escenarios con diésel y gas natural; y, por último, se exponen las principales conclusiones y recomendaciones para la empresa y para futuras investigaciones en el ámbito de la eficiencia energética y exergética de procesos de tratamiento térmico en la industria automotriz.

MATERIALES Y MÉTODO

El presente estudio se enmarca en un enfoque metodológico cuantitativo, dado que se fundamenta en la medición numérica de variables termodinámicas y económicas, así como en la aplicación de modelos matemáticos para cuantificar y comparar indicadores de desempeño energético, exergético y económico. Se desarrolló un estudio de caso de tipo analítico-comparativo aplicado al horno industrial de temple de una fábrica de resortes ubicada en Cuenca, Ecuador, en profundidad el desempeño termo-exergético del proceso de temple y contrastar sus características bajo dos escenarios de combustible alternativos. El diseño de investigación es no experimental y transversal, ya que las variables independientes asociadas al tipo de combustible no fueron manipuladas experimentalmente, sino analizadas en condiciones reales de operación, y las mediciones se realizaron para un estado estacionario específico del proceso.

Desde el punto de vista metodológico, el objetivo fue cuantificar y comparar el desempeño termo-exergético y termo-económico del proceso

de temple de ballestas cuando el horno opera con diésel (caso base) y con gas natural (caso alternativo), manteniendo constantes las condiciones de operación del proceso productivo (Rinik et al., 2024). Esta aproximación permitió aislar el efecto del cambio de combustible sobre los indicadores de interés, facilitando la comparación entre escenarios bajo condiciones equivalentes de demanda térmica y nivel de producción.

El sistema analizado corresponde a un horno de temple de tipo batch, de cámara rectangular revestida con material refractario y aislante, utilizado para el tratamiento térmico de ballestas de acero aleado equivalente a la especificación AISI/ASTM/SAE 5160. El ciclo de temple considerado comprende el calentamiento de las platinas desde temperatura ambiente hasta el rango de 815-895 °C, el tiempo de permanencia necesario para completar la austenización y la posterior extracción para enfriamiento en aceite de temple. El horno opera actualmente con diésel atomizado y aire de combustión, con una estrategia de carga y descarga continua que mantiene la cámara ocupada durante la jornada de trabajo (Mathevon et al., 2024).

Para la modelación termo-exergética se utilizó información técnica proporcionada por la empresa, que incluyó el caudal másico de combustible, las dimensiones de la cámara, el inventario de materiales refractarios y las propiedades del acero y del aceite de temple, complementada con datos obtenidos de tablas termodinámicas estándar. Se adoptaron como supuestos principales el régimen permanente de

operación del horno, la combustión completa del combustible, el uso de aire seco con una composición volumétrica del 21 % de O_2 y 79 % de N_2 , con un 20 % de exceso de aire, el desprecio de los efectos de energía cinética y potencial de las corrientes, la definición de un ambiente de referencia a una temperatura de 288,15 K y presión atmosférica, y la consideración de paredes externas del horno a temperatura casi uniforme, con pérdidas térmicas evaluadas por conducción a través del revestimiento y convección hacia el ambiente (Fierro et al., 2020).

En el escenario base con diésel se formuló el balance de masa a partir de la reacción estequiométrica de combustión del diésel, usando su composición elemental promedio (C, H, O, N, S) y el caudal másico real suministrado por la fábrica (3,5 gal/h convertidos a 12,3 kg/h). Se calcularon los flujos molares de combustible, aire y gases de combustión. Luego se estableció el balance de energía para un sistema abierto en estado estacionario, donde el calor liberado por el combustible se reparte entre el calentamiento del acero, las pérdidas por paredes y la energía sensible de los gases de escape. Las propiedades termodinámicas (entalpías específicas de las especies gaseosas) se obtuvieron por interpolación de tablas y se implementó en Matlab un algoritmo iterativo para determinar la temperatura interna de la cámara y la temperatura de los gases de combustión que satisfacen el balance de energía (Zhou et al., 2025).

Con las temperaturas obtenidas se evaluaron

los flujos de entropía de las corrientes de entrada (acero frío y combustible) y de salida (acero caliente, gases y pérdidas de calor) mediante las expresiones de cambio de entropía por transferencia de calor y por mezcla de especies ideales. A partir del balance de entropía en régimen permanente se calculó la tasa de generación de entropía en el horno. Finalmente, se obtuvo la exergía destruida como producto de la temperatura de referencia (T_0) y la tasa de generación de entropía, lo que permitió cuantificar la pérdida de potencial de trabajo asociada a las irreversibilidades internas del proceso de temple con diésel (Torrubia et al., 2023).

Para el escenario alternativo se consideró gas natural con composición simplificada como metano puro. Se planteó la reacción de combustión del CH_4 con aire y se formularon los balances molares de reactantes y productos. El balance de energía se estableció imponiendo que el calor útil ($\sum \dot{Q}_{\text{útil}}$) absorbido por el acero y las pérdidas térmicas ($\dot{Q}_{\text{pérd}}$) del horno se mantuvieran iguales al caso base, de modo que la diferencia entre el calor liberado por el diésel y el contenido en los gases de escape se igualó a la diferencia correspondiente para el gas natural. Bajo esta condición se determinó el flujo molar de metano requerido y se repitió el procedimiento de cálculo de entalpías, entropías, generación de entropía (\dot{S}_{gen}) y exergía destruida ($\dot{E}_x, d_{\text{estr}}$), empleando nuevamente Matlab y tablas termodinámicas (Mio et al., 2023).

En ambos escenarios se obtuvieron como resultados principales la temperatura de la

cámara de calentamiento, la temperatura de los gases de escape, el $\dot{Q}_{\text{útil}}$ transferido al acero, las pérdidas por paredes ($\dot{Q}_{\text{pérd}}$), la $\dot{E}_{x,d_{\text{estr}}}$ en el proceso y las eficiencias energética y exergética globales del horno. Estos indicadores permitieron comparar cuantitativamente el uso de diésel y gas natural bajo condiciones de carga y producción equivalentes (Al-Hamed y Dincer, 2021).

Con los resultados exergéticos se desarrolló el coste exergo-económico asociado a cada combustible. Primero se obtuvo la exergía destruida por unidad de masa de combustible y el coste unitario del combustible a partir de los precios de mercado reportados por la empresa (USD/kg de combustible). El coste exergo-económico unitario (ΦC_F) se definió como el cociente entre el coste del combustible y la exergía destruida por unidad de masa. Para obtener la tasa de coste asociada a las irreversibilidades (\dot{C}_d) se multiplicó por la $\dot{E}_{x,d_{\text{estr}}}$ total. Adicionalmente, se incorporaron las tasas de coste de operación y mantenimiento ($\dot{Z}_{\sigma M}$) del horno, calculadas a partir de la producción horaria de ballestas, el coste operativo por unidad producida y los gastos de mantenimiento anuales prorrateados en horas efectivas de operación (Hesampour et al., 2022).

Finalmente, se calculó el factor exergo-económico de operación y mantenimiento (f_{OM}) como la razón $\dot{Z}_{\sigma M} / \dot{C}_d$. Este factor se empleó como indicador integrado para comparar diésel y gas natural. En el escenario con gas natural se planteó como condición de aceptación que el factor exergo-económico resultante fuera

menor o igual al obtenido con diésel, lo que permitió derivar el valor máximo admisible de la suma de costes de operación y mantenimiento para que la conversión de combustible resulte económicamente conveniente (Effatpanah et al., 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se presentan a partir de la aplicación de los balances de masa, energía y entropía formulados para el horno de temple bajo los dos escenarios de combustible analizados.

Balance de masa y energía

El balance molar (véase Tabla 1) muestra que el escenario base con diésel requiere un flujo de combustible de 2,32 kmol/h y 9,15 kmol/h de aire, mientras que el escenario con gas natural utiliza 1,16 kmol/h de combustible y 11,04 kmol/h de aire para mantener la misma demanda térmica de temple. Como resultado, el número total de moles de gases de combustión es ligeramente mayor con gas natural que con diésel, pese a utilizarse la mitad del flujo molar de combustible. Esta diferencia se relaciona con la estequiometría de la combustión y con el mayor requerimiento de aire para el metano, frente a la mezcla más rica en carbono e impurezas del diésel.

Tabla 1

Balance molar

Componente	Flujo molar diésel (kmol/h)	Flujo molar gas natural (kmol/h)
Combustible	2,32	1,16
Aire	9,15	11,04
Gases	11,38	12,20

Nota. Los flujos corresponden a las condiciones de operación del horno de temple bajo cada escenario de combustible.

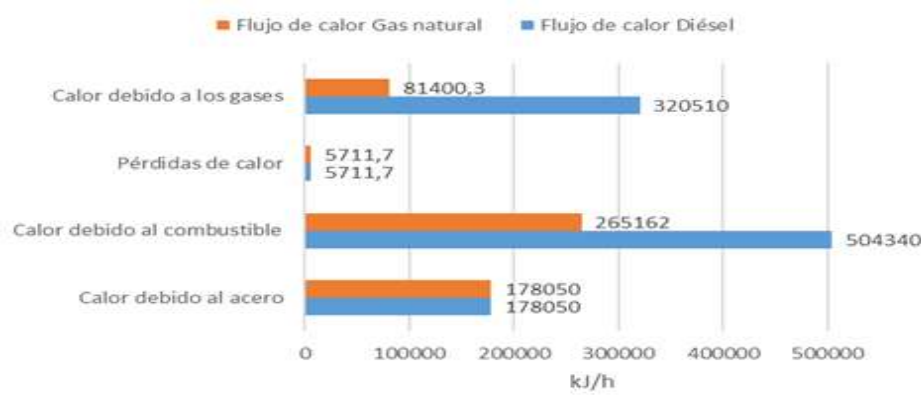
En el balance de energía (véase Figura 1), el calor útil absorbido por el acero se fijó en 178050 kJ/h para ambos escenarios, así como las pérdidas térmicas por paredes (5711,7 kJ/h), lo que permite comparar exclusivamente el efecto del combustible. Bajo estas condiciones, el calor suministrado por el diésel asciende a 504340 kJ/h, mientras que el gas natural aporta 265162 kJ/h. El calor transportado por los gases de escape es de 320510 kJ/h en el caso del diésel y solo 81400,3 kJ/h con gas natural, lo que indica que una fracción mucho mayor de la energía del diésel se abandona en forma de gases calientes, mientras que el gas natural utiliza más eficientemente el contenido energético del combustible para calentar la carga. Si se

considera la fracción de calor útil en el acero respecto al calor liberado por el combustible, el escenario con gas natural presenta una eficiencia energética aparente significativamente superior al del diésel, al destinar una mayor proporción del calor de combustión al calentamiento efectivo de las platinas.

En términos prácticos, este resultado implica que, para lograr el mismo perfil térmico de temple, el horno requeriría una cantidad sustancialmente menor de energía primaria cuando opera con gas natural, reduciendo el consumo específico de combustible y las emisiones asociadas por unidad de producto tratado.

Figura 1

Balance de energía del horno de temple bajo ambos escenarios de combustible



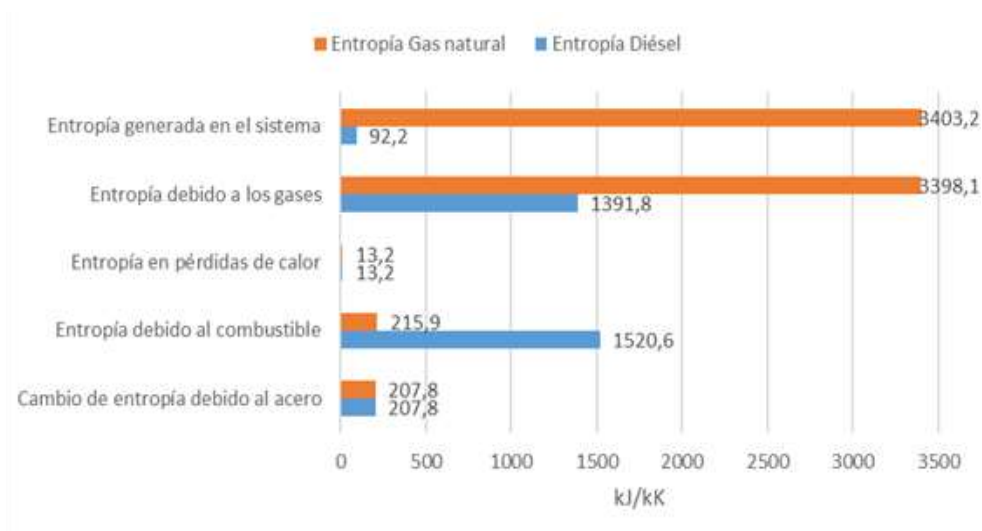
Análisis de entropía y exergía

El balance de entropía (véase Figura 2) confirma que el aporte de entropía asociado al calentamiento del acero y a las pérdidas de calor es idéntico en ambos combustibles, coherente con la condición de mantener el mismo proceso de temple. Las diferencias aparecen en los términos ligados a la combustión: la entropía

asociada al combustible es mucho mayor en el caso del diésel (1520,6 kJ/h·K) que en el del gas natural (215,9 kJ/h·K), mientras que la entropía transportada por los gases de escape es menor para el diésel (1391,8 kJ/h·K) que para el gas natural (3398,1 kJ/h·K). Como consecuencia, la entropía generada en el sistema se estima en 92,2 kJ/h·K para el diésel y 3403,2 kJ/h·K para el gas natural.

Figura 2

Balance de entropía del proceso de temple



A partir de estos balances de entropía se obtienen valores de exergía destruida de 26567,43 kJ/h para el escenario con diésel y 980632,08 kJ/h para el escenario con gas natural. Numéricamente, el modelo sugiere una destrucción de exergía mucho mayor cuando se emplea gas natural, lo que, interpretado de manera literal, implicaría un proceso globalmente más irreversible.

Sin embargo, este resultado es contraintuitivo frente al comportamiento energético observado y frente a la expectativa teórica de que, a igual calor útil, un combustible

que reduce las pérdidas en gases calientes debería presentar una destrucción de exergía relativamente menor o, al menos, comparable. Esta aparente contradicción apunta a la sensibilidad del cálculo exergético frente a los supuestos de modelación (estado de referencia, definición de corrientes de entrada y salida, tratamiento de la exergía química del combustible y de la mezcla de gases, aproximaciones en las propiedades termodinámicas).

En este sentido, los resultados exergéticos deben interpretarse con cautela: más que como

valores absolutos, como una indicación de que el esquema de cálculo adoptado para el gas natural concentra una parte importante de la destrucción de exergía en la cámara de combustión y en el flujo de gases, lo que sugiere la necesidad de refinar el modelo para representar de forma más realista el reparto de exergía entre acero, gases y pérdidas.

Análisis termo-económico

El análisis termo-económico integra los resultados energéticos y exergéticos con los costes de los combustibles y de operación del horno. El coste exergo-económico unitario obtenido es de $2,3 \times 10^{-4}$ USD/kJ para el diésel y de $3,6 \times 10^{-6}$ USD/kJ para el gas natural, lo que implica una reducción de casi dos órdenes de magnitud en el coste por unidad de exergía destruida cuando se emplea el combustible alternativo. Bajo los precios reportados, el uso de gas natural permite abaratar de forma significativa el coste asociado a las irreversibilidades del proceso de temple.

El f_{OM} se calcula en 0,73 para el escenario con diésel, mientras que para el gas natural se establece como condición de diseño que sea menor o igual a este valor. Con esta restricción, el flujo de coste por operación y mantenimiento admisible para el gas natural resulta menor o igual a 9,54 USD/h, frente a los 16,45 USD/h del diésel. Esta diferencia indica que existe un margen económico amplio para absorber los costes adicionales derivados de la conversión del sistema de combustión (adecuaciones de quemadores, tuberías, sistemas de seguridad) y, aun así, mantener o mejorar la competitividad del proceso de temple.

Tabla 2

Balance termo-económico

Componente	Diisel	Gas natural
Coste exergo-económico unitario	$2,3 \times 10^{-4}$ USD/kJ	$3,6 \times 10^{-6}$ USD/kJ
Factor exergo-económico	0,73	$\leq 0,73$
Flujo de coste por operación y mantenimiento	16,45 USD/h	$\leq 9,54$ USD/h

Nota. Se presenta la comparación de indicadores termo-económicos entre ambos escenarios de combustible.

DISCUSIÓN

En conjunto, los balances de masa y energía muestran que el gas natural permite reducir de manera importante el calor de combustión requerido y las pérdidas por gases calientes, manteniendo sin cambios el calor útil en el acero y las pérdidas estructurales del horno. Desde una perspectiva operativa y ambiental, esto se traduce en un menor consumo de energía primaria para un mismo nivel de producción y en una reducción directa de emisiones de CO₂ y de contaminantes locales, especialmente si se considera que el diésel incorpora compuestos azufrados que incrementan la masa y el impacto ambiental de los gases de combustión.

Los hallazgos del presente estudio coinciden parcialmente con los resultados reportados por Nie et al. (2025), quienes observaron que la sustitución de diésel por gas natural en sistemas de combustión reduce significativamente las pérdidas térmicas en los gases de escape. No obstante, mientras que en el estudio mencionado la mejora en eficiencia energética se asocia principalmente a diferencias en el poder calorífico de los combustibles, el presente trabajo incorpora adicionalmente la perspectiva exergética que permite cuantificar la calidad de la energía utilizada. Por otra parte, los resultados difieren de los encontrados por Tetik y Karagoz (2025), quienes reportaron eficiencias exergéticas similares entre diésel y gas natural en motores de combustión interna. Esta diferencia puede atribuirse a las particularidades del proceso de temple, donde la transferencia de calor al sólido

presenta características distintas a la conversión de energía en motores, así como a los supuestos de modelación adoptados en cada estudio.

Desde la perspectiva termo-económica, los resultados obtenidos concuerdan con las conclusiones de Ouyang et al. (2021), quienes afirmaron que el análisis integrado de energía, exergía y costos permite identificar escenarios de cambio de combustible con ventajas económicas y ambientales simultáneas. Sin embargo, el presente estudio avanza un paso adicional al incorporar un factor exergo-económico que establece un umbral cuantitativo para la viabilidad de la conversión, proporcionando un criterio de decisión más robusto para la empresa. Asimismo, la reducción del 98 % en el coste por unidad de exergía destruida constituye un hallazgo significativo que supera las mejoras reportadas en estudios previos de cambio de combustible en sistemas térmicos industriales, lo que sugiere un potencial particularmente alto de ahorro en hornos de temple.

Por otra parte, los resultados exergéticos tal como fueron calculados ponen de relieve la importancia de mejorar la calidad de los datos y de revisar el tratamiento de la exergía química en futuros estudios. En particular, la magnitud de la exergía destruida en el caso del gas natural sugiere que el modelo actual tiende a penalizar fuertemente la combustión de metano en la forma en que se ha formulado el balance de entropía. Aun así, el análisis termo-económico confirma que, bajo las condiciones de costo adoptadas, el cambio de diésel a gas natural es termo-económicamente viable y abre una

ventana de oportunidad para introducir medidas complementarias, como recuperación de calor en los gases de escape u optimización del aislamiento térmico, que podrían elevar aún más la eficiencia exergética real del sistema.

El presente estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el análisis se basa en un modelo estacionario que no captura las fluctuaciones transitorias inherentes al ciclo de carga y descarga del horno batch, lo que puede afectar la representatividad de los balances de energía y exergía bajo condiciones reales de operación. En segundo lugar, la composición del gas natural se simplificó como metano puro, mientras que la composición real incluye otros hidrocarburos como etano, propano y butano en proporciones variables, lo que introduce incertidumbre en los cálculos estequiométricos y termodinámicos. En tercer lugar, no se realizó validación experimental del modelo mediante mediciones in situ de temperaturas de pared, composición de gases de escape y flujos másicos, lo que limita la capacidad de generalizar los resultados a otras instalaciones.

Adicionalmente, el análisis termo-económico se fundamenta en precios de combustible reportados por la empresa que pueden variar significativamente en el tiempo y que no incluyen estructuras tarifarias diferenciadas para usuarios industriales de gas natural en Ecuador. Asimismo, el factor exergo-económico adoptado como criterio de viabilidad no considera el costo de capital de la conversión del sistema de

combustión ni los costos asociados a permisos, certificaciones y capacitación de personal. Finalmente, el alcance del estudio se circunscribe al horno de temple de ballestas de una empresa específica, por lo que la extrapolación de conclusiones a otros hornos, procesos de tratamiento térmico o contextos industriales debe realizarse con cautela y considerando las particularidades técnicas y económicas de cada caso.

CONCLUSIONES

El análisis termo-exergético del horno de temple de la fábrica de resortes muestra que el cambio de combustible de diésel a gas natural permite mantener inalterado el proceso de temple en términos de calor útil transferido al acero y pérdidas estructurales del horno, reduciendo de forma importante la energía primaria requerida para alcanzar el mismo régimen de operación del horno. Esto se evidencia en la disminución del calor aportado por el combustible y del calor evacuado en los gases de escape cuando se emplea gas natural.

Desde la perspectiva energética, el gas natural utiliza una fracción mayor de la energía de combustión para calentar efectivamente la carga, mientras que el diésel deriva una proporción considerable del calor a los gases de salida. En consecuencia, esta diferencia se traduce en un menor consumo específico de combustible por unidad de producto tratado y en una reducción potencial de las emisiones asociadas al proceso de temple.

El análisis termo-económico indica que el coste exergo-económico unitario es significativamente menor con gas natural que con diésel, y que el factor exergo-económico admite un rango de costes de operación y mantenimiento compatible con las inversiones necesarias para la conversión del sistema de combustión. Bajo las condiciones de precios consideradas en el estudio, el escenario con gas natural resulta, por tanto, técnica y económicamente viable para la empresa.

Los resultados exergéticos obtenidos, si bien permiten comparar escenarios, evidencian sensibilidad a los supuestos de modelación. La magnitud de la exergía destruida en el caso del gas natural sugiere la necesidad de refinar el modelo, incorporando datos experimentales de temperaturas y composiciones de gases y un tratamiento más detallado de la exergía química, antes de extraer conclusiones absolutas sobre el grado de irreversibilidad del sistema. No obstante, el estudio confirma que el análisis combinado de energía, exergía y costes constituye una herramienta útil para evaluar decisiones de cambio de combustible en hornos de temple y orientar inversiones hacia configuraciones más eficientes y alineadas con criterios de producción más limpia.

De cara al futuro, se recomienda validar el modelo con mediciones experimentales en planta de las temperaturas reales de pared, composición de gases de escape y flujos másicos de combustible. Asimismo, se sugiere explorar esquemas de recuperación de calor de los gases de escape mediante intercambiadores de calor o

ciclos orgánicos Rankine, que permitirían aprovechar la energía residual para precalentamiento de aire de combustión u otras aplicaciones auxiliares.

De igual manera, resulta pertinente ampliar el análisis hacia indicadores ambientales explícitos, incluyendo emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno y compuestos azufrados, así como comparaciones del desempeño termo-exergético entre hornos de diferentes características constructivas y capacidades de producción. Finalmente, la aplicación de la metodología propuesta a otros tipos de hornos de tratamiento térmico, como hornos de recocido o cementación, y a combustibles alternativos como biogás o hidrógeno verde, se perfila como una línea de investigación prometedora para contribuir a la descarbonización del sector industrial metalúrgico.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

- Al-Hamed, K. H. M., y Dincer, I. (2020). Natural gas as a transitional solution for railway powering systems: Environmental and economic assessment of a fuel cell based powering system. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 80, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103347>
- Al-Hamed, K. H. M., y Dincer, I. (2021). Comparative evaluation of fuel cell based powering systems for cleaner locomotives. *Thermal Science and Engineering Progress*,

- 23, 100912.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100912>
- Bulbul, Y., Arbak, A., Karagoz, Y., Karagöz, S., Sandalci, T., y Pusat, S. (2023). Exergy and environmental analyses of natural gas and biogas fuels in an internal combustion engine at part load. *International Journal of Exergy*, 42(4), 337-349.
<https://doi.org/10.1504/IJEX.2023.135836>
- Chong, Z. R., Yang, S. H. B., Babu, P., Linga, P., y Li, X.-S. (2016). Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, 162, 1633-1652.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.061>
- Effatpanah, S. K., Ahmadi, M. H., Delbari, S. H., y Lorenzini, G. (2022). Energy, exergy, exergoeconomic and emergy-based exergoeconomic (emerGoeconomic) analyses of a biomass combustion waste heat recovery organic rankine cycle. *Entropy*, 24(2), 209.
<https://doi.org/10.3390/e24020209>
- Fierro, J. J., Escudero-Atehortua, A., Nieto-Londoño, C., Giraldo, M., Jouhara, H., y Wrobel, L. C. (2020). Evaluation of waste heat recovery technologies for the cement industry. *International Journal of Thermofluids*, 7-8, 100040.
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100040>
- He, T., Chen, J., Gundersen, T., Lin, W., Chen, L., y Zhang, K. (2025). Exergy efficiency improvement by compression heat recovery for an integrated natural gas liquefaction-CO₂ capture-NGL recovery process. *Applied Thermal Engineering*, 259, 124812.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124812>
- Hesampour, R., Taki, M., Fathi, R., Hassani, M., y Halog, A. B. (2022). Energy-economic-environmental cycle evaluation comparing two polyethylene and polycarbonate plastic greenhouses in cucumber production (from production to packaging and distribution). *Science of the Total Environment*, 828, 154232.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154232>
- Kheir Abadi, M., y Ebrahimi-Moghadam, A. (2024). An innovative sustainable multigeneration energy system (electricity, heat, cold, and potable water) based on green hydrogen-fueled engine and dryer. *Applied Energy*, 376, 124184.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124184>
- Li, X.-S., Xu, C.-G., Zhang, Y., Ruan, X.-K., Li, G., y Wang, Y. (2016). Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review. *Applied Energy*, 172, 286-322.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.101>
- Maruf, M. H., Rabbani, M., Ashique, R. H., Islam, M. T., Nipun, M. M. K., Haq, M. A. ul, Al Mansur, A., y Shihavuddin, A. S. M. (2021). Exergy based evaluation of power plants for sustainability and economic performance identification. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101393.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101393>
- Mathevon, A., Massardier, V., Fabrègue, D., Douillard, T., Rocabois, P., Ollagnier, A., y Perez, M. (2024). Tempering of dual phase steels: Microstructural evolutions and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 908, 146762.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146762>
- Mio, A., Barbera, E., Massi Pavan, A., Danielis, R., Bertucco, A., y Fermeglia, M. (2023). Analysis of the energetic, economic, and environmental performance of hydrogen utilization for port logistic activities. *Applied Energy*, 347, 121431.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121431>
- Muth, D., Rodriguez, E., Sales, C. M., Retallick, W. B., y Churchill, S. W. (2005). An economic and thermodynamic evaluation of the conversion of natural gas to liquid fuels using an ion-transport membrane. En *AIChE 2005 Annual Meeting Proceedings* (pp. 4224-4236). AIChE.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33645651177&partnerID=40&md5=cab9c081d98f1ccb8f4ab61fed77c79f>
- Nie, J., Jin, S., Wang, J., Yi, Y., Su, W., y Wu, B. (2025). Exergy characteristics and correlation analysis of diesel-natural gas dual-fuel premixed combustion. *Applied Thermal Engineering*, 278, 127468.

- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127468>
- Oğur, E., Koc, A., Yagli, H., Köse, Ö., y Koc, Y. (2025). Shifting to lower carbon emission for aircraft: An alternative fuel evaluation. *Energy*, 316, 134426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134426>
- Ouyang, T., Wang, Z., Wang, G., Zhao, Z., Xie, S., y Li, X. (2021). Advanced thermoeconomic scheme and multi-objective optimization for exploiting the waste heat potentiality of marine natural gas engine. *Energy*, 236, 121440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121440>
- Rinik, R. A., Islam, N., Ehsan, M. M., y Khan, Y. (2024). Design of gravity assisted heat exchanger and its application on enhanced waste heat recuperation utilizing organic Rankine and LNG system. *International Journal of Thermofluids*, 24, 100822. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100822>
- Rubio, A., y León, B. (2024). Actividades deportivas para mejorar el aprendizaje en la materia de física. *Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano*, 5(2), 398-409. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v5i2.139>
- Su, Z., Ouyang, T., Chen, J., Xu, P., Tan, J., Chen, N., y Huang, H. (2020). Green and efficient configuration of integrated waste heat and cold energy recovery for marine natural gas/diesel dual-fuel engine. *Energy Conversion and Management*, 209, 112650. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112650>
- Tetik, T., y Karagoz, Y. (2025). Exergetic, economic, and environmental impact assessments of a natural gas-diesel fuel blended internal combustion engine. *International Journal of Exergy*, 47(1), 1-11. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2025.146410>
- Tikadar, D., Gujarathi, A. M., y Guria, C. (2021). Safety, economics, environment and energy based criteria towards multi-objective optimization of natural gas sweetening process: An industrial case study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104207. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104207>
- Torrubia, J., Valero, A., y Valero, A. (2023). Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107281. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107281>
- Yang, X., Zou, J., Lei, Q., Lu, X., y Chen, Z. (2023). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of a novel power generation system for LNG-fueled ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 1219. <https://doi.org/10.3390/jmse11122219>
- Yu, S., Chen, R., Zhao, Z., y Wei, F. (2025). Multi-aspect evaluation and optimization of a tri-generation scheme integrating a geothermal power plant with a salinity-gradient solar pond. *Energy*, 320, 135234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135234>
- Zhang, J., Alotaibi, M. A., y Wang, M. (2024). Thermo-enviro-economic analyses of a landfill biogas-fed polygeneration process combined with a liquefied natural gas cold energy utilization unit. *Applied Thermal Engineering*, 257, 124325. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124325>
- Zhang, L., Xue, Y., Xie, Q., y Ren, Z. (2021). Analysis and neural network prediction of combustion stability for industrial gases. *Fuel*, 287, 119507. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119507>
- Zhou, J., Tang, N., Lua, A. C., y Duan, F. (2025). Environmental and economic viability of a dual-fuel marine engine using liquefied natural gas and diesel. *Applied Thermal Engineering*, 279, 127859. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127859>