

Comparación termodinámica del ciclo Otto ideal y real en vehículos livianos urbanos: Revisión sistemática

Thermodynamic comparison of ideal and real Otto Cycle in light urban vehicles: Systematic review

Hernan Herrera-Contreras¹ , Milton Bautista-Romero² , Alex Moncayo-Condo³ , Nexar Barreto-Anchundia⁴ , Darwin Chele-Sancán⁵ 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, hherrerac@uteq.edu.ec, Quevedo - Ecuador

² Universidad Técnica de Cotopaxi, milton.bautista6483@utc.edu.ec, La Maná - Ecuador

³ Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, alexmoncayo@itscv.edu.ec, Pueblo Viejo - Ecuador

⁴ Investigador Independiente, nexarbarretoanchundia@gmail.com, Quevedo - Ecuador

⁵ Universidad Internacional del Ecuador, dachelesa@uide.edu.ec, Guayaquil - Ecuador

Autor para correspondencia: hherrerac@uteq.edu.ec

RESUMEN

El ciclo Otto es el modelo termodinámico base de los motores de encendido por chispa. La diferencia entre el rendimiento del ciclo ideal y el del motor real condiciona la eficiencia, el consumo y las emisiones del parque vehicular ligero, con una magnitud dependiente de las condiciones de operación latinoamericanas. El objetivo fue sintetizar la literatura que compara ambos rendimientos en vehículos urbanos ligeros entre 2019 y 2025, con énfasis regional. Se aplicó una revisión sistemática conforme a PRISMA y el riesgo de sesgo se evaluó mediante ROBINS-I. La heterogeneidad del corpus impidió la agregación estadística, por lo que la síntesis fue narrativa estructurada. Las 15 fuentes incluidas atribuyen la brecha a las irreversibilidades del proceso, sobre todo a las pérdidas de calor y fricción. Las estrategias documentadas para reducirla —aumento de la relación de compresión y modificación de la geometría de la cámara— reportan incrementos de potencia y par junto con disminuciones del consumo y de las emisiones de CO y HC. La agenda regional sigue prioridades locales: en Ecuador predominan los motores de pequeña cilindrada y en Brasil los biocombustibles. Optimizar el rendimiento vehicular exige calibrar cada intervención según las condiciones reales de operación de cada país.

Palabras clave: Ciclo Otto; Consumo de combustible; Eficiencia del motor; Emisiones; Termodinámica; Vehículos urbanos.

ABSTRACT

The Otto cycle is basic thermodynamic model for spark-ignition engines. The difference between the performance of the ideal-cycle and that of the engine determines the efficiency, fuel consumption, and emissions of the light-duty vehicle fleet, with the magnitude of this difference depending on operating conditions in Latin America. The objective was to synthesize the literature comparing these two-performance metrics in light-duty urban vehicles published between 2019 and 2025, with a regional focus. A systematic review was conducted in accordance with PRISMA, and the risk of bias was assessed using ROBINS-I. The heterogeneity of the corpus precluded statistical aggregation; therefore, the synthesis was a structured narrative. The 15 included sources attribute the gap to process irreversibilities, particularly heat and friction losses. The documented strategies to reduce this gap—increasing the compression ratio and modifying the combustion chamber geometry—report increases in power and torque along with decreases in fuel consumption and in CO and HC emissions. The regional agenda follows local priorities: small-displacement engines predominate in Ecuador, while biofuels are the focus in Brazil. Optimizing vehicle performance in the region requires tailoring each intervention to the actual operating conditions of each country.

Keywords: Otto cycle; Fuel consumption; Engine efficiency; Emissions; Thermodynamics; Urban vehicles.

Derechos de Autor

Los originales publicados en las ediciones electrónicas bajo derechos de primera publicación de la revista son del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-4.0 Internacional](#).



Citar como:

Herrera Contreras, H. D., Bautista-Romero, M., Moncayo-Condo, A., Barreto-Anchundia, N., & Chele-Sancán, D. (2026). Comparación termodinámica del ciclo Otto ideal y real en vehículos livianos urbanos: Revisión sistemática. *CONECTIVIDAD*, 7(2), e550. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v7i2.550>

1. INTRODUCCIÓN

El motor de combustión interna de encendido por chispa (SIICE) continúa siendo el sistema de propulsión principal en vehículos ligeros y soporta una parte significativa de la movilidad urbana (Korakianitis et al., 2011). SI engines using natural gas can run at higher compression ratios, thus producing higher thermal efficiencies but also increased nitrogen oxide (NO_x). A corto y medio plazo, la electrificación no cambiará la inercia de la flota vehicular predominante ni alterará las previsiones de la industria, particularmente en las economías en desarrollo. Por lo tanto, en los próximos años, aumentar la eficiencia del SIICE será de mayor importancia que invertir en tecnologías alternativas (International Energy Agency [IEA], 2023). Estos motores siguen los principios del ciclo Otto, el primer y más importante ciclo termodinámico para su teoría y desarrollo (Heywood, 1988).

Hoy existe una necesidad dual: optimizar la eficiencia energética y satisfacer una legislación ambiental cada vez más rigurosa. Por esta razón, deben analizarse las discrepancias entre el comportamiento del ciclo y su funcionamiento real en el motor (López et al., 2020). El ciclo Otto ideal describe el rendimiento más alto que un SIICE puede alcanzar y lo define mediante cuatro procesos reversibles: compresión adiabática, adición de calor a volumen constante, expansión adiabática y cesión de calor a volumen constante (Cengel & Boles, 2002; Heywood, 1988).

Este modelo se basa en una versión simplificada de un fluido de trabajo aire con comportamiento de gas perfecto, sin fricción ni transferencia de calor, y combustión instantánea (Pulkrabek, 2004). Aunque se utiliza con mayor frecuencia debido a su simplicidad, su valor predictivo para el funcionamiento de un motor es casi nulo. El ciclo Otto real incluye una serie de irreversibilidades y limitaciones físicas, lo que resulta en una gran desviación de su arquetipo. Bajo la suposición de aire frío estándar, la eficiencia térmica del ciclo Otto ideal depende de la relación de los calores específicos del fluido de trabajo y de la relación de compresión. Aumenta con ambas, la relación de compresión y los fluidos que presentan un mayor exponente isentrópico (Cengel & Boles, 2002). Por lo tanto, la relación de compresión es el principal parámetro de diseño que influencia el límite teórico de la eficiencia. Es la razón principal por la que aparece en la literatura como un parámetro de mejora del rendimiento. Sin embargo, en la práctica, el fluido de trabajo no es aire seco. Es una mezcla de aire, combustible y el producto quemado,

y su exponente isentrópico efectivo es menor. Así, el rendimiento se ve comprometido incluso antes de considerar las pérdidas mecánicas (Heywood, 1988).

En el caso del diagrama presión-volumen, las diferencias macroscópicas entre ambos ciclos son evidentes a simple vista; el ciclo real presenta esquinas redondeadas donde el ideal mantiene vértices, presenta un lazo de bombeo en la zona de baja presión que el modelo ideal ignora casi por completo y encierra un área menor, presentando un trabajo neto menor. La combustión no se da a volumen constante sino a lo largo de una distancia angular del cigüeñal, con lo que parte del calor se pierde al liberar gases quemados y la ganancia térmica disminuye (Heywood, 1988; Pulkrabek, 2004). El adelanto del encendido compensa parcialmente este efecto, pero introduce a su vez trabajo negativo de compresión sobre gases ya en combustión, un compromiso que la calibración de cada motor debe resolver punto a punto del mapa de operación (Kirkpatrick, 2020). Sin embargo, existe una gran brecha entre la eficiencia teórica y la eficiencia práctica. Un ciclo ideal con relaciones de compresión típicas de los motores de gasolina puede tener más del 50% de eficiencia, mientras que los motores de ciclo Otto de producción tienen de un 30 a un 35% (Pulkrabek, 2004). Esto no se debe a un defecto de fabricación, sino a la duración finita de la combustión, la transferencia de calor a las paredes durante la combustión y la fase de expansión, la apertura prematura de la válvula de escape, el trabajo de bombeo durante la fase de baja presión y la fricción en el tren de transmisión (Kirkpatrick, 2020; Heywood, 1988). Cada uno de estos fenómenos puede ser considerado como la causa de la pérdida de una determinada parte del trabajo de indicación, que varía en función del régimen y de la carga, por lo que se produce esta dispersión en las pruebas de ciclo urbano.

El trabajo de Kirkpatrick (2020) y otros autores han clasificado y ordenado las causas de esta desviación en fenómenos térmicos y mecánicos básicos que destruyen el rendimiento respecto del ciclo teórico, que suelen agruparse bajo el término de pérdidas, y que son la causa de la diferencia entre la eficiencia teórica y la eficiencia real. El tamaño de la desviación depende de los retardos debidos a la geometría del conducto, al enfriamiento extraído por el sistema de refrigeración, al trabajo de bombeo de los procesos de admisión y escape y a la fricción viscosa de cojinetes, engranajes y otros elementos mecánicos (Tormos et al., 2018).

Otras fuentes de desviación son la disociación de los gases a temperaturas más altas y la

combustión incompleta, que no están incluidas en el modelo ideal (Tsirlin et al., 2025). Sopesar esta discrepancia no es sólo un problema teórico, sino que también es importante en las medidas de rendimiento de los vehículos. Un motor de ciclo Otto puede alcanzar una eficiencia térmica de entre 30 y 35 %, en condiciones normales (Pulkrabek, 2004). En comparación, un ciclo de aire estándar ideal tiene una eficiencia térmica de aproximadamente 56 % a una relación de compresión de 8:1 y un coeficiente adiabático de 1.4 (Çengel & Boles, 2002; Zhao & Song, 2025).

Esta eficiencia varía además de forma apreciable con el régimen de giro, la carga y el rendimiento volumétrico. Las pérdidas por fricción, en particular, alcanzan entre el 10 % y el 15 % del trabajo indicado en condiciones de carretera y reducen en esa proporción la potencia útil (Heywood, 1988; Tormos et al., 2018), lo cual se traduce en un incremento del consumo específico de combustible, en un perfil de emisiones contaminantes que solo el ciclo real puede describir (Reitz, 2013). NO_x, CO y UHC son generados en función de la presión, temperatura y tiempo de residencia en el cilindro, por lo que se debe llevar a cabo un análisis del ciclo real para estudiarlos (García Mariaca et al., 2025). Aunque la tecnología de postratamiento ha permitido una disminución en la producción de CO y UHC, no se ha demostrado que esta disminuya la producción de CO₂. La brecha entre las emisiones de CO₂ certificadas y las emisiones reales ha sido documentada como persistente y aún más grande en condiciones de conducción urbana, donde la eficiencia del motor se ve afectada por la congestión y la aceleración frecuente (Fontaras et al., 2017).

Tras esto, la situación en la ciudad no hace más que acentuar dichas carencias, y los ciclos de conducción utilizados para la homologación de los vehículos, como el ya superado NEDC o el más reciente WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure), no están pensados para simular el tráfico denso y variable ni la marcha intermitente de arranque y parada. Por tanto, existe una brecha entre los niveles de consumo y emisiones de CO₂ homologados y los reales en uso, que en el ciclo NEDC se estima en un 40% de media para toda Europa en 2018. La introducción del ciclo WLTP ha reducido parcialmente esta diferencia, que aún en la actualidad se mantiene en una magnitud no despreciable (Tietge et al., 2019), lo que pone de nuevo de manifiesto la necesidad de procedimientos que representen ciclos de uso cotidiano. Existen ya revisiones sistemáticas de la literatura sobre modelado de ciclos que incluyen la medición de microviajes, los modelos de Markov y las arquitecturas neuronales (Gebisa et al., 2021).

Concretamente, a nivel local, hay que tener en cuenta que las cifras de consumo y emisiones con que se homologa el parque automovilístico latinoamericano corresponden en su mayor parte a ensayos según procedimientos diseñados para el tráfico, la altitud y el tipo de combustible de Europa o de Estados Unidos. Por lo tanto, la brecha entre ciclo ideal y real se superpone en el caso de esta región a una segunda brecha entre ciclo de homologación y uso, que hay que distinguir de la primera para no atribuir al motor un defecto que en realidad es del procedimiento de ensayo (Fontaras et al., 2017; Gebisa et al., 2021).

El caso de América Latina es complejo debido a múltiples factores, como la geografía del continente, la calidad de los combustibles, la altitud de ciudades andinas como Quito o la composición de su parque automotor (Tipanluisa et al., 2017). Las condiciones de operación en altitudes elevadas, como la baja densidad del aire de admisión y la mezcla estequiométrica dentro del cilindro, se han estudiado de forma más detallada en el contexto ecuatoriano (Arroyo Terán et al., 2020; Martínez et al., 2022). Estas, junto a las condiciones propias de la circulación urbana, hacen que el motor se comporte de forma alejada de su ciclo teórico, y que, además, lo haga en grados no contemplados por los modelos clásicos (Rodríguez et al., 2016).

Pese a la relevancia del tema, no se ha localizado una revisión sistemática que compare de manera cuantificada el comportamiento térmico del ciclo Otto ideal y el del ciclo real en automóviles livianos, y menos aún referida al contexto urbano latinoamericano.

Esto se suma a la dimensión de política pública, ya que la mayoría de países de la región tienen vehículos más viejos, una lenta tasa de renovación y marcos regulatorios en transición, aunque las decisiones referentes a las normas de emisiones y consumo de combustible a menudo se basan en pruebas realizadas bajo otros contextos (Vega et al., 2024).

Por lo tanto, se debe realizar una síntesis regional del comportamiento real del ciclo Otto, no solo como un ejercicio académico, sino también para establecer demandas normativas alcanzables y para priorizar acciones que tengan el mayor impacto en la flota existente. Cerrar esa brecha es importante para que las políticas públicas del sector se basen en el comportamiento real de la flota que circula en la región.

Con la implementación de un esquema de progresivamente más estrictos límites de emisiones, políticas de biocombustibles y de planificación de transporte sostenible entre 2019 y 2025 en la

región (Vega et al., 2024), el objetivo de esta revisión sistemática es llenar el vacío de evidencia, agrupar y analizar los artículos que comparan el rendimiento termodinámico del ciclo Otto ideal y real en vehículos ligeros urbanos en Latinoamérica.

El enfoque de la revisión no solo consiste en comparar el rendimiento, el consumo de energía y el perfil de emisiones, sino que también se centra en la crítica de las metodologías de los artículos revisados para marcar tendencias en el campo. Una tendencia importante es la recuperación de calor residual mediante circuitos térmicos secundarios, siendo el Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) la metodología más estudiada. Sin embargo, su viabilidad técnica, la complejidad del control dinámico y su relación coste-eficacia en los sectores del automóvil y la aviación son cuestiones que aún requieren más investigación, aunque la Peris et al., (2013) incluye observaciones preliminares que no permiten llegar a conclusiones definitivas en estos asuntos. De igual forma, es pertinente una comparación sistemática de los sistemas de propulsión alternativos, como sucede con los vehículos eléctricos híbridos (HEV) y los híbridos enchufables (PHEV), siempre desde la perspectiva de uso en entorno urbano. Diversos estudios documentan que estas tecnologías pueden operar con emisiones locales nulas en determinados tramos urbanos (Plötz et al., 2021; Pielecha et al., 2022).

Sin embargo, el impacto de esta posibilidad depende del ciclo de conducción, la estrategia de gestión de energía y el estilo de conducción (Plötz et al., 2021; Pielecha et al., 2022), que determinarán la eficiencia ambiental y energética de los sistemas en cuestión.

Como resultado, el objetivo del trabajo es elaborar una base empírica y técnica, que sirva de referencia confiable y actualizada para investigadores, ingenieros y responsables de la formulación de políticas en la región, para el diseño e implementación de sistemas de movilidad sostenible a largo plazo.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La sección de materiales y métodos describe el protocolo de la revisión, la estrategia de búsqueda, los criterios de elegibilidad, el proceso de selección, la extracción de datos, la evaluación del riesgo de sesgo y el esquema de síntesis. A continuación, la sección de resultados y discusión presenta la selección y caracterización de los estudios, la comparación del rendimiento termodinámico, el desempeño en emisiones y consumo, los factores regionales, la interpretación de los hallazgos y las

limitaciones del trabajo. Las conclusiones cierran con las implicaciones para la ingeniería, la política pública y la agenda de investigación regional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se ha llevado a cabo de acuerdo con protocolos previamente establecidos, con el fin de garantizar la transparencia, la replicabilidad y la solidez de los resultados. La metodología utilizada sigue las pautas de los elementos de informe preferidos para revisiones sistemáticas y metaanálisis (PRISMA), que proporcionan un marco normativo explícito para reportar la evidencia (Page et al., 2021).

2.1. Protocolo y registro

Para minimizar el sesgo de los estudios incluidos en la revisión y sus resultados se redactó un protocolo de revisión a priori que incluía las preguntas de investigación, la estrategia de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, el orden de selección de los estudios, el procedimiento de extracción de datos y el plan de síntesis. Aunque el registro público de protocolos en bases de datos como PROSPERO es una buena práctica recomendada, para los propósitos de la presente revisión se utilizó un protocolo cerrado, firmado, fechado y archivado electrónicamente antes de llevar a cabo la búsqueda sistemática, para que el procedimiento no se viera influenciado por los resultados de las fases posteriores.

La síntesis tuvo tres preguntas del protocolo: (P1) ¿qué magnitud y qué causas tiene la brecha de rendimiento entre el ciclo Otto ideal y el real en los vehículos livianos urbanos?; (P2) ¿qué optimizaciones han demostrado teórica o experimentalmente reducir la brecha y qué efectos tienen sobre la potencia, el par, el consumo y las emisiones?; (P3) ¿qué variables del contexto latinoamericano afectan la magnitud de la brecha y la dirección de la investigación regional?, cada pregunta tiene un apartado dedicado a resultados y discusión.

2.2. Estrategia de búsqueda

A fin de recoger estudios relevantes publicados entre el 1 de enero de 2019 y el 30 de julio de 2025, teniendo en cuenta que la revisión se centraba en los campos de la ingeniería mecánica y de la termodinámica de los vehículos, se decidió realizar la búsqueda en bases de datos académicas de primer nivel y en buscadores de literatura gris. La búsqueda se ejecutó sobre cuatro fuentes: —SciSpace, Google Scholar, PubMed y ArXiv—, de las que procede la totalidad de los registros

recuperados. En SciSpace se utilizaron las ‘Búsqueda Profunda’ (Deep Search) y las búsquedas para las temáticas ‘Automotriz’ y ‘Experimental’ para una mejor cobertura y para conseguir el mayor número de estudios con aplicación real. Se incluyó la búsqueda en PubMed por razones de exhaustividad, a pesar de que se consideraba que su aportación iba a ser irrelevante en un campo de ingeniería. El total de resultados fue 341. El desglose por fuente fue el siguiente:

SciSpace: 319 registros (119 de la Búsqueda Profunda, 100 del Foco Automotriz y 100 del Foco Experimental).

- Google Scholar: 20 registros.
- PubMed: 1 registro.
- ArXiv: 1 registro.

Con el fin de asegurar la exhaustividad, se efectuó una búsqueda manual (hand searching) y un rastreo de citas sobre las referencias de los artículos más pertinentes, sin que se identificaran registros adicionales, lo que respalda la cobertura alcanzada por la búsqueda en bases de datos. La cadena de búsqueda se construyó sobre la base de los términos controlados y texto libre agrupados por bloques temáticos (Ciclo/Motor, Comparación, Vehículo/Contexto, Geografía) mediante el uso de operadores booleanos (AND, OR). Un ejemplo de cadena de búsqueda en la sintaxis de cada base de datos es:

“Ciclo de Otto” OR “motor de explosión” OR “motor de encendido por chispa” OR “motor de SI”) AND (termodinámica* OR “rendimiento” OR “análisis”) AND (ideal OR real OR actual OR teórico OR experimental) AND (“vehículo liviano” OR “vehículo urbano” OR “automóvil de turismo”) AND (“América Latina” OR “América del Sur” OR “América Central” OR Argentina OR Bolivia OR Brasil OR Chile OR Colombia OR Ecuador OR ...).

La estructura de términos, compuesta por cuatro bloques, se basa en el razonamiento booleano de la pregunta de revisión. El primer bloque se refiere a la delimitación del objeto técnico (ciclo Otto y motores de encendido por chispa), el segundo bloque a la inclusión de una dimensión comparativa o análisis de ciclo, el tercer bloque a la delimitación del tipo de vehículo y el cuarto a la delimitación del contexto geográfico. En este sentido, se optó por mencionar explícitamente los países de la región, en lugar de dejar que los autores hicieran uso de las etiquetas regionales, así como documentar las variantes sintácticas de cada base de datos en el protocolo, para que la

búsqueda pudiera ser replicada con exactitud.

2.3. Criterios de inclusión y exclusión

Se definieron criterios explícitos para la selección de estudios, aplicados rigurosamente durante el proceso de cribado. Los estudios fueron considerados elegibles si cumplían con la totalidad de los siguientes criterios:

- Tipo de estudio: Artículos de revistas revisadas por pares o ponencias completas de congresos.
- Idioma: Publicaciones en inglés, español o portugués.
- Periodo de publicación: Fecha de publicación comprendida entre el 1 de enero de 2019 y el 30 de julio de 2025.
- Enfoque geográfico: Estudios realizados en países de América Latina o estudios de otras regiones con aplicabilidad directa y demostrada al contexto latinoamericano.
- Tipo de vehículo: Vehículos urbanos ligeros (automóviles de pasajeros, vehículos comerciales ligeros de hasta 3,5 toneladas).
- Tipo de motor: Motores de combustión interna de encendido por chispa que operan bajo el ciclo Otto.
- Foco de la investigación: Estudios que compararan explícitamente el rendimiento termodinámico (o sus indicadores derivados) entre el ciclo Otto ideal/teórico y el ciclo real/experimental.
- Metodología: Estudios que incluyeran modelado teórico, validación experimental, simulación computacional (e.g., CFD) o una combinación de estos.

El resultado de los ensayos debía ser por lo menos uno de los siguientes: la eficiencia térmica, las emisiones de CO, CO₂, NO_x o HC, o el consumo de combustible.

Se excluyeron los artículos editoriales o de carta al editor, resúmenes de congresos, revisiones sistemáticas anteriores y los que solo trataban sobre vehículos pesados, motocicletas y motores de barcos y aeronaves, así como aquellos que probaban motores diésel, motores eléctricos de batería pura o motores de ciclo Atkinson/Miller que no se comparaban con el ciclo Otto.

De esta manera, se excluyó: i) trabajos que no hicieran la distinción entre el ciclo ideal y el ciclo real; ii) trabajos que incluyeran contextos extra-latinoamericanos sin justificar su alcance; iii) trabajos con insuficiencia metodológica o datos irreproducibles. Los criterios se ajustan

a la lógica del objeto de estudio. El hecho de que se limite a los motores de encendido por chispa de ciclo Otto (el diésel o el Atkinson/Miller distorsionarían la comparación) asegura que, al comparar un ciclo ideal con uno real, los estudios utilizados para hacer la comparación realmente digan algo sobre el tema, y no solo sobre el rendimiento volumétrico o térmico. El límite de 3,5 toneladas define el segmento de vehículo ligero que más se utiliza en las ciudades. La ventana de 2019-2025 define el período que se va a utilizar en esta síntesis, porque se basa en la evidencia que se ha acumulado después de que el WLTP y las normas regionales más recientes se hayan generalizado. Estos límites permiten mantener el foco sin diluir el análisis y sin perder de vista las condiciones reales en la región.

2.4. Proceso de selección de estudios

El proceso de selección de los 341 registros identificados se gestionó de acuerdo con el diagrama de flujo PRISMA. El detalle de cada fase se muestra en la Figura 1.

Tras la identificación, el primer paso consistió en la importación de todos los registros al gestor bibliográfico Mendeley para su deduplicación automatizada y manual. Posteriormente, el proceso se dividió en dos fases de cribado, llevadas a cabo por dos revisores independientes (Revisor A y Revisor B):

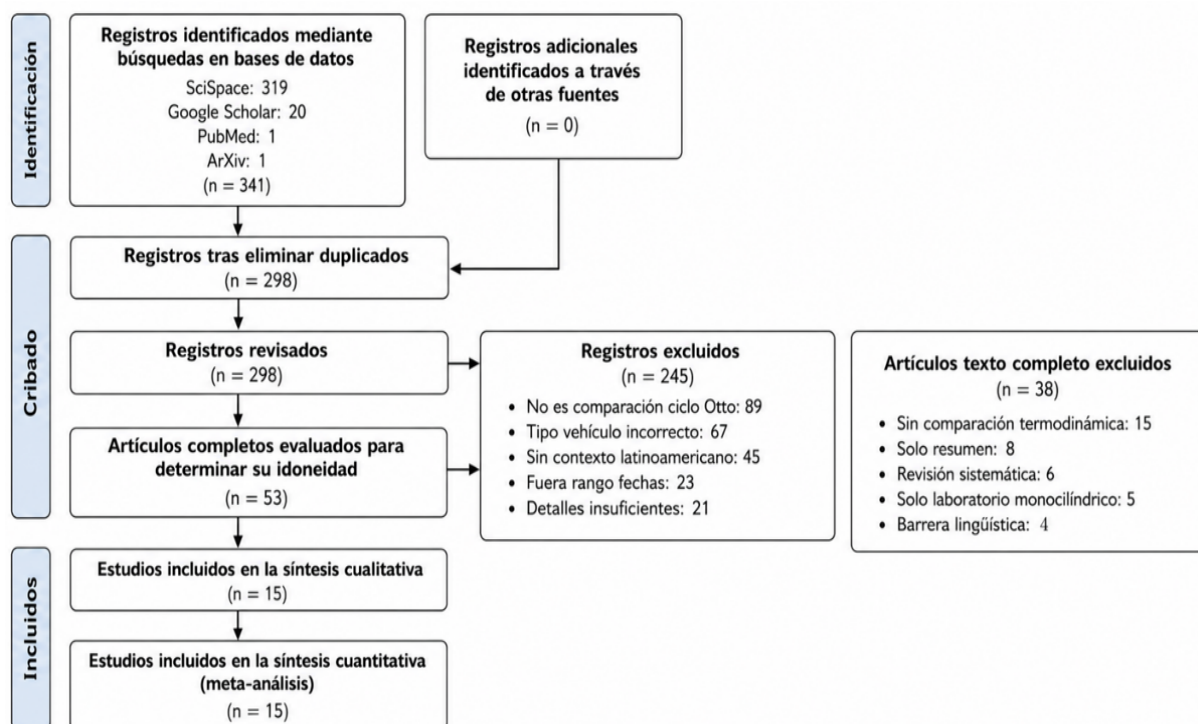
Fase 1 (Cribado de Título y Resumen): Los dos revisores examinaron de forma independiente los títulos y resúmenes de los registros únicos restantes para excluir los estudios claramente irrelevantes.

Fase 2 (Evaluación de Texto Completo): Se recuperaron los textos completos de los artículos que superaron la Fase 1. Ambos revisores evaluaron de nuevo estos artículos de forma independiente contra los criterios de inclusión/exclusión detallados en la sección 2.3. Cualquier desacuerdo en cualquiera de las fases se resolvió mediante discusión y consenso. Si no se llegaba a un consenso, se consultaba a un tercer revisor senior (Revisor C) para tomar una decisión final. Durante el cribado, las principales razones de exclusión, aplicadas en ambas fases, fueron: ausencia de comparación explícita entre los ciclos Otto ideal y real; tipos de vehículo fuera del alcance (p. ej., vehículos pesados o motocicletas); falta de aplicabilidad al contexto latinoamericano; publicación fuera del rango temporal definido; idioma distinto del inglés, español o portugués; o tipos de publicación no elegibles (p. ej., revisiones o resúmenes de congresos).

Se diseñó un formulario estandarizado de extracción de datos en Microsoft Excel para recopilar

de forma sistemática la información de cada estudio incluido. Dos revisores extrajeron los datos de manera independiente, con el fin de reducir errores y sesgos.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA para la revisión sistemática de la literatura sobre la comparación termodinámica entre los ciclos Otto ideales y reales en vehículos urbanos.



2.5. Extracción de datos

Los datos que se recogieron abarcaban varias dimensiones. Características del estudio: autores, año, país de origen y diseño experimental, teórico o mixto. Características del vehículo y motor: tipo de vehículo, cilindrada, relación de compresión y tipo de combustible. Parámetros del ciclo ideal: eficiencia teórica y supuestos del modelo. Parámetros del ciclo real: eficiencia real medida, pérdidas identificadas térmicas, de fricción, de bombeo y condiciones de prueba. También las medidas de resultado cuantitativas. Datos de eficiencia térmica ideal frente a real, emisiones en g/km o unidades similares, y consumo de combustible en L/100 km o equivalentes. Incluyendo medias e intervalos de confianza o desviaciones estándar cuando se reportaban.

Las discrepancias entre los dos revisores durante la extracción se resolvieron mediante la comparación directa de los formularios y la discusión sobre el texto original del estudio. Cuando los artículos reportaban las medidas de resultado en unidades distintas, los valores se registraron en la unidad original. Se anotó la conversión necesaria para la síntesis, pero sin transformar los datos de origen. Los datos ausentes se registraron como no informados en lugar de estimarse,

con el fin de no introducir supuestos ajenos a los estudios primarios y preservar la fidelidad a lo efectivamente medido en cada trabajo.

2.6. Evaluación del riesgo de sesgo

La calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios incluidos se evaluaron utilizando la herramienta ROBINS-I (Risk Of Bias In Non-randomised Studies - of Interventions), que es el estándar recomendado para evaluar estudios no aleatorizados como los prevalentes en la investigación en ingeniería (Sterne et al., 2016).

La evaluación fue realizada de forma independiente por dos revisores y se adaptó para el contexto de estudios termodinámicos, centrándose en siete dominios de sesgo: (D1) sesgo debido a la confusión (confounding), (D2) sesgo en la selección de los participantes (motores / sistemas), (D3) sesgo en la clasificación de las intervenciones (definición de condiciones ideales vs. reales), (D4) sesgo debido a desviaciones de las intervenciones previstas, (D5) sesgo debido a datos faltantes, (D6) sesgo en la medición de los resultados, y (D7) sesgo en la selección del resultado reportado. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 1.

El riesgo de sesgo global en cada estudio se detalla en la Tabla 1. En total, 8 de los 15 estudios tenían bajo riesgo de sesgo, 7 tenían riesgo moderado y ninguno tenía riesgo grave o crítico. El dominio con mayor riesgo de sesgo moderado fue confusión (D1) y apareció sobre todo en estudios experimentales en los que no se controlaba el efecto de la variable de interés en otras condiciones de operación. Esta distribución justifica el tratamiento conjunto y la fiabilidad general de la base de evidencia en la síntesis de los estudios.

2.7. Síntesis de datos

El enfoque de síntesis planificado en el protocolo se implementó en dos direcciones. Se realizó una síntesis narrativa cualitativa de las características de los estudios, las aproximaciones metodológicas y los hallazgos temáticos según los objetivos específicos de la revisión. También se realizó una síntesis cuantitativa de tipo metanálisis si había suficiente homogeneidad de las variables de resultado y de las unidades de medida.

Por lo tanto, dada esta condición, el protocolo utiliza un modelo de efectos aleatorios para combinar la estimación de la eficiencia térmica media o el consumo de combustible medio, ya que el diseño del motor, el diseño de la prueba y las características regionales pueden diferir de

una prueba a otra.

La heterogeneidad fue evaluada cualitativamente: por diseño, por cilindrada, por combustibles y por condiciones de prueba. Al no ser homogénea la muestra estadísticamente, no se utilizó el modelo de efectos aleatorios. Por lo tanto, toda la síntesis que se presenta en la sección 3 está estructurada en función del mecanismo de pérdida (loss mechanism) y la estrategia de optimización (optimization strategy) para que los resultados no combinados tengan una dirección de efecto comparable.

Tabla 1. Evaluación del Riesgo de Sesgo por Estudio Usando la Herramienta ROBINS-I.

Estudio	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Riesgo Global
(Aguilera et al., 2022)	L	L	L	L	L	L	L	L
(Arabaci, 2019)	M	L	L	L	L	L	L	M
(Bose et al., 2019)	L	L	L	L	L	L	L	L
(da Silva et al., 2023)	M	L	L	L	L	L	M	M
(Douvartzides et al., 2020)	M	L	L	L	L	L	L	M
(Funes-Ardoiz & Maseras, 2019)	L	L	L	L	L	L	L	L
(Rojas-Reinoso et al., 2022)	M	L	L	L	L	L	M	M
(Juwana et al., 2022)	M	L	L	L	L	L	L	M
(Kodal & Kodal, 2020)	L	L	L	L	L	L	L	L
(Paluch et al., 2021)	L	L	L	L	L	L	L	L
(Peña et al., 2020)	L	L	L	L	L	L	L	L
(Santana et al., 2024)	M	L	L	L	L	L	L	M
(Singh & Müstecaplıoğlu, 2020)	L	L	L	L	L	L	L	L
(Torres et al., 2024)	M	L	L	L	L	L	L	M
(Zhao & Song, 2025)	L	L	L	L	L	L	L	L

L = Bajo riesgo; M = Riesgo moderado; S = Riesgo grave; C = Riesgo crítico; NI = Sin información.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro del apartado de resultados se incluye la búsqueda de literatura, la selección y respuesta de estudios, así como las características de la muestra. A continuación, se presentan los resultados del análisis cualitativo por objetivo de la revisión: comparación del rendimiento termodinámico, rendimiento de emisiones, consumo de combustible y factores específicos de la región.

3.1. Selección de estudios y características

Las búsquedas en bases de datos primarias y secundarias dieron lugar a 341 resultados, que fueron depurados para eliminar duplicados. Se realizó un cribado secuencial de títulos y resúmenes, así como una revisión del texto completo de los artículos potencialmente relevantes. La aplicación de estos criterios de inclusión y exclusión dio como resultado un total de 15 estudios que componen la base de evidencia de esta revisión. El esquema de este proceso se

puede ver en el diagrama PRISMA de la Figura 1.

Los 15 trabajos aquí presentados, publicados entre 2019 y 2025 y de gran diversidad geográfica y metodológica, dan cuenta de textos producidos en Brasil, Colombia y Ecuador, así como estudios teóricos de alcance multinacional, y en todos los casos son relevantes para los fines del presente análisis.

En términos de distribución temporal, tres trabajos corresponden a 2019, cuatro a 2020, uno a 2021, tres a 2022, uno a 2023, dos a 2024 y uno a 2025. La distribución indica que la comparación entre el ciclo ideal y el ciclo real mantuvo un interés sostenido a lo largo de toda la ventana temporal, sin concentrarse en un periodo editorial determinado. Esta continuidad refuerza la consistencia interna del corpus.

3.2. Características de los estudios incluidos

En cuanto a la metodología y las características del motor y del vehículo, la literatura ofrece combinaciones que van desde el estudio teórico hasta el estudio experimental en condiciones controladas, tal y como se indica en la Tabla 2. A continuación se detallan los tres enfoques principales.

- a. Teoría y análisis: Varios estudios recientes han realizado simulaciones termodinámicas para analizar el límite de rendimiento. Por ejemplo, Zhao y Song (2025) revisaron y ampliaron los límites de eficiencia térmica teórica de seis ciclos ideales y utilizaron los datos para demostrar la validez de las correlaciones clásicas. Un enfoque diferente es el de Kodali y Kodali (2020), que compararon ciclos Otto en equilibrio irreversible y en varias configuraciones óptimas que maximizan el trabajo útil para diferentes costes. Otros estudios han examinado el caso de los ciclos de seis tiempos (Arabaci, 2019) o la adición de gases inertes (Paluch et al., 2021).
- b. Investigación Experimental. En la investigación se desarrolló la experimentación en banco de pruebas (Juwana et al., 2022; Rojas-Reinoso et al., 2022), donde se estudió el efecto de la relación de compresión en los motores monocilíndricos. También se han realizado pruebas utilizando la mezcla de etanol-gasolina y etanol-agua (Santana et al., 2024; Gil Torres et al., 2024).
- c. Modelos Híbridos (Teórico-Experimentales) y de Simulación: En algunos trabajos, el modelado y la experimentación se han combinado; por ejemplo, en el estudio del motor

BMW N54 (Douvartzides et al., 2020), se planteó un modelo analítico cuyas predicciones concordaron de manera satisfactoria con los datos del fabricante, validando así el modelo. Se han considerado motores de investigación monocilíndricos y motores comerciales multicilíndricos, y se han realizado estudios experimentales en motores de pequeña cilindrada como el motor Otto de 200 cc modificado (Rojas-Reinoso et al., 2022).

Otras investigaciones han utilizado un motor de altas prestaciones de seis cilindros y 3,0 L (BMW N54) (Douvartzides et al., 2020). La relación de compresión se ha utilizado en varios estudios con valores que oscilan entre 9,0:1 y 10,4:1 (Juwana et al., 2022). Se han usado varios tipos de combustible: gasolina, etanol (Santana et al., 2024), etanol/agua (Gil Torres et al., 2024) y en combinación con argón en la admisión (Paluch et al., 2021).

Tabla 2. Síntesis de los enfoques metodológicos y aportes principales de los estudios discutidos en la revisión.

Estudio	Enfoque	Objeto de análisis	Aporte principal
(Arabaci, 2019)	Teórico	Ciclo de seis tiempos	Análisis termodinámico de configuraciones alternativas al ciclo de cuatro tiempos
(Kodal & Kodal, 2020)	Teórico	Ciclos Otto irreversibles	Comparación de configuraciones de optimización para maximizar el trabajo disponible
(Douvartzides et al., 2020)	Mixto	Motor BMW N54, 3,0 L, seis cilindros	Método analítico validado contra datos del fabricante
(Paluch et al., 2021)	Teórico	Adición de argón al aire de admisión	Incremento de eficiencia a carga parcial de hasta 5,4 %
(Juwana et al., 2022)	Experimental	Motor monocilíndrico, RC 9,0:1 a 10,4:1	Aumento de potencia de 0,36 kW al elevar la relación de compresión
(Rojas-Reinoso et al., 2022)	Experimental	Motor de 200 cc, cámara de combustión modificada	Incrementos de 5,85 kW de potencia y 0,78 N·m de par; menores emisiones de CO y HC
(Santana et al., 2024)	Experimental	Mezclas etanol-gasolina	Eficiencia térmica máxima de 31,72 % con etanol frente a 30,51 % con gasolina
(Gil Torres et al., 2024)	Experimental	Mezclas etanol-agua de hasta 50 %	Datos de emisiones en condiciones poco exploradas
(Zhao & Song, 2025)	Teórico	Seis esquemas de ciclo ideal	Actualización de los límites de eficiencia térmica teórica

Nota: RC = relación de compresión.

Fuente: Elaboración propia a partir de los estudios incluidos.

La Tabla 2 permite apreciar el equilibrio del corpus entre los trabajos teóricos, que delimitan el techo de rendimiento y exploran configuraciones no convencionales, y los experimentales, que cuantifican mejoras alcanzables con intervenciones concretas sobre motores en servicio. Esa complementariedad sostiene la síntesis de las secciones siguientes.

3.3. Comparación del rendimiento termodinámico

Conforme a lo previsto en el apartado 2.7, la heterogeneidad de los objetivos y los métodos de los estudios incluidos impidió ejecutar el metanálisis de la brecha de eficiencia. Sin embargo, la revisión cualitativa del material incluido, muestra resultados bastante homogéneos sobre la eficiencia térmica y los factores que causan su pérdida (valores centrales en la Tabla 3). Los estudios teóricos han confirmado la validez de los principios de eficiencia, y se ha llegado a la conclusión de que la recuperación de energía de los gases de escape es más eficiente a cargas más altas del motor (Zhao & Song, 2025). Teóricamente, la adición de un gas inerte (argón) puede mejorar la eficiencia del ciclo a carga parcial en un 5,4 %, al aumentar el exponente isentrópico y disminuir las pérdidas de bombeo (Paluch et al., 2021).

En las pruebas se han medido las ganancias de eficiencia. Por ejemplo, al cambiar la relación de compresión de 9,0:1 a 10,4:1 se ha obtenido una ganancia de potencia de 0,36 kW (Juwana et al., 2022). En otras aplicaciones, al modificar la cámara de combustión de un motor de 200cc para incrementar su relación de compresión, la potencia se incrementó 5,85 kW y el par motor 0,78 N·m (Rojas-Reinoso et al., 2022). En comparación entre combustibles, se encontró que el etanol tiene un rendimiento de máxima eficiencia térmica ligeramente mayor (31,72 %) que la gasolina (30,51 %) (Santana et al., 2024).

La literatura citada ha puesto de manifiesto varias fuentes de irreversibilidad que dan lugar a una brecha entre el rendimiento óptimo y el rendimiento real:

- a. Pérdidas por transferencia de calor y fricción: Diversos autores han señalado que las irreversibilidades asociadas a procesos como la compresión y expansión no isentrópicas, la fuga de calor a través de las paredes del cilindro y las pérdidas por fricción afectan significativamente el rendimiento del ciclo real (Kodal & Kodal, 2020).
- b. Pérdidas por bombeo: Algunos estudios han abordado la mitigación de las pérdidas por bombeo en condiciones de carga parcial mediante estrategias como la reducción de la estrangulación a través de la incorporación de gas inerte, resaltando la relevancia de este aspecto en la operación de motores reales (Paluch et al., 2021).
- c. Combustión incompleta y pérdidas de escape: En estudios recientes se han medido las pérdidas de energía en caso de combustión incompleta, y se ha encontrado que son significativamente

más altas para el etanol que para la gasolina. Otra parte de la energía, entre el 32,82 % y el 34,64 %, se pierde a través de los gases de escape, con valores que oscilan entre el 32,82 % y el 34,64 %, dependiendo del tipo de combustible que se utilice (Santana et al., 2024).

Tabla 3. Resultados cuantitativos principales reportados por los estudios incluidos y la literatura de contexto.

Parámetro	Valor reportado	Condición	Fuente
A. Eficiencias térmicas y ganancias relativas (%)			
Eficiencia térmica de motores Otto en servicio	30 %–35 %	Operación típica	(da Silva et al., 2023)
Eficiencia térmica máxima etanol frente a gasolina	31,72 % frente a 30,51 %	Banco de pruebas	(Santana et al., 2024)
Ganancia de eficiencia por adición de argón	Hasta 5,4 %	Carga parcial	(Paluch et al., 2021)
B. Incrementos absolutos de potencia y par			
Aumento de potencia por RC de 9,0:1 a 10,4:1	+0,36 kW	Motor monocilíndrico en banco	(Juwana et al., 2022)
Aumento de potencia y par por modificación de cámara	+5,85 kW; +0,78 N·m	Motor de 200 cc	(Rojas-Reinoso et al., 2022)
C. Balance energético: reparto de pérdidas (%)			
Pérdidas por fricción	10 %–15 % del trabajo indicado	Conducción típica	(Heywood, 1988)
Energía disipada por los gases de escape	32,82 %–34,64 %	Según combustible	(Santana et al., 2024)
D. Consumo de combustible y brecha de homologación			
Reducción del consumo específico de combustible	Cercana al 3 %	Aumento de RC y rediseño	(Juwana et al., 2022; Rojas-Reinoso et al., 2022)
Desajuste entre consumo declarado y real (NEDC)	Cerca del 40 %	Europa, 2018	(Tietge et al., 2019)

Nota: RC = relación de compresión.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3, podemos observar que el desfase entre el ciclo ideal y el ciclo real no es homogéneo, siendo la mayor parte de la diferencia debida a la pérdida de escape y a la fricción, y que los diferentes métodos de diseño recuperan fracciones mucho más pequeñas, aunque acumulables. Esto sugiere que las técnicas deben combinarse.

3.4. Rendimiento de emisiones

El corpus incluye dos experimentos para medir las emisiones. En el primero se concluye que se pueden aumentar el rendimiento del motor y reducir drásticamente las emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos no quemados al modificar la geometría de la cámara de combustión (Rojas-Reinoso et al., 2022). En el segundo se estudia el comportamiento de las emisiones en condiciones extremas mediante mezclas de etanol y agua en altas proporciones (50% en volumen) y proporciona datos en un rango poco conocido en la literatura (Gil Torres et al., 2024).

Aunque se trata de solo dos estudios, su coherencia mutua y su consistencia con el marco termodinámico de esta revisión resultan esperables, dado que CO y HC son dos indicadores de la combustión incompleta, de modo que cualquier mejora que acerque el proceso real al ideal (mayor relación de compresión o geometría de cámara más favorable a la propagación de la llama) disminuye a la vez la brecha de eficiencia y la carga contaminante. En este sentido, la escasez de datos de NOx en el corpus es un vacío relevante, dado que las propias condiciones de alta presión y temperatura que favorecen la eficiencia, tienden también a aumentar su formación (García Mariaca et al., 2025).

3.5. Análisis del consumo de combustible

Se ha encontrado que la mejora de la eficiencia térmica del motor se traduce en una mejora del consumo de combustible. El aumento de la relación de compresión y otras modificaciones de la geometría de la cámara se asocian a reducciones del consumo específico de combustible al freno cercanas al 3 % (Juwana et al., 2022; Rojas-Reinoso et al., 2022).

Extrapolada al recorrido anual de una flota urbana, una mejora del 3 % en el consumo específico representa ahorros apreciables de combustible y de emisiones de CO₂, particularmente en parques antiguos cuya renovación tecnológica es lenta. Conviene precisar, no obstante, que las reducciones documentadas proceden de intervenciones sobre la relación de compresión y sobre la geometría de la cámara, de modo que su aplicación a la flota en circulación exige evaluar el coste unitario de cada modificación.

3.6. Factores regionales específicos

Uno de los motivos para realizar esta revisión era el contexto latinoamericano: los estudios incluidos, aunque no abordan de forma sistemática el efecto de la altitud, reflejan prioridades y condiciones locales:

- a. Contexto socioeconómico: En países como Ecuador, donde la mayor parte de los vehículos a motor son de bajas cilindradas, se ha trabajado más en la optimización del rendimiento y el consumo de combustible, en algunos casos, como por ejemplo con las optimizaciones para motores de 200cc, incluso teniendo en cuenta la realidad social del país (Rojas-Reinoso et al., 2022).
- b. Relevancia de estudios sobre Biocombustibles: En estos últimos años, el estudio del comportamiento del etanol y sus mezclas ha alcanzado gran relevancia en Brasil, la nación

con la mayor producción y consumo de biocombustible en todo el mundo, debido a la necesidad de contar con información sobre su comportamiento en diferentes condiciones de operación para la optimización de motores que operen en esta matriz energética (Santana et al., 2024; Gil Torres et al., 2024).

Si bien la literatura no toma en cuenta todos los factores regionales, como la altitud o la diferencia en la calidad de la gasolina entre países, ha quedado claro que el entorno local y la política energética del país son los que determinan el rumbo de la investigación en termodinámica vehicular en América Latina.

Además, el tipo de gasolina comercializado en algunos países de la región tiene un octanaje bajo, con efectos sobre la combustión y las emisiones reportados en Ecuador a dos cotas (Tipanluisa et al., 2017). Esta limitación de octanaje por detonación restringe la relación de compresión utilizable (Heywood, 1988), que también es el parámetro de rendimiento que esta revisión propone como el principal mecanismo de rendimiento. La potencia que se puede obtener de un motor varía según el país, de acuerdo con la calidad del combustible que se utiliza, por lo que el diseño no se puede considerar genérico, sino que es un diseño adaptado al contexto de uso. Sin embargo, la escasez de infraestructura experimental (la gran mayoría de los ensayos latinoamericanos se realizan en motores de baja cilindrada, ya sea por la composición del parque automotor o la capacidad instalada de los centros de investigación de la región) Hace que una mayor capacidad en cilindradas superiores acercaría la evidencia experimental a la realidad del tráfico en las grandes ciudades de América Latina.

3.7. Discusión

Los resultados de esta revisión sugieren que hay más en juego que la medida, en términos de intervención en el ciclo Otto real, y que podría haber implicaciones para la experiencia latinoamericana. También se presenta una revisión de la literatura, basada en ensayos experimentales de varias universidades iberoamericanas, que sugieren que la interpretación clásica de las irreversibilidades termodinámicas (pérdida de calor, fricción mecánica y trabajo de bombeo) sigue en pie.

Los resultados de los experimentos son muy homogéneos, ya que la mayor parte de los ensayos se centran en la geometría del motor (cámara de combustión y relación de compresión) y su influencia sobre la potencia y par motor. Esta tendencia se mantiene en los ensayos en

dinamómetro y en carretera, aunque la magnitud varía en función del combustible reportando también disminuciones en el consumo específico, así como en las emisiones de CO y HC. Sin embargo, esta coincidencia direccional no implica equivalencia entre los resultados, ya que cada experimento se realiza en condiciones de ensayo diferentes, y no tiene sentido comparar magnitudes. Lo que el corpus sostiene con solidez es la dirección del efecto, no la convergencia de los valores absolutos.

La segunda línea no es tanto un cambio en el fluido de trabajo. Aunque ha habido propuestas teóricas para inyectar gases inertes en un intento de reducir las pérdidas a carga parcial, los biocombustibles son el área de mayor interés en este sentido. En el caso del etanol, por ejemplo, la eficiencia térmica máxima es un poco más alta que la de la gasolina, pero la pérdida de energía por combustión incompleta es más alta, de modo que en cuestiones de diseño y puesta a punto es más relevante el balance energético.

A su vez, estas decisiones están enmarcadas en particularismos nacionales y la agenda latinoamericana responde, en la mayor parte de los casos, a la lógica de priorización socioeconómica y energética de cada país. Por ejemplo, se puede explicar la preferencia por motores de menor cilindraje en función de la composición del parque vehicular ecuatoriano y la priorización del etanol y sus mezclas por la matriz energética de Brasil. Esto significa que la investigación en la región está más alineada a su motor de investigación que a la frontera global. En la mayoría de los casos, la literatura no tiene en cuenta las variables que hacen de puente entre el test en banco y el uso real del vehículo, y que precisamente son las que deciden si una mejora medida en banco se traduce en una mejora en carretera. Sin embargo, dos de estas variables son claves en el caso regional. Una es la altitud: las ciudades andinas como Quito tienen menos aire en la cámara de combustión a menor altitud, lo que cambia la mezcla de combustibles y aire en la combustión, aumentando la diferencia entre el ciclo ideal y el real en una magnitud que no se tiene en cuenta en los ciclos de prueba (Arroyo Terán et al., 2020; Martínez et al., 2022). La otra es el estilo de conducción: la diferencia entre el rendimiento medido y el certificado persiste incluso después de pasar al WLTP (Tietge et al., 2019) y por lo tanto se requieren ensayos que reflejen las condiciones locales (Gebisa et al., 2021) para que cualquier estrategia de optimización ofrezca en uso el rendimiento prometido en banco.

Sin embargo, estos resultados también se aplican a los vehículos híbridos (HEV y PHEV) en los que el motor de combustión interna (ICE) puede no estar expuesto a las partes menos eficientes del ciclo de conducción del HEV/PHEV, aunque existe un ahorro real dependiendo del ciclo de conducción, la gestión de la energía y el comportamiento del conductor (Plötz et al., 2021; Pielecha et al., 2022). El aprovechamiento de calor residual a través de ciclos secundarios, y en particular de un ciclo orgánico de Rankine, es del mismo tipo. Sin embargo, Peris et al. (2013) cuestionan su viabilidad técnico-económica en el sector de la automoción. No es una objeción que cierre la puerta al ciclo, pero sí que obliga a matizar su grado de madurez. Por ahora, el ciclo Otto convencional (aunque no optimizado) tiene una ventaja sobre cualquiera de las otras arquitecturas: como el ciclo Otto convencional se ejecuta sobre la base común, un motor más eficiente arrastra consigo el desempeño de cualquier sistema que lo incorpore.

La validación de esta aproximación es posible a través de la cadena de evidencias modelo teórico validado - experimento de laboratorio, y contribuye a confirmar la tesis de que la aproximación del ciclo Otto real al ciclo de referencia está dada por acciones puntuales y específicas para cada punto de operación. La coincidencia de diferentes métodos proporciona una robustez metodológica, pero no necesariamente indica que el uso industrial esté maduro.

Un ciclo ideal no predice el rendimiento de un motor real. Para ese fin, el ciclo ideal no tiene utilidad. Sin embargo, en el caso de un ciclo ideal, nos dice que rendimiento es posible en el mejor de los casos; la diferencia entre este rendimiento y el rendimiento real nos dice cuánta mejora es posible con la tecnología actual. Las pruebas realizadas sobre el terreno han demostrado que una buena parte de esta distancia puede ser recorrida con los medios de los laboratorios e industria locales. El resto se debe a la combustión de duración finita y a la disipación de calor en las paredes del cilindro, es decir, al coste termodinámico irreducible de operar una máquina real.

3.8. Limitaciones de la revisión

El corpus de esta revisión se limita a quince estudios, circunstancia que restringe la generalización de los hallazgos y explica la imposibilidad de una síntesis cuantitativa formal: la heterogeneidad de motores, combustibles y condiciones de ensayo era tal que no era posible sumar estadísticamente las medidas de resultado.

La distribución geográfica de los datos es sesgada, dado que Brasil, Colombia y Ecuador reúnen

casi todos los datos de la región. Otros países latinoamericanos con flotas de vehículos de gran proporción no están incluidos.

Otros factores operacionales como la altitud y la heterogeneidad en la calidad del combustible se reportaron casi en su totalidad en la literatura de contexto y no se controlaron en los estudios primarios considerados. Asimismo, el sesgo idiomático a inglés, español y portugués, era razonable para el ámbito de interés, aunque puede haber excluido trabajos relevantes publicados en otros idiomas. El protocolo de revisión se archivó, pero no se registró en el sitio web de PROSPERO. La búsqueda se realizó en Scopus, Web of Science, IEEE Xplore o SAE Mobilus, aunque su cobertura se asume representada de forma parcial en los agregadores. Esta es otra limitación de la estrategia de búsqueda ya que puede haber literatura que solo se encuentra indexada en esas bases de datos.

Sin embargo, en ausencia de estos datos se debe interpretar con cautela, y no se pueden verificar externamente (aunque se cerró el protocolo antes de la búsqueda). Estos problemas no empañan los resultados, pero son una advertencia de que se debe proceder con precaución, así como una guía sobre las prioridades de la investigación futura.

Dado que el ROBINS-I fue desarrollado para evaluar intervenciones en salud, su aplicación a la termodinámica requirió una modificación de la forma en que los dominios estaban definidos. Aunque esta modificación fue a priori y en duplicado, introduce un elemento de juicio a los revisores que podría ser resuelto de forma ligeramente diferente por otro equipo. Sin embargo, dado que hubo acuerdo entre los revisores y no hubo calificaciones de riesgo grave o crítico, esto no afectó las conclusiones de la síntesis.

3.9. Futuras líneas de investigación

La agenda de investigación se deduce de lo anterior: la región necesita protocolos de ensayo que tengan más en cuenta la altitud, la calidad del combustible y el tráfico urbano de la región. Sin embargo, una buena metrología es necesaria, ya que sin ella, los resultados de las pruebas de laboratorio no son aplicables a las condiciones de campo (Gebisa et al., 2021). Además de la caracterización de las emisiones de CO y HC, a nivel regional el corpus casi no presenta información sobre las emisiones de NO_x, haciendo que no se pueda abordar el clásico compromiso entre la eficiencia y la generación de NO_x (García Mariaca et al., 2025).

Ampliar el número de países y cilindradas estudiados es una línea de investigación que puede seguirse, ya que la mayoría de estudios se concentran en unos pocos. Por último, la hibridación y la recuperación de calor residual en el ciclo Otto es un siguiente paso que se podría dar a partir de esta revisión para probar la idea de que la optimización del motor de base y la electrificación parcial son opciones complementarias y no excluyentes (Peris et al., 2013; Pielecha et al., 2022).

4. CONCLUSIONES

La revisión sistemática concluye que la brecha de rendimiento entre el ciclo Otto ideal y el ciclo Otto real de automóviles de pasajeros en un entorno urbano no es una cifra constante, sino que depende de los objetivos de diseño, del régimen de funcionamiento y, sobre todo, de la región. La literatura no se limita a estudiar esta brecha, sino que también busca reducirla, asumiendo que esto se traduce en un mayor rendimiento, una menor necesidad de combustible y una menor carga contaminante.

La forma más evidente es cambiar la relación de compresión o la geometría de la cámara de combustión, y hay pruebas de que esto aumenta la potencia al tiempo que disminuye el consumo y las emisiones. La otra forma de hacerlo es tratar la mezcla admitida con etanol o con la adición de gases inertes (en este último caso la ganancia de eficiencia se paga con unas mayores pérdidas por combustión incompleta).

En América Latina, la agenda también cuenta con ciertas particularidades, como en Ecuador, donde la investigación se centra en motores de baja cilindrada y bajo consumo debido a las características del parque automotor al que la mayoría de su población tiene acceso. En Brasil, se investiga sobre el etanol, biocombustible de mayor producción en el país. La calibración es muy específica de la región y no se puede aplicar a otras regiones porque los supuestos de calidad de combustible, altitud de operación y patrón de conducción en ciudad, el más difícil de parametrizar de los tres, no se cumplen.

De ahí se derivan implicaciones diferenciadas, como que en el diseño mecánico los datos de partida deben ser representativos de las condiciones locales desde el momento de enunciado del ensayo y no ser incorporados como corrección posterior.

En lo reglamentario, el nivel de exigencia es mayor, ya que la normativa técnica debe basarse en ciclos de conducción medidos en su territorio, y no en procedimientos homologados en otras latitudes.

En el ámbito académico, una agenda más lenta y costosa que, entre otras cosas, incluye ensayos en

condiciones locales, modelos en que la altitud y la temperatura ambiente son variables del sistema y no meras correcciones y el estudio de países y segmentos vehiculares que el corpus apenas registra. Suponiendo por lo menos el reporte de las condiciones de prueba, el tipo de combustible y las hipótesis tenidas en cuenta para los cálculos, la falta de homogeneidad en la forma en que se reportan los resultados en el corpus analizado significa que la comparación de estudios seguirá dependiendo de datos no considerados y la brecha de eficiencia regional seguirá siendo estimada con un margen de error que ningún estudio está en condiciones de reducir.

Contribución de los Autores (CRediT): HDHC: Administración del proyecto, Investigación, Conceptualización, Curación de datos, Redacción – revisión y edición. MBR: Investigación, Conceptualización, Curación de datos, Redacción – borrador original. AMC: Curación de datos, Investigación, Metodología, Software. NBA: Curación de datos, Investigación, Metodología, Validación, Redacción – borrador original. DCS: Curación de datos, Validación, Redacción – borrador original.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en esta publicación.

Declaración de Uso de Inteligencia Artificial: Los autores declaran que utilizaron herramientas de inteligencia artificial (IA) en el procesamiento de datos para la mejora de la redacción del artículo. La herramienta utilizada para este fin fue: Claude.

REFERENCIAS

- Aguilera, M. A., Peña, F. J., Negrete, O., & Vargas, P. (2022). Otto engine for the q-state clock model. *Entropy*, 24(2), 268. <https://doi.org/10.3390/e24020268>
- Arabaci, E. (2019). Thermodynamic analysis of endoreversible six-stroke Otto cycle with respect to equivalence ratio, residual gas fraction and mean piston speed. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.18245/ijaet.500789>
- Arroyo Terán, E. S., Cevallos González, A. F., Imbaquingo Navarrete, R. P., & Melo Obando, J. L. (2020). Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 148–162. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.629.25>
- Bose, A., Farooqui, A., Ferrero, D., Santarelli, M., & Llorca, J. (2019). Thermodynamic assessment of non-catalytic ceria for syngas production by methane reduction and CO₂ + H₂O oxidation. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 8(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s40243-019-0142-3>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Thermodynamics: An engineering approach* (4.^a ed.). McGraw-Hill.

- da Silva, E. A., Baeta, J. G. C., Fonseca, R. A., Malaquias, A. C. T., Ferreira, A. G., & Maia, A. A. T. (2023). Non-invasive fuel consumption measurement for internal combustion engines based on Otto cycle. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(12), 627. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04517-y>
- Douvartzides, S., Karmalis, I., & Ntinis, N. (2020). Thermodynamic cycle analysis of an automotive internal combustion engine with the characteristics of the commercial BMW N54 spark-ignition model. *Journal of Energy Resources Technology*, 142(10), 1–22. <https://doi.org/10.1115/1.4046600>
- Fontaras, G., Zacharof, N.-G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>
- Funes-Ardoiz, I., & Maseras, F. (2019). On the use of thermodynamic cycles for the calculation of standard potentials for the oxidation of solid metals in solution. *ChemPhysChem*, 20(1), 159–162. <https://doi.org/10.1002/cphc.201800877>
- García Mariaca, A., Villalba, J., Morillo Castaño, R., & Bailera, M. (2025). Performance and emissions of spark-ignition internal combustion engine operating with bioethanol–gasoline blends at high altitudes under low- and high-speed conditions. *Energies*, 18(6), Artículo 1401. <https://doi.org/10.3390/en18061401>
- Gebisa, A., Gebresenbet, G., Gopal, R., & Nallamotheu, R. B. (2021). Driving Cycles for Estimating Vehicle Emission Levels and Energy Consumption. *Future Transportation*, 1(3), 615–638. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1030033>
- Gil Torres, D. J., de Souza Mendes, A. de S., & Albuquerque, C. (2024). Performance and emissions data of an internal combustion engine operating with different ethanol/water mixtures and compression ratios. *Data in Brief*, 54, 110390. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110390>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- International Energy Agency [IEA]. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Juwana, W. E., Rachmanto, R. A., Wiyono, M., & Istanto, I. (2022). Experimental Study Influences Changes In Compression Ratio To Performance Of Single Cylinder Otto Engine. *Mekanika:*

- Majalah Ilmiah Mekanika*, 21(2), 56–63. <https://doi.org/10.20961/mechanika.v21i2.59487>
- Kirkpatrick, A. T. (2020). *Internal combustion engines: Applied thermosciences* (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119454564>
- Kodal, A. I., & Kodal, A. (2020). Comparative performance evaluations of various optimization functions for irreversible Otto cycles. *Thermal Science and Engineering Progress*, 15, 100452. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2019.100452>
- Korakianitis, T., Namasivayam, A. M., & Crookes, R. J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 89–112. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.04.002>
- López, J. J., García, A., Monsalve-Serrano, J., Cogo, V., & Wittek, K. (2020). Potential of a two-stage variable compression ratio downsized spark ignition engine for passenger cars under different driving conditions. *Energy Conversion and Management*, 203, 112251. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112251>
- Martínez, J., Robles, L., Montalvo, F., Baño Morales, D., & Zambrano, I. (2022). Effects of altitude in the performance of a spark ignition internal combustion engine. *Materials Today: Proceedings*, 49, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.475>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10, 89. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paluch, M., Noga, M., & Lisowska, A. (2021). Increasing the theoretical efficiency of the spark-ignition engine cycle by adding inert gas at part-load. *Journal of Physics: Conference Series*, 1888(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1888/1/012009>
- Peña, F. J., Negrete, O., Cortés, N., & Vargas, P. (2020). Otto engine: Classical and quantum approach. *Entropy*, 22(7), 755. <https://doi.org/10.3390/e22070755>
- Peris, B., Navarro-Esbrí, J., & Molés, F. (2013). Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat

- recovery. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 364–371. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.08.016>
- Pielecha, J., Skobiej, K., Kubiak, P., Woźniak, M., & Siczek, K. (2022). Exhaust emissions from plug-in and HEV vehicles in type-approval tests and real driving cycles. *Energies*, 15(7), 2423. <https://doi.org/10.3390/en15072423>
- Plötz, P., Moll, C., Bieker, G., & Mock, P. (2021). From lab-to-road: Real-world fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054078. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abef8c>
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine* (2.^a ed.). Pearson Prentice Hall.
- Reitz, R. D. (2013). Directions in internal combustion engine research. *Combustion and Flame*, 160(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.11.002>
- Rodríguez, R. A., Virguez, E. A., Rodríguez, P. A., & Behrentz, E. (2016). Influence of driving patterns on vehicle emissions: A case study for Latin American cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.008>
- Rojas-Reinoso, V., Pancha-Ramos, J., Romero-Hidalgo, V., Martinez-Coral, J., & Zambrano-Orejuela, I. (2022). Increase in torque and power of an Otto 200 cc spark ignition engine with modifications in the combustion chamber. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12(2), 483–493. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.2.15287>
- Santana, C. M., Santana, L. L. B., & Almeida, H. G. A. (2024). Thermal Energy Balance of an Otto Cycle Engine Fueled with Ethanol and Gasoline. SAE International. *SAE Brasil 2024 Congress*. <https://doi.org/10.4271/2024-36-0003>
- Singh, V., & Müstecaplıoğlu, Ö. E. (2020). Performance bounds of nonadiabatic quantum harmonic Otto engine and refrigerator under a squeezed thermal reservoir. *Physical Review E*, 102(6), Artículo 062123. <https://doi.org/10.1103/PHYSREVE.102.062123>
- Sterne, J. A., Hernán, M. A., Reeves, B. C., Savović, J., Berkman, N. D., Viswanathan, M., Henry, D., Altman, D. G., Ansari, M. T., Boutron, I., Carpenter, J. R., Chan, A.-W., Churchill, R., Deeks, J. J., Hróbartsson, A., Kirkham, J., Jüni, P., Loke, Y. K., Pigott, T. D., Ramsay, C. R.,

- Regidor, D., Rothsstein, H. R., Sandhu, L., Santaguida, P. L., Schünemann, H. J., Shea, B., Shrier, I., Tugwell, P., Turner, L., Valentine, J. C., Waddington, H., Waters, E., Wells, G. A., Whiting, P. F., & Higgins, J. P. (2016). ROBINS-I: A tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions. *BMJ*, 355, i4919. <https://doi.org/10.1136/bmj.i4919>
- Tietge, U., Díaz, S., Mock, P., Bandivadekar, A., Dornoff, J., & Ligterink, N. (2019). *From laboratory to road: A 2018 update of official and “real-world” fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe*. International Council on Clean Transportation. <https://www.theicct.org/publications/laboratory-road-2018-update>
- Tipanluisa, L. E., Remache, A. P., Ayabaca, C. R., & Reina, S. W. (2017). Emisiones contaminantes de un motor de gasolina funcionando a dos cotas con combustibles de dos calidades. *Información Tecnológica*, 28(1), 3–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002>
- Tormos, B., Martín, J., Carreño, R., & Ramírez, L. (2018). A general model to evaluate mechanical losses and auxiliary energy consumption in reciprocating internal combustion engines. *Tribology International*, 123, 161–179. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.03.007>
- Tsirlin, A. M., Balunov, A. I., & Sukin, I. A. (2025). Finite-Time Thermodynamics: Problems, Approaches, and Results. *Entropy*, 27(6), 649. <https://doi.org/10.3390/e27060649>
- Vega, L. P., Bautista, K. T., Campos, H., Daza, S., & Vargas, G. (2024). Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia. *Energy Reports*, 11, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.060>
- Zhao, Y., & Song, J. (2025). Theoretical thermal efficiencies of ideal, supercharged and gasoline engine cycles. *Journal of Engineering Research*, 13(3), 1667–1672. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.05.001>