

Evolución bibliométrica del análisis termodinámico del ciclo Otto en motores urbanos livianos y su impacto en eficiencia energética

Bibliometric evolution of thermodynamic analysis of the Otto cycle in light urban engines and its impact on energy efficiency

Victor Pachacama-Nasimba¹ , Robinson Alay-Romero² , Carlos Ulcuango-Moreno³ , Cristian Alvarez-Ventimilla⁴ , Darwin Chele-Sancán⁵ 

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

² Instituto Superior Tecnológico La Maná, ralay@istlamana.edu.ec, La Maná - Ecuador

³ Instituto Superior Tecnológico La Maná, culcuango@istlamana.edu.ec, La Maná - Ecuador

⁴ Instituto Superior Tecnológico La Maná, calvarez@istlamana.edu.ec, La Maná - Ecuador

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

Autor para correspondencia: vpachacaman@uteq.edu.ec

RESUMEN

El transporte terrestre demanda estrategias urgentes de descarbonización, situando la eficiencia de los motores de encendido por chispa como una prioridad tecnológica. Este estudio examina la evolución y estructura intelectual de la literatura sobre el análisis termodinámico del ciclo Otto en vehículos urbanos livianos. Mediante un enfoque bibliométrico mixto basado en 137 artículos de Scopus (2010-2025) y procesado bajo protocolos PRISMA, se integraron técnicas cuantitativas de desempeño con mapeo científico de redes de colaboración y contenido. Los resultados revelan un crecimiento productivo sostenido liderado por Europa y Asia, identificando una transición estructural en los frentes de investigación: el campo ha evolucionado desde la idealización de ciclos estándar hacia modelos termodinámicos irreversibles y de tiempo finito aplicados a la combustión de nuevos vectores energéticos. El análisis de co-ocurrencia demuestra que el hidrógeno y el amoníaco han desplazado a la gasolina como palabras clave centrales vinculadas a la eficiencia exergética. Se concluye que la investigación académica reposiciona al motor Otto no como una tecnología obsoleta, sino como una tecnología de transición necesaria y resiliente para la economía del hidrógeno, aunque se requiere mayor integración con sistemas híbridos para maximizar su sostenibilidad en entornos urbanos complejos.

Palabras clave: Ciclo Otto, motor de combustión interna, rendimiento termodinámico, eficiencia energética, eficiencia de combustible.

ABSTRACT

Land transport requires urgent decarbonization strategies, making the efficiency of spark ignition engines a technological priority. This study examines the evolution and intellectual structure of the literature on the thermodynamic analysis of the Otto cycle in light urban vehicles. Using a mixed bibliometric approach based on 137 articles from Scopus (2010-2025) and processed under PRISMA protocols, quantitative performance techniques were integrated with scientific mapping of collaboration networks and content. The results reveal sustained productive growth led by Europe and Asia, identifying a structural transition on the research front: the field has evolved from the idealization of standard cycles toward irreversible and finite-time thermodynamic models applied to the combustion of new energy vectors. Co-occurrence analysis shows that hydrogen and ammonia have displaced gasoline as central keywords linked to exergy efficiency. It is concluded that academic research repositions the Otto engine not as an obsolete technology, but as a necessary and resilient transition technology for the hydrogen economy, although greater integration with hybrid systems is required to maximize its sustainability in complex urban environments.

Keywords: Otto cycle, internal combustion engine, thermodynamic performance, energy efficiency, fuel efficiency.

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-NoComercial-4.0 Internacional](#).



Citar como:

Pachacama-Nasimba, V., Alay-Romero, R., Ulcuango-Moreno, C., Alvarez-Ventimilla, C., & Chele-Sancán, D. Evolución bibliométrica del análisis termodinámico del ciclo Otto en motores urbanos livianos y su impacto en eficiencia energética. *CONECTIVIDAD*, 7(2), e468. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v7i2.468>

1. INTRODUCCIÓN

El transporte terrestre se reconoce hoy como uno de los sectores más intensivos en consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a escala global. Se estima que el transporte aporta alrededor del 21–25 % de las emisiones mundiales de CO₂ asociadas a la energía, y que cerca de tres cuartas partes de dichas emisiones provienen del transporte por carretera, dominado por vehículos livianos de uso urbano (International Energy Agency, 2023; Patil et al., 2024). Esta centralidad sitúa la eficiencia energética de los motores que equipan a los automóviles urbanos en el núcleo de las estrategias de descarbonización, tanto en economías avanzadas como en contextos emergentes, y conecta directamente con compromisos internacionales como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 7 (energía asequible y no contaminante), el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (acción por el clima) (United Nations, 2021).

A esto se añaden marcos regulatorios cada vez más exigentes, como las normas Euro 7 y disposiciones equivalentes en otras regiones, que piden recortes simultáneos en el consumo de combustible, en los contaminantes locales y en los GEI. Esa presión regulatoria viene empujando avances tecnológicos en el transporte urbano (European Commission, 2022; Moradi et al., 2024). Dentro de este escenario, los motores de combustión interna de encendido por chispa, sustentados en los principios del ciclo Otto, siguen siendo la opción predominante en los vehículos urbanos livianos, desde autos particulares hasta pequeños utilitarios (Reitz et al., 2020). El ciclo Otto ideal funciona como una referencia termodinámica clara: compresión y expansión isentrópicas, combustión a volumen constante y rechazo de calor a presión constante (Heywood, 1988). A partir de ese esquema, y así lo entiendo yo, se miden la eficiencia térmica y se identifican las pérdidas irreversibles que aparecen en la práctica.

Sin embargo, la práctica ingenieril contemporánea se aleja del análisis de ciclos aire – estándar reversibles y recurre a modelos que incorporan explícitamente irreversibilidades internas y externas, balances de exergía y restricciones de tiempo finito, con el fin de representar de manera más realista el funcionamiento de motores sometidos a operación transitoria, altas tasas de carga y estrategias avanzadas de control (Ahmadi et al., 2016; Caton, 2018). De este modo, el análisis termodinámico se ha consolidado como una herramienta clave para identificar los mecanismos

físicos que limitan la eficiencia, pérdidas por combustión incompleta, transferencia de calor, fricción mecánica y generación de entropía y traducirlos en criterios de diseño y calibración de motores Otto para aplicaciones urbanas.

En la misma línea, los enfoques basados en la segunda ley y en el análisis de exergía han permitido separar las pérdidas asociadas a cada proceso del ciclo y fijar límites de eficiencia mucho más cercanos a la realidad, dejando atrás las sobreestimaciones típicas de la termodinámica clásica aplicada a motores (Caton, 2018; Zhou, 2021). También surgen aportes teóricos de frontera, como los ciclos Otto cuánticos armónicos (Kosloff & Rezek, 2017; Pedram et al., 2023) que, aunque operan en escalas microscópicas, ayudan a trazar los límites últimos de la conversión de energía (una digresión interesante, aunque todavía lejana de la práctica).

La sofisticación de los modelos ha venido acompañada por una creciente diversidad de enfoques de simulación. Frente a los modelos de zona única, se han desarrollado formulaciones multizona y cuasi-dimensionales que representan con mayor detalle la estratificación térmica, la cinética de combustión y los fenómenos de autoignición, con una relación más favorable entre precisión y costo computacional que las cinéticas detalladas (Fasulo et al., 2021; Wang, 2020; Zhou et al., 2020). El uso de dinámica de fluidos computacional (CFD) en combinación con modelos termodinámicos ha permitido estudiar la interacción entre turbulencia, formación de mezcla y frentes de llama, mientras que se proponen esquemas numéricos y de interpolación que reducen de forma significativa los tiempos computacionales sin sacrificar la calidad de las predicciones (Gómez Montoya et al., 2022). No obstante, la validación de estos modelos en condiciones representativas de conducción urbana sigue siendo un desafío, particularmente en contextos con perfiles de carga muy variables y restricciones de emisiones estrictas.

Otro eje que ordena buena parte de la investigación actual es el paso hacia combustibles alternativos y formas más avanzadas de combustión. La literatura describe un abanico cada vez más amplio de opciones para motores basados en el ciclo Otto, que va desde mezclas de gasolina con etanol o metanol hasta combustibles gaseosos, como gas natural enriquecido con hidrógeno, hidrógeno puro y biogás de segunda generación. Liu et al. (Liu et al., 2014), por ejemplo, proponen un modelo cuasi-dimensional para motores de gasolina con adición de hidrógeno, donde incorporan una formulación mejorada de la velocidad de llama laminar.

En una línea cercana, Lee et al. (2023) estudian el desempeño exergetico de un motor de encendido por chispa alimentado únicamente con hidrógeno, y ponen en evidencia cuán sensible resulta la eficiencia exergetica tanto a la forma de combustión elegida como al exceso de aire. En el campo de los combustibles gaseosos de origen renovable, Yan et al. (2018) revisan el uso de gas natural enriquecido con hidrógeno (HCNG), mientras que Gómez Montoya (2025) plantea un principio termodinámico para el diseño de motores que funcionan con biogás enriquecido con hidrógeno. En ese planteamiento se subraya la influencia de la relación hidrógeno-carbono y del número de metano sobre la eficiencia exergetica del ciclo Otto. Más adelante, trabajos de Gómez Montoya y Olsen (2024) reúnen eficiencia exergetica, entropía, número de octano y propiedades fisicoquímicas de los combustibles en un esquema cuantitativo de diseño para motores de encendido por chispa, pensado de manera explícita para avanzar hacia mezclas gaseosas renovables.

El uso de alcoholes y compuestos oxigenados introduce, a su vez, desafíos operativos específicos, como las dificultades de arranque en frío en motores alimentados con metanol, abordadas mediante estrategias de calentamiento del refrigerante y análisis de la ignición a bajas temperaturas (Gong et al., 2008; Gong et al., 2011; Liu et al., 2025). En conjunto, estos desarrollos muestran que la convergencia entre tecnologías de combustión avanzada, combustibles alternativos y arquitecturas híbridas puede habilitar motores de muy alta eficiencia integrados en sistemas de propulsión orientados a la sostenibilidad urbana (Moradi et al., 2024).

La complejidad cada vez mayor de los modelos y de las condiciones reales de operación ha llevado a tratar el diseño y la calibración de motores como problemas de optimización con múltiples objetivos. Trabajos como los de Mashkour y Ahmed (Mashkour & Ahmed, 2020) fast and accurate engine simulation model by using MATLAB (GUI dejan claro que las configuraciones que buscan la máxima potencia o la mayor eficiencia no suelen ser las mismas que logran las menores emisiones reguladas. Esto obliga a moverse en un terreno de equilibrios, donde entran en juego la eficiencia térmica, el consumo específico de combustible, las emisiones y, según el caso, también consideraciones económicas o ambientales.

Este tipo de trabajos ilustra el acoplamiento entre modelos termodinámicos irreversibles, termodinámica de tiempo finito y métodos avanzados de optimización como NSGA-II, así

como la creciente incorporación de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para apoyar el diseño, la calibración y el control en tiempo real de motores (Broatch et al., 2022; Hu et al., 2009; Kumar et al., 2023; Sarkar et al., 2025; Wang et al., 2015). A pesar de ello, persisten limitaciones en la validación experimental bajo condiciones variables y en la integración de estos enfoques con arquitecturas híbridas específicas para ciclos de conducción urbanos (Gómez Montoya et al., 2022; Han et al., 2020).

En síntesis, la literatura técnica existente sobre el análisis termodinámico del ciclo Otto en motores urbanos livianos es amplia, pero heterogénea y fragmentada. Muchos estudios se centran en configuraciones muy específicas, un tipo de combustible, una arquitectura de motor, un rango acotado de condiciones de operación y emplean indicadores de desempeño diversos (eficiencia indicada o efectiva, consumo específico de combustible, eficiencia exergética, densidad de potencia, índices ecológicos, entre otros), lo que dificulta la comparación transversal entre trabajos y la identificación de trayectorias robustas de investigación (Gomez Montoya & Olsen, 2024; Lee et al., 2023; Mashkour & Ahmed, 2020). Adicionalmente, aunque se han realizado comparaciones entre ciclos combinados (Otto–Miller–Atkinson) y optimizaciones multiobjetivo de ciclos irreversibles (Shi et al., 2022; Zhao & Xu, 2018), el vínculo explícito entre estos desarrollos termodinámicos y la problemática de la eficiencia energética en vehículos urbanos, incluyendo la operación en ciclos de conducción reales, la congestión y los perfiles típicos de carga, suele ser débil o apenas esbozado. En muchos casos, los estudios se realizan en condiciones estacionarias de laboratorio y sólo de manera incipiente se conectan con escenarios de operación reales en ciudades fuertemente motorizadas de Europa, Asia o América Latina, a pesar de que en contextos urbanos el 70 % de las emisiones vehiculares pueden atribuirse a flotas basadas en ciclos Otto ineficientes (World Health Organization, 2023).

Desde una perspectiva de análisis de la ciencia, la comunidad de ingeniería mecánica y energética ha comenzado a incorporar con mayor frecuencia enfoques bibliométricos para mapear la evolución de campos específicos, identificar frentes de investigación y analizar redes de colaboración. Aria y Cuccurullo (2017) sistematizan indicadores y técnicas de “science mapping” como análisis de productividad, impacto, coautoría, cocitación y coocurrencia de palabras clave que se han convertido en estándar para estudios bibliométricos en distintas

disciplinas, mientras que Donthu et al. (2021) discuten principios como la ley de Bradford para caracterizar la distribución de la producción científica. Aplicadas al ámbito de la energía y el transporte, estas metodologías permiten cuantificar la producción científica, identificar clústeres temáticos y analizar la coevolución de tecnologías. Sin embargo, en el dominio específico del análisis termodinámico del ciclo Otto en motores de encendido por chispa, las aplicaciones bibliométricas siguen siendo escasas, fragmentarias y, en general, subsumidas dentro de estudios de alcance más amplio sobre bioenergía, vehículos eléctricos, combustibles alternativos o ciclos termoeléctricos (Li et al., 2025).

Este panorama revela un vacío de investigación claramente identificable. En primer lugar, no se dispone de una cartografía bibliométrica integral centrada específicamente en el análisis termodinámico del ciclo Otto en motores urbanos livianos que considere de manera concurrente desempeño energético, eficiencia exergética y emisiones. La bibliometría disponible tiende a focalizarse ya sea en temas energéticos más generales o en tecnologías particulares, sin entrar en el detalle del papel de los motores Otto en el transporte urbano sostenible. En segundo lugar, la literatura existente suele tratar por separado las dimensiones global, regional y local: se analizan tendencias mundiales o casos de países específicos, pero rara vez se comparan sistemáticamente los patrones de producción científica, colaboración y orientación temática entre regiones con trayectorias tecnológicas y necesidades muy distintas, como Europa, Asia y América Latina (Moradi et al., 2024; Patil et al., 2024). En tercer lugar, se observa una desconexión explícita entre el nivel micro del análisis termodinámico (modelos de ciclo, balances de exergía, curvas de eficiencia) y el nivel meso–macro de las agendas internacionales de investigación y de los ODS: aunque algunos trabajos apuntan a la contribución potencial de motores más eficientes y combustibles alternativos a la reducción de emisiones y a la economía circular (Gómez Montoya, 2025; Gomez Montoya & Olsen, 2024; Moradi et al., 2024), falta un análisis que muestre cómo la agenda científica en torno al ciclo Otto se alinea o no con dichos marcos de sostenibilidad. Finalmente, la combinación de análisis bibliométrico cuantitativo con lectura cualitativa en profundidad de los artículos núcleo se ha explorado sólo de forma incipiente en este dominio, pese a su potencial para esclarecer los mecanismos conceptuales y metodológicos subyacentes más allá de las métricas de productividad y citación (Donthu et al.,

2021). Ante estas brechas, el presente estudio se propone realizar un análisis bibliométrico de enfoque mixto sobre la evolución del análisis termodinámico del ciclo Otto en motores urbanos livianos y su impacto en la eficiencia energética y la reducción de emisiones.

El propósito general de este trabajo es describir, a través de un enfoque bibliométrico mixto, evaluativo y relacional, cómo ha ido tomando forma la literatura científica dedicada al análisis termodinámico del ciclo Otto en motores de encendido por chispa usados en vehículos urbanos livianos. El interés se centra en entender la evolución del campo, su estructura intelectual y los frentes temáticos que lo atraviesan, con especial atención a la eficiencia energética, el análisis exergético y las emisiones. En pocas palabras, se busca ver cómo se ha pensado el problema, quiénes lo han impulsado y hacia dónde parece dirigirse la investigación.

De manera más concreta, el estudio se organiza en torno a las siguientes preguntas de investigación:

- (1) ¿Cómo han cambiado, a lo largo del tiempo, la producción científica, el impacto medido por citaciones y los patrones de colaboración, tanto en coautoría como a nivel institucional, dentro de este ámbito?
- (2) ¿Cuáles son las fuentes, los autores y los países con mayor peso, y cómo se distribuye la literatura en torno a revistas que actúan como núcleo del campo?
- (3) ¿Qué clústeres temáticos dan forma al área de estudio y qué tendencias comienzan a destacarse en temas como el modelado termodinámico, el análisis exergético, los combustibles alternativos y las aproximaciones de optimización?
- (4) ¿Qué líneas de investigación aparecen como más relevantes para orientar trabajos futuros y apoyar decisiones editoriales o de financiamiento, a la luz de la evidencia bibliométrica del periodo considerado?

De forma exploratoria, se plantea la hipótesis de que, en el periodo analizado, la investigación sobre el ciclo Otto en motores urbanos livianos ha transitado desde un predominio de estudios basados en ciclos ideales y análisis paramétricos hacia enfoques integrados que combinan modelos termodinámicos avanzados (incluyendo tiempo finito y exergía), combustibles alternativos y algoritmos de optimización multiobjetivo, con una creciente presencia de configuraciones híbridas y arquitecturas explícitamente orientadas a la sostenibilidad (Gomez

Montoya & Olsen, 2024; Lee et al., 2023; Moradi et al., 2024; Shi et al., 2022; Zhao & Xu, 2018). Complementariamente, se explora la hipótesis de que la integración de algoritmos de optimización multiobjetivo y técnicas de inteligencia artificial se asocia con mejoras reportadas de eficiencia energética del orden del 15–20 % en condiciones urbanas, aunque dichas relaciones no han sido aún caracterizadas de forma sistemática (Gómez Montoya et al., 2022; Han et al., 2020; Minango et al., 2026).

El estudio se acota a artículos científicos y revisiones indexados en Scopus que tratan de forma explícita el ciclo Otto, los motores de encendido por chispa y su análisis termodinámico. Se consideran trabajos que incluyan formulaciones de energía y exergía, eficiencia térmica, enfoques de optimización con múltiples objetivos y análisis de emisiones, siempre en el marco de aplicaciones vehiculares, con foco en vehículos livianos y en contextos urbanos. La ventana temporal cubre un periodo de más de diez años y se concentra en la producción posterior a 2010, etapa en la que la literatura muestra un crecimiento marcado, aunque sin dejar de lado aportes fundacionales publicados antes de esa fecha.

A partir de un corpus depurado de 137 documentos, se llevó a cabo un análisis bibliométrico mixto que combinó tres componentes. Por un lado, indicadores de rendimiento científico, como productividad anual, revistas e instituciones más activas y patrones de citación. Por otro, técnicas de mapeo científico, que incluyen análisis de coautoría, cocitación y coocurrencia de palabras clave, siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos por Aria y Cuccurullo (Aria & Cuccurullo, 2017). Finalmente, se incorpora un análisis cualitativo del contenido de los artículos núcleo dentro de los clústeres temáticos identificados, poniendo especial atención en cómo se definen y evalúan la eficiencia energética y las emisiones.

En términos geográficos, el alcance es global, pero se incluyen análisis comparativos por regiones y países, distinguiendo entre polos de alta producción científica (por ejemplo, China, Estados Unidos y Europa) y contextos emergentes o subrepresentados (por ejemplo, América Latina), e incorporando estudios de caso que exploran teorías de diseño exergético en sistemas energéticos urbanos latinoamericanos (Gómez Montoya, 2025; Gomez Montoya & Olsen, 2024).

El resto del artículo se ordena de la siguiente forma. En la sección que sigue se detalla la

metodología bibliométrica utilizada, desde la estrategia de búsqueda en Scopus hasta los criterios de inclusión y exclusión, pasando por los procesos de depuración y normalización de los datos y las técnicas de análisis, tanto cuantitativas como cualitativas, que se aplicaron. Luego se exponen los resultados del estudio bibliométrico en tres planos: primero, la evolución en el tiempo y la distribución de la producción por revistas, países e instituciones; después, la estructura intelectual del campo, reconstruida a partir de análisis de cocitación y coocurrencia; y, por último, una lectura cualitativa de los clústeres temáticos asociados a eficiencia energética, combustibles alternativos, optimización multiobjetivo y ciclos combinados.

Para cerrar, se discuten las implicaciones de estos hallazgos en el diseño de motores urbanos livianos más eficientes y sostenibles, se señalan líneas de investigación que parecen ganar peso de cara al futuro y se presentan conclusiones generales sobre el aporte del análisis termodinámico del ciclo Otto a las agendas actuales de descarbonización del transporte urbano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño del estudio y enfoque metodológico

Se realizó un estudio bibliométrico de carácter descriptivo, retrospectivo y exploratorio, empleando un enfoque mixto que integra técnicas cuantitativas de desempeño científico con análisis cualitativos de la estructura intelectual del campo. El objetivo central consistió en examinar la evolución, las tendencias de investigación y las redes de colaboración sobre el análisis termodinámico del ciclo Otto en motores de combustión interna para vehículos urbanos livianos, con énfasis en la eficiencia energética y la sostenibilidad. El proceso de selección del corpus siguió el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar transparencia y trazabilidad. Se identificaron inicialmente 137 registros en Scopus. Dado que la estrategia de búsqueda fue deliberadamente específica y se aplicaron filtros en la propia consulta (campos Title-Abs-Key y tipo documental DOCTYPE(ar)), no se registraron duplicados ni exclusiones adicionales durante el cribado por título/resumen; por tanto, los 137 documentos cumplieron los criterios de elegibilidad y conformaron el corpus final ($N = 137$). La Figura 1 resume el flujo PRISMA con los conteos por etapa.

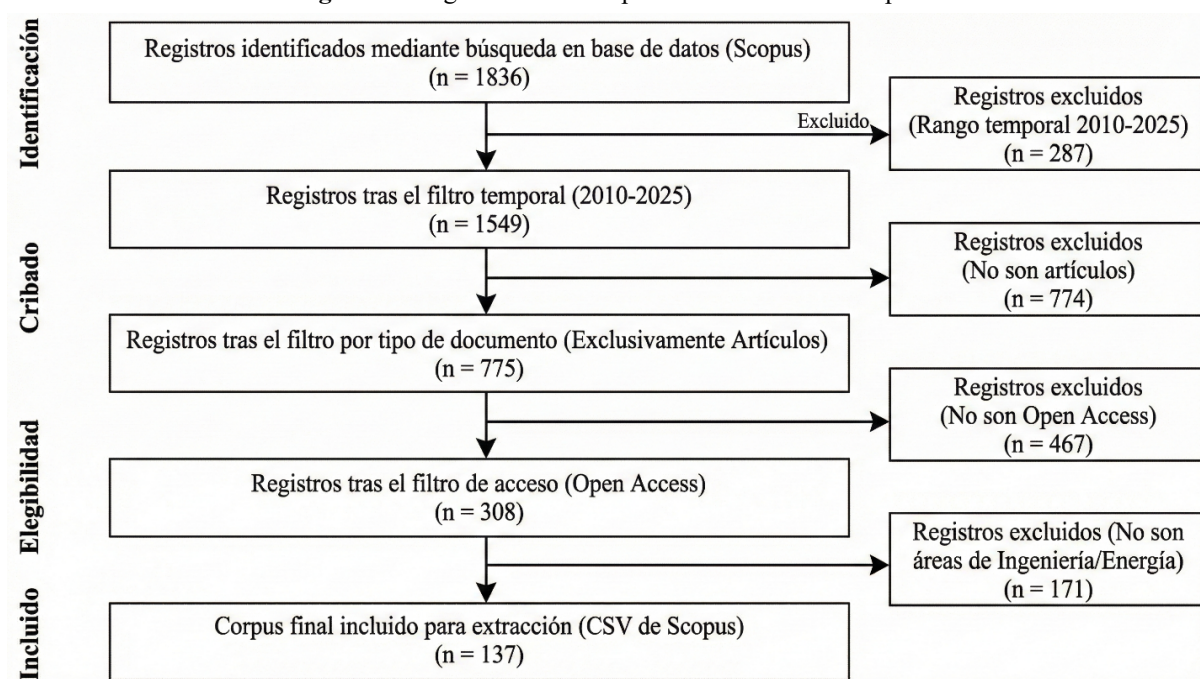
2.2. Fuente de información y estrategia de búsqueda

La recolección de datos bibliográficos se llevó a cabo el 21 de diciembre de 2025 utilizando

la base de datos Scopus (Elsevier) como fuente primaria. Esta base de datos fue seleccionada por su amplia cobertura en ingeniería mecánica y ciencias de la energía, así como por la alta calidad de sus metadatos, lo cual facilita el análisis robusto de citas y afiliaciones. La estrategia de búsqueda se diseñó para maximizar tanto la precisión como la recuperación de documentos relevantes, interceptando tres dominios conceptuales: el ciclo termodinámico (Otto/encendido por chispa), la aplicación tecnológica (vehículos livianos/urbanos) y el enfoque analítico (termodinámica/eficiencia/exergía).

La ecuación de búsqueda avanzada combinó operadores booleanos, truncadores y filtros por campo (Title-Abs-Key). La sintaxis final ejecutada fue: (TITLE-ABS-KEY("Otto cycle" OR "spark ignition engine" OR "SI engine" OR "gasoline engine" OR "internal combustion engine") AND TITLE-ABS-KEY("thermodynamic analysis" OR "exergy" OR "energy efficiency" OR "thermal efficiency" OR "combustion modeling") AND TITLE-ABS-KEY("urban" OR "light duty" OR "passenger car" OR "vehicle")), limitando los resultados a artículos de revista (DOCTYPE(ar)) y dejando fuera, de manera explícita, las revisiones y los documentos que no resultaban pertinentes.

Figura 1. Diagrama PRISMA para la obtención del corpus.



2.3. Criterios de elegibilidad y selección del corpus

Para asegurar la coherencia y la solidez científica del conjunto analizado, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión rigurosos. Se consideraron únicamente artículos de investigación

originales publicados en revistas indexadas, y se descartaron revisiones, actas de congresos, capítulos de libro y notas editoriales. La idea fue concentrarse en aportes empíricos y metodológicos sometidos a revisión por pares. La ventana temporal se fijó, de forma preferente, entre 2010 y 2025, un periodo en el que se aprecia con claridad el crecimiento acelerado del tema y el viraje hacia enfoques de optimización más dinámicos. En cuanto al contenido, solo se seleccionaron trabajos que abordaran de manera explícita el análisis termodinámico de motores de encendido por chispa con aplicación vehicular, dejando fuera estudios sobre ciclos Diésel, turbinas de gas o análisis puramente químicos de combustibles sin un enfoque ingenieril.

El proceso de selección siguió un esquema sistemático de cribado. Tras la identificación inicial de los registros y la eliminación automática de duplicados, se revisaron títulos y resúmenes para descartar aquellos documentos que no se enfocaban en eficiencia energética o que trataban aplicaciones ajenas al ámbito vehicular. Una vez verificada la elegibilidad, se consolidó un corpus final de 137 documentos (N=137), que constituye la base de datos utilizada para el análisis bibliométrico y el mapeo científico posterior.

2.4. Extracción, normalización y procesamiento de datos

Los metadatos completos de los registros seleccionados (autores, afiliaciones, resúmenes, palabras clave y referencias) se exportaron en formato CSV y fueron procesados mediante el software R (versión 4.3.1) y la interfaz Biblioshiny del paquete Bibliometrix (versión 4.1.3). Se ejecutó una fase exhaustiva de depuración y normalización de datos para corregir inconsistencias propias de la indexación. Este proceso incluyó la desambiguación de nombres de autores mediante la verificación de afiliaciones y la construcción de un tesoro ad hoc para unificar palabras clave (e.g., agrupando “spark ignition engine”, “SI engine” y “gasoline engine”), priorizando el uso de Author Keywords para capturar la intención original de los investigadores. Asimismo, se realizó una normalización institucional y geográfica para evitar la dispersión de la producción científica.

2.5. Análisis bibliométrico y mapeo científico

El análisis de los datos se estructuró en dos dimensiones: evaluativa y relacional. Para el análisis descriptivo y de desempeño, se calcularon indicadores de producción anual, tasas de crecimiento y métricas de impacto (índice h, citas totales), aplicando la Ley de Bradford para

identificar las revistas núcleo (Core Sources) y la Ley de Lotka para evaluar la productividad de los autores. Para la dimensión estructural, se utilizó el software VOSviewer para generar redes bibliométricas complejas. Se construyeron mapas de co-ocurrencia de palabras clave para visualizar la estructura cognitiva del campo, redes de coautoría para identificar patrones de colaboración y redes de co-citación para detectar las bases intelectuales del dominio.

Para la dimensión relacional y el mapeo científico se recurrió a VOSviewer, con el que se construyeron tres tipos de redes: coocurrencia de palabras clave, coautoría y cocitación. Se utilizó la normalización por fuerza de asociación (association strength). En el mapa de coocurrencia se trabajó con Author Keywords previamente normalizadas mediante un tesauro ad hoc, y se fijó una ocurrencia mínima de cinco apariciones para reducir el ruido y facilitar la lectura de los clústeres. En el análisis geográfico y de colaboración internacional se aplicó conteo fraccional en aquellos documentos con múltiples afiliaciones, con el fin de evitar la sobreestimación asociada a la coautoría entre instituciones.

El análisis evaluativo, centrado en el desempeño, se llevó a cabo en R (v4.3.1) utilizando Bibliometrix/Biblioshiny (v4.1.3). En esta etapa se calcularon indicadores de producción anual, citación e impacto, como citas totales, citas promedio e índice h. También se aplicó la Ley de Bradford para identificar las revistas núcleo y la Ley de Lotka para describir los patrones de productividad de los autores.

2.6. Reproducibilidad

Con el fin de asegurar la replicabilidad del estudio, el archivo original de datos extraído de Scopus, el tesauro de términos utilizado para la limpieza y los archivos de configuración de parámetros de VOSviewer y Bibliometrix se encuentran disponibles bajo solicitud a través del correo de autoría. Todas las manipulaciones de datos se realizaron respetando el contenido sustantivo de los registros originales, garantizando la trazabilidad metodológica completa del análisis presentado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del corpus y dinámica temporal

El proceso de búsqueda y depuración en la base de datos Scopus, siguiendo los criterios de elegibilidad definidos en la metodología, resultó en un corpus final de N=137 artículos originales

(Ver Tabla 1). El periodo de estudio abarca desde el año 2010 hasta diciembre de 2025, lo que permite evaluar la evolución del campo durante los últimos 16 años. La producción científica sobre el análisis termodinámico del ciclo Otto muestra una tendencia de crecimiento no lineal, con fases claramente diferenciadas (ver Figura 2). Durante el periodo inicial (2010–2015), la productividad fue incipiente, con un promedio inferior a 3 artículos por año. Sin embargo, se observa un punto de inflexión a partir de 2016 (9 artículos) y una consolidación definitiva desde 2019, año en el que la producción supera consistentemente el umbral de los 10 documentos anuales. El pico máximo de productividad se registra en el año 2025, con 23 artículos, lo que evidencia la vigencia actual de la temática. Es relevante notar que el registro de 2026 (1 artículo) corresponde a publicaciones de acceso anticipado (early access), por lo que este valor es parcial y no indicativo de un declive.

Figura 2. Evolución de la producción científica anual 2010 - 2025.

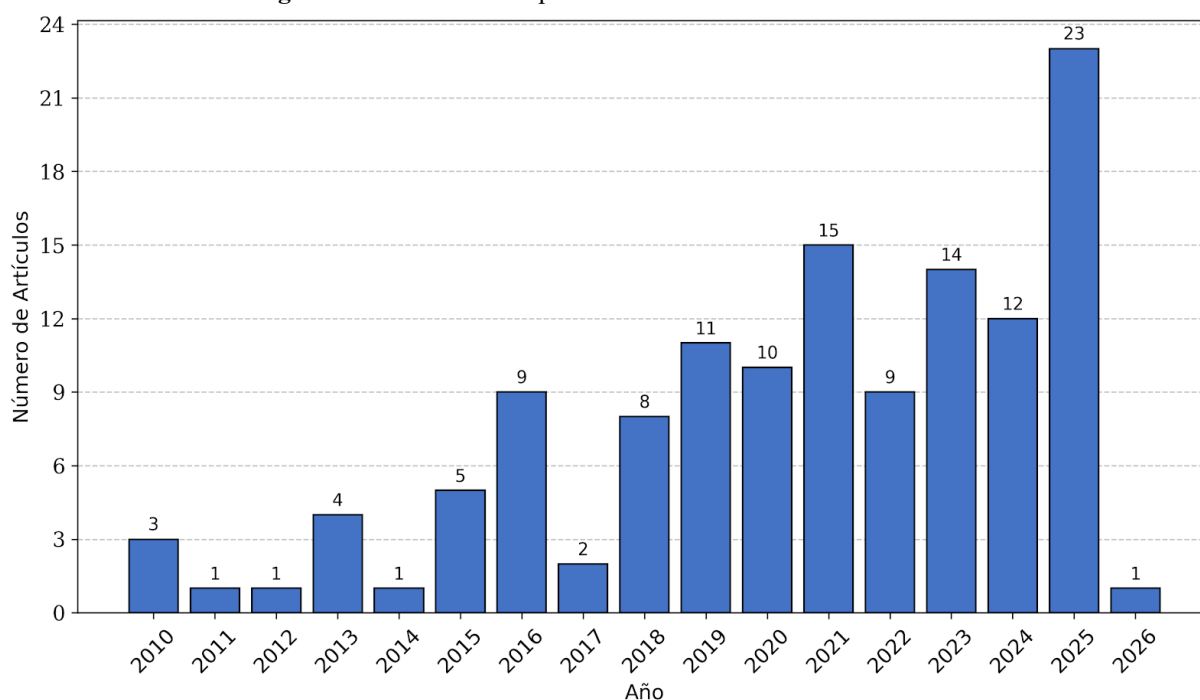


Tabla 1. Estadísticos descriptivos generales del corpus: distribución por tipo documental, rango temporal y métricas.

Métrica	Valor Auditado	Notas / Descripción
Cobertura y Selección		
Documentos recuperados (Bruto)	137	Total de registros cribados de Scopus.
Rango temporal	2010 – 2025	Incluye 1 publicación Early Access de 2026.
Fuentes y Autoría		
Fuentes de publicación (Revistas)	65	Cantidad de revistas/actas distintas.
Total Autores	490	Autores únicos identificados.
Índice colaboración	3.80	Promedio de autores por artículo.

Métrica	Valor Auditado	Notas / Descripción
Contenido e Impacto		
Palabras clave del autor	421	Términos únicos normalizados.
Total de citas recibidas	2,342	Acumulado histórico del corpus.
Promedio de citas por artículo	18.16	Media de impacto (Citas/Doc).

3.2. Fuentes de publicación

La diseminación del conocimiento en este dominio presenta una estructura de concentración moderada (Ver Tabla 2). La revista Energies se posiciona como la fuente principal, publicando 21 artículos (15.3% del corpus total), seguida por Fuel con 11 artículos (8%). Estas dos revistas, ambas situadas en los cuartiles superiores (Q1/Q2) de sus categorías, agrupan una cuarta parte de la producción total, lo que sugiere una preferencia de los autores por foros especializados en ingeniería energética y tecnología de combustibles. Existe una “cola larga” de dispersión donde otras fuentes relevantes como Applied Sciences (Switzerland) (5 artículos), Applied Thermal Engineering (4) e International Journal of Engine Research (4) contribuyen significativamente al debate académico. Esta distribución indica que, si bien existen revistas núcleo claras, la investigación sobre el ciclo Otto es transversal a diversas subdisciplinas de la ingeniería mecánica y termodinámica aplicada.

Tabla 2. Revistas principales (Top Sources) ordenadas por volumen de producción.

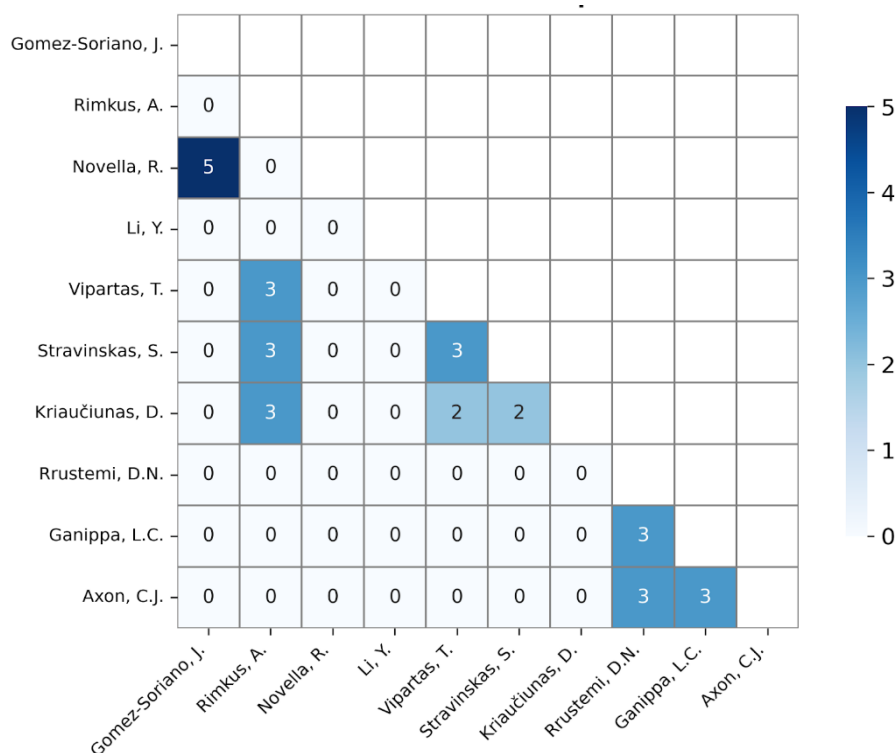
Ranking	Revista (Source Title)	Artículos	% del Corpus	Impacto (SJR/JCR)*
1	Energies	21	15,3	Q1 / Q2
2	Fuel	11	8,0	Q1
3	Applied Sciences (Switzerland)	5	3,6	Q2
4	Applied Thermal Engineering	4	2,9	Q1
5	International Journal of Engine Research	4	2,9	Q2
6	Energy	4	2,9	Q1
7	Applied Energy	4	2,9	Q1
8	Transactions of the Korean Soc. of Auto. Engineers	3	2,2	-
9	International Journal of Hydrogen Energy	3	2,2	Q2
10	ACS Omega	3	2,2	Q2
-	Resto de revistas (Dispersión)	75	54,7	-

3.3. Autores, instituciones y colaboración

El análisis de productividad a nivel de autor de la Figura 3, identifica pequeños núcleos de investigación intensiva. Los datos muestran una producción claramente fragmentada, sin la presencia de un autor que concentre o monopolicie el campo, algo bastante habitual en áreas tecnológicas que están en plena expansión. Los investigadores más prolíficos, como Gomez-

Soriano, J., Rimkus, A. y Novella, R., registran entre cinco y seis publicaciones cada uno, lo que refuerza la idea de un panorama diverso y distribuido. En términos de impacto por citación, es necesario destacar una distinción metodológica crítica: aunque el corpus se filtró para analizar solo artículos originales, el análisis de referencias en la literatura (citación global) suele estar influenciado por artículos de revisión de gran alcance. No obstante, dentro de la muestra de artículos originales, los trabajos más citados corresponden a estudios sobre combustibles alternativos (hidrógeno y mezclas), lo que refuerza la coherencia entre la productividad de los autores y las tendencias temáticas observadas.

Figura 3. Mapa de Calor de Colaboración (Heatmap) generado para los 10 autores más productivos del corpus.



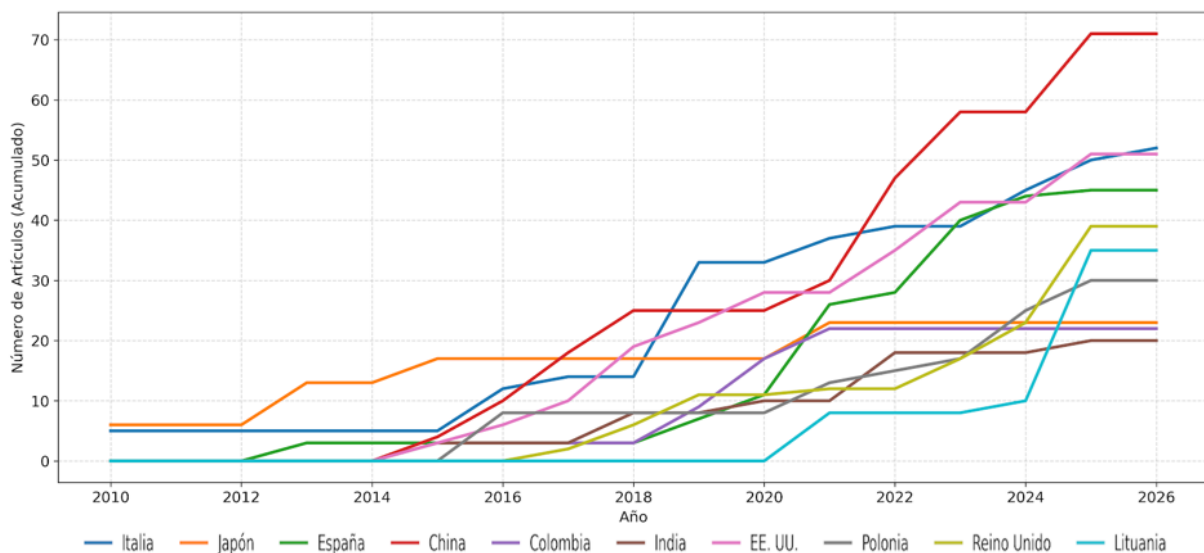
3.4. Distribución geográfica y colaboración internacional

La distribución geográfica de la producción científica (Ver Figura 4), basada en la afiliación de los autores, muestra un liderazgo compartido entre Europa y Asia. Italia encabeza el ranking con 15 documentos, seguida estrechamente por China (13), España (12) y el Reino Unido (12). Estados Unidos (11) e India (8) también presentan una participación relevante.

El análisis de las redes de colaboración apunta a un claro predominio de la investigación de alcance nacional. La mayor parte de los trabajos proviene de instituciones ubicadas en un mismo país, mientras que la cooperación internacional aparece de forma más puntual y suele

darse entre países con industrias automotrices consolidadas o con políticas energéticas afines, como ocurre en algunos clústeres europeos. Llama especialmente la atención la posición de países como Lituania y Polonia, que ocupan lugares destacados en el ranking con siete y ocho artículos, respectivamente. Este resultado sugiere la existencia de nichos de investigación bien definidos en Europa del Este.

Figura 4. Evolución de la producción científica por país.



3.5. Estructura temática y clústeres

El análisis de co-ocurrencia de palabras clave (Author Keywords) (Ver Figura 5) permite visualizar la estructura cognitiva del campo. Tras la normalización de términos (unificando variantes como “spark ignition engine” y “si engine”), se identifican tres clústeres temáticos principales que definen la agenda de investigación:

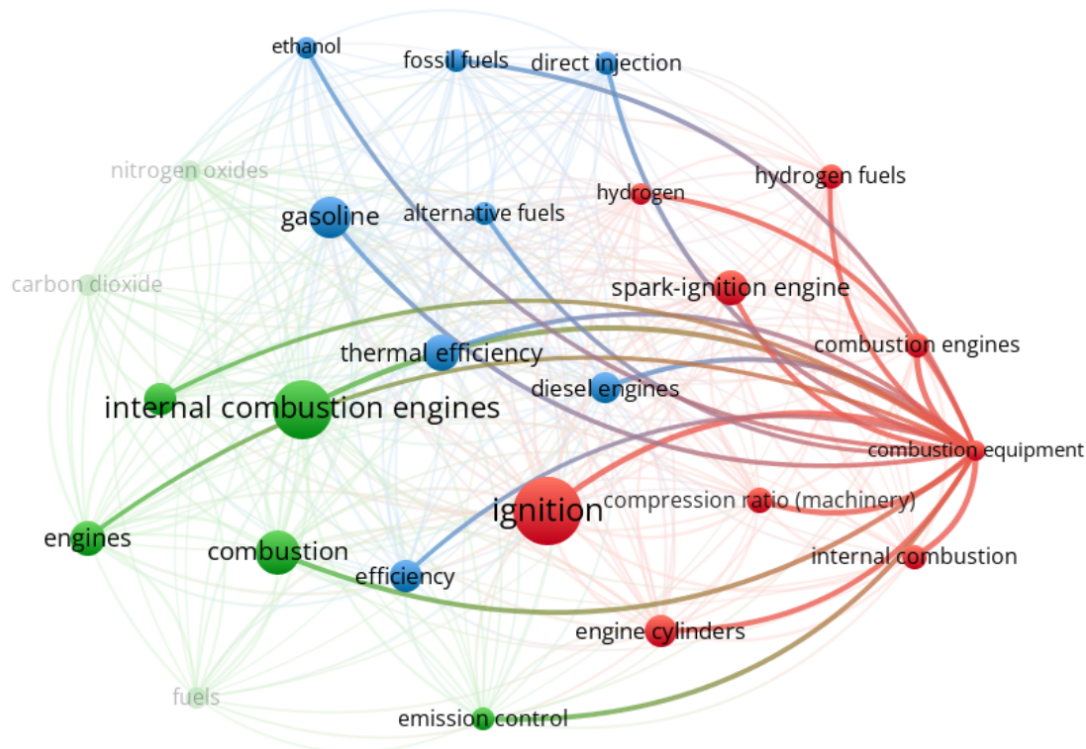
Optimización del Motor y Combustión (Clúster Central): Dominado por términos como spark ignition engine (25 ocurrencias), internal combustion engine (20) y combustion (14). Este clúster representa la investigación “clásica” enfocada en la termodinámica del motor.

Combustibles alternativos y descarbonización (clúster emergente): Se trata del frente de investigación que muestra mayor movimiento, marcado por la alta presencia de hydrogen, con 16 ocurrencias directas y un total de 33 menciones si se consideran sus variantes combinadas, junto con ethanol, que aparece en siete ocasiones. La inclusión de términos como ammonia, con cinco menciones, deja ver una línea que empieza a tomar forma en torno a vectores energéticos libres de carbono.

Desempeño y emisiones (clúster de evaluación): Este grupo reúne conceptos asociados a las

variables de salida del sistema, como emissions (11), efficiency (10), thermal efficiency (7) y fuel consumption (6), que reflejan el interés sostenido por evaluar el rendimiento y el impacto ambiental de los motores.

Figura 5. Co-ocurrencia de palabras clave visualizando los clústeres temáticos.



3.6. Síntesis de hallazgos clave

La evidencia bibliométrica confirma que la investigación sobre el ciclo Otto, lejos de estancarse ante el auge de la electrificación, ha experimentado una reactivación significativa. Los resultados validan que este renacimiento está impulsado casi exclusivamente por la necesidad de adaptar la tecnología existente a nuevos combustibles. El hallazgo más robusto es la transición temática: el “hidrógeno” ha desplazado a la gasolina como palabra clave central asociada a la eficiencia, demostrando que la comunidad científica ve en el motor de combustión interna una tecnología puente viable para la economía del hidrógeno.

3.7. Interpretación y madurez del campo

La estructura intelectual del área ha ido cambiando con el tiempo. Se pasó de una etapa centrada en la optimización geométrica, como la relación de compresión o el diseño de la cámara, a otra donde pesan más la optimización química y una termodinámica mucho más compleja. La madurez del campo se nota en cómo conceptos ligados a la sostenibilidad, como emissions y efficiency, ya no aparecen como anexos, sino integrados en el núcleo de la investigación

técnica. La aparición del amoníaco como tema de interés, todavía con un volumen reducido de menciones (cinco), apunta a que la comunidad está explorando portadores de hidrógeno distintos del hidrógeno molecular puro, en respuesta a problemas prácticos de almacenamiento y logística.

3.8. Comparación con literatura previa

Al contrastar estos resultados con estudios bibliométricos más generales sobre transporte surge una diferencia llamativa. Mientras la literatura global del sector se orienta con fuerza hacia los vehículos eléctricos de batería (BEV), el subcampo del ciclo Otto mantiene una especie de resistencia activa, con foco en los combustibles sintéticos o e-fuels. La marcada presencia europea, con países como Italia, España y el Reino Unido, contrasta con la dominancia asiática que suele observarse en los estudios bibliométricos sobre baterías. Esto podría estar reflejando una estrategia regional europea orientada a mantener vigentes sus capacidades industriales en combustión mediante la innovación en combustibles.

3.9. Implicaciones

Las implicaciones prácticas del estudio son bastante directas. La investigación académica está sentando las bases teóricas necesarias para la reconversión de la flota vehicular ligera. Para editores y financiadores de la ciencia, los datos sugieren que los proyectos que combinan “Ciclo Otto + Hidrógeno/Amoníaco” despiertan hoy más interés y tracción que aquellos enfocados únicamente en mejoras mecánicas tradicionales.

3.10. Limitaciones y robustez

Conviene reconocer, sin rodeos, las limitaciones del trabajo. En primer lugar, el uso exclusivo de Scopus, aunque aporta un estándar de calidad, deja fuera literatura técnica gris, como muchos SAE Technical Papers que no están indexados como artículos y que son muy relevantes en ingeniería automotriz. En segundo lugar, las inconsistencias en los metadatos de afiliación obligan a aplicar heurísticas de limpieza que pueden subestimar la colaboración en instituciones con múltiples sedes. Por último, la identificación de temas basada en palabras clave depende en gran medida de la terminología elegida por los autores. Por ejemplo, trabajos que utilizan “ICE” en lugar de “Spark Ignition” pueden quedar desplazados a clústeres periféricos si no se normalizan adecuadamente.

3.11. Líneas futuras de investigación

A partir de los vacíos detectados, visibles como zonas frías en los mapas temáticos, se plantean las siguientes líneas de trabajo a futuro:

Estudios de Ciclo de Vida (LCA): Se observa una brecha entre los análisis de eficiencia térmica tipo “tank-to-wheel” y la evaluación del impacto ambiental global. Resulta necesario integrar enfoques bibliométricos de LCA en el estudio de motores alimentados con hidrógeno.

Combustión de amoníaco en motores pequeños: Dado el carácter todavía incipiente de este tema, se sugiere profundizar en las barreras tecnológicas concretas, como la baja velocidad de llama o las emisiones de NOx, que hoy limitan su difusión más amplia.

Hibridación: Explorar la intersección entre un ciclo Otto optimizado y los sistemas de propulsión híbridos, un nicho que aparece poco representado en los clústeres principales de este corpus.

4. CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico del periodo 2010-2025 muestra que la investigación sobre el ciclo Otto en motores urbanos, lejos de perder relevancia frente a la electrificación, ha vivido una reactivación claramente orientada a la sostenibilidad. La evidencia da respuesta a las preguntas planteadas y deja ver una transición profunda: el foco ha pasado de la optimización mecánica tradicional a un modelado termodinámico más complejo de combustibles alternativos, donde el hidrógeno y el amoníaco empiezan a ocupar el lugar central que antes tenía la gasolina en los estudios de eficiencia energética.

El principal aporte de este trabajo está en reconocer al motor de encendido por chispa como una tecnología puente con una notable capacidad de adaptación. A diferencia de las tendencias más amplias del transporte, dominadas por las baterías, este subcampo, con un liderazgo marcado de Europa y China, apuesta por los combustibles sintéticos y por la eficiencia exergética como vías realistas para avanzar en la descarbonización. Al mismo tiempo, aparece una brecha clara entre los avances en combustibles y su incorporación efectiva en esquemas de hibridación pensados para el entorno urbano.

Estas conclusiones deben leerse a la luz de las limitaciones del enfoque adoptado. El uso exclusivo de la base de datos Scopus deja fuera literatura técnica industrial que resulta muy relevante, y las inconsistencias en los metadatos dificultan reconstruir con total precisión las

redes de colaboración existentes.

Como cierre, se identifican tres líneas futuras que resultan especialmente críticas: ir más allá de la eficiencia térmica mediante la integración de análisis completos de ciclo de vida (LCA), profundizar en los retos específicos de la combustión de amoníaco en motores de pequeña escala y avanzar en el estudio de la sinergia entre ciclos Otto optimizados y arquitecturas de propulsión híbrida.

Contribución de los Autores (CRediT): VPN: Conceptualización, Curación de datos, Investigación, Administración del proyecto, Redacción – revisión y edición. RAR: Conceptualización, Curación de datos, Investigación, Redacción – borrador original. CUM: Curación de datos, Investigación, Metodología, Software. CAV: 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

- Ahmadi, M. H., Ahmadi, M. A., Mehrpooya, M., Feidt, M., & Rosen, M. A. (2016). Optimal design of an Otto cycle based on thermal criteria. *Mechanics and Industry*, 17(1). <https://doi.org/10.1051/meca/2015049>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Broatch, A., Novella, R., Pastor, J. M., Gomez-Soriano, J., & Senecal, P. K. (2022). Engine optimization using computational fluid dynamics and genetic algorithms. En *Artificial Intelligence and Data Driven Optimization of Internal Combustion Engines* (pp. 71–101). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88457-0.00004-7>
- Caton, J. A. (2018). The thermodynamics of internal combustion engines: Examples of insights. *Inventions*, 3(2), 33. <https://doi.org/10.3390/inventions3020033>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- European Commission. (2022). *Proposal for a regulation on type-approval of motor vehicles with respect to their emissions from light-duty vehicles (Euro 7)*. European Commission.
- Fasulo, G., Bozza, F., Malfi, E., & Teodosio, L. (2021). Development of a 0D multi-zone model for fast

- and accurate prediction of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine. *E3S Web of Conferences*, 312. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131207006>
- Gómez Montoya, J. P. (2025). A thermodynamic principle for engine design: Exergy optimization of spark-ignition engines fueled by hydrogen-enriched biogas based on otto cycle foundations. *Applied Thermal Engineering*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128376>
- Gómez Montoya, J. P., Amell, A. A., & Olsen, D. B. (2022). Phenomenological analysis of the combustion of gaseous fuels to measure energy quality and capacity to produce work in SI engines, part 2. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 144(5). <https://doi.org/10.1115/1.4053941>
- Gomez Montoya, J. P., & Olsen, D. B. (2024). A novel theory for designing SI engines based on exergy efficiency, entropy, octane rating, and fuels' physicochemical properties for Otto cycles. *Energy Conversion and Management*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119144>
- Gong, C., Deng, B., Wang, S., Su, Y., Gao, Q., & Liu, X. (2008). Investigation on firing behavior of the spark-ignition engine fueled with methanol, liquefied petroleum gas (LPG), and methanol/LPG during cold start. *Energy and Fuels*, 22(6), 3779–3784. <https://doi.org/10.1021/ef800471h>
- Gong, C. M., Li, J., Li, J. K., Li, W. X., Gao, Q., & Liu, X. J. (2011). Effects of ambient temperature on firing behavior and unregulated emissions of spark-ignition methanol and liquefied petroleum gas/ methanol engines during cold start. *Fuel*, 90(1), 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.08.012>
- Han, T., Singh, R., Lavoie, G., Wooldridge, M., & Boehman, A. (2020). Multiple injection for improving knock, gaseous and particulate matter emissions in direct injection SI engines. *Applied Energy*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114578>
- Heywood, J. B. (1988). Internal combustion engine fundamentals. En *Choice Reviews Online* (2nd ed., Vol. 26, Número 02). McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.5860/choice.26-0943>
- Hu, Q., Xu, L., & Goodman, E. (2009). Non-even spread NSGA-II and its application to conflicting multi-objective compatible control. *2009 World Summit on Genetic and Evolutionary Computation, 2009 GEC Summit - Proceedings of the 1st ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation, GEC'09*, 223–230. <https://doi.org/10.1145/1543834.1543866>
- International Energy Agency. (2023). CO2 Emissions in 2022. En *CO2 Emissions in 2022*. IEA. <https://doi.org/10.1787/12ad1e1a-en>
- Kosloff, R., & Rezek, Y. (2017). The quantum harmonic otto cycle. *Entropy*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/entropy19040123>

[org/10.3390/e19040136](https://doi.org/10.3390/e19040136)

- Kumar, S., Sharma, P., & Pal, K. (2023). Application of Machine Learning Approach in Internal Combustion Engine: A Comprehensive Review. En K. A., Z. M., S. K.A., & L. H. (Eds.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 165–178). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8517-1_12
- Lee, S., Kim, Y., Lee, J., Kim, K., Lee, S., Min, K., & Oh, S. (2023). Energy and exergy analyses of hydrogen-fueled spark ignition engine with various air excess ratios and ignition timings. *Fuel*, 349. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128588>
- Li, R., Shari, Z., & Ab Kadir, M. Z. A. (2025). A review on multi-objective optimization of building performance - Insights from bibliometric analysis. *Heliyon*, 11(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42480>
- Liu, J., Yu, Q., Cheng, J., Yakubu, A. U., Ye, X., & Xiong, S. (2025). Numerical study of a cold start at the ambient temperature of 243 K on methanol engine with coolant heating. *Fuel*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135138>
- Liu, X., Ji, C., Gao, B., Wang, S., & Yang, J. (2014). A quasi-dimensional model for hydrogen-enriched gasoline engines with a new laminar flame speed expression. En L. H. & Y. J. (Eds.), *Energy Procedia* (Vol. 61, pp. 327–330). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1117>
- Mashkour, M. A., & Ahmed, A. Y. (2020). Thermodynamic Modeling for Analysing the Performance and Emissions of Spark-Ignition Engines. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 24(2), 57–79. <https://doi.org/10.31272/jeasd.24.2.5>
- Minango, P., Zambrano, M., Suarez, C. I., & Minango, J. (2026). Deep-Learning-Based Mobile Application for Real-Time Recognition of Cultural Artifacts in Museum Environments. *Applied Sciences*, 16(9), 4064. <https://doi.org/10.3390/app16094064>
- Moradi, J., Banagar, I., Mehranfar, S., Mahmoudzadeh Andwari, A., Könnö, J., & Gharehghani, A. (2024). Advancing combustion technologies and alternative fuels in hybrid electric vehicles: a pathway to high-efficiency, low-emission propulsion systems. *Future Technology*, 3(4), 42–54. <https://doi.org/10.55670/fpll.futech.3.4.5>
- Patil, G., Pode, G., Diouf, B., & Pode, R. (2024). Sustainable Decarbonization of Road Transport: Policies, Current Status, and Challenges of Electric Vehicles. *Sustainability (Switzerland)*, 16(18), 8058. <https://doi.org/10.3390/su16188058>

- Pedram, A., Kadioğlu, S. C., Kabakçioğlu, A., & Müstecaplıoğlu, I. E. (2023). A quantum Otto engine with shortcuts to thermalization and adiabaticity. *New Journal of Physics*, 25(11). <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ad0857>
- Reitz, R. D., Ogawa, H., Payri, R., Fansler, T., Kokjohn, S., Moriyoshi, Y., Agarwal, A. K., Arcoumanis, D., Assanis, D., Bae, C., Boulouchos, K., Canakci, M., Curran, S., Denbratt, I., Gavaises, M., Guenther, M., Hasse, C., Huang, Z., Ishiyama, T., ... Zhao, H. (2020). IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*, 21(1), 3–10. <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>
- Sarkar, P., Khanapuri, V. B., & Tiwari, M. K. (2025). Integrating machine learning with dynamic multi-objective optimization for real-time decision-making. *Information Sciences*, 690. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121524>
- Shi, S. S., Ge, Y. L., & Chen, L. G. (2022). Power density analysis and multi-objective optimization of an irreversible Otto cycle. *Zhongguo Kexue Jishu Kexue/Scientia Sinica Technologica*, 52(11), 1716–1728. <https://doi.org/10.1360/SST-2021-0168>
- United Nations. (2021). The Sustainable Development Goals Report 2021. En *United Nations publication issued by the Department of Economic and Social Affairs*. United Nations. <https://digitalibrary.un.org/record/3932350>
- Wang, Y. (2020). A novel two-zone thermodynamic model for spark-ignition engines based on an idealized thermodynamic process. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153801>
- Wang, Y., Li, Q. H., Huang, X. H., & Wu, Q. (2015). LQ/H ∞ controller design for aero-engine based on improved NSGA II. *Hangkong Dongli Xuebao/Journal of Aerospace Power*, 30(4), 985–991. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2015.04.027>
- World Health Organization. (2023). *Ambient (outdoor) air pollution*. WHO.
- Yan, F., Xu, L., & Wang, Y. (2018). Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: from fundamental fuel properties to engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1457–1488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.227>
- Zhao, J., & Xu, F. (2018). Finite-time thermodynamic modeling and a comparative performance analysis for irreversible Otto, Miller and Atkinson cycles. *Entropy*, 20(1). <https://doi.org/10.3390/e20010075>
- Zhou, J. Y. (2021). Four Common Deficiencies in the Current Thermodynamics of Internal Combustion

Engines. *SAE Technical Papers*, 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-01-5098>

Zhou, Y., Gainey, B., & Lawler, B. (2020). An ultrafast multi-zone HCCI model with Autoignition, Global reaction and Interpolation (AGI) for achieving comparable accuracy to detailed chemical kinetics models. *Combustion and Flame*, 221, 487–501. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.016>