

Evolución del conocimiento científico sobre la termodinámica del ciclo Otto en motores de combustión interna

Evolution of Scientific Knowledge on the Thermodynamics of the Otto Cycle in Internal Combustion Engines

Victor Pachacama-Nasimba^(a), Isis Samaniego-Santillán^(a), Jordan Moreira-Loor^(a), Britney Rodriguez-Rodriguez^(a)

^(a) Carrera de Ingeniería Mecánica – Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.

Autor para correspondencia: vpachacaman@uteq.edu.ec

Vol. 5, Issue 1 (2026): January-June

DOI: 10.53591/easi.V3i2.3194

ISSN 2953-6634

ISSN Print: 3073-1526

Submitted: March 15, 2026

Revised: March 31, 2026

Accepted: April 02, 2026

Engineering and Applied
Sciences in Industry

University of Guayaquil. Ecuador

Frequency/Year: 2

Web:

revistas.ug.edu.ec/index.php/easi

Email:

easi-publication.industrial@ug.edu.ec

How to cite this article:

Pachacama-Nasimba, V., et al. (2026).

Evolución del conocimiento científico sobre la termodinámica del ciclo Otto en motores de combustión interna. *EASI: Engineering and Applied Sciences in Industry*, 5(1), 28-39
<https://doi.org/10.53591/easi.V3i2.3194>

Articles in journal repositories are freely open in digital form. Authors can reproduce and distribute the work on any non-commercial site and grant the journal the right of first publication with the work simultaneously licensed under a CC BY-NC-ND 4.0.

Resumen. La transición hacia una movilidad sostenible ha redefinido el papel del motor de combustión interna, exigiendo optimizaciones termodinámicas para la descarbonización del transporte. Este estudio analiza la evolución bibliométrica de la investigación sobre el análisis termodinámico del ciclo Otto entre 2010 y 2025, identificando su estructura intelectual y tendencias emergentes. Bajo un enfoque cuantitativo, se examinaron 686 artículos indexados en Scopus mediante Bibliometrix y VOSviewer. Los resultados evidencian un crecimiento sostenido de la producción científica, con un máximo en 2025 y la revista Fuel como principal fuente de publicación. Se observa una transición desde la eficiencia térmica convencional hacia enfoques basados en exergía e integración de combustibles alternativos, como hidrógeno y bioetanol. Asimismo, se identifica liderazgo institucional en potencias tecnológicas y una participación destacada de Brasil en Latinoamérica. El estudio sistematiza el conocimiento disponible y señala futuras líneas de investigación para la sostenibilidad energética y ambiental.

Palabras claves: Ciclo Otto, Motor de combustión interna, Análisis termodinámico, Eficiencia térmica, Encendido por chispa.

Abstract. The transition toward sustainable mobility has redefined the role of the internal combustion engine, requiring thermodynamic optimizations to support transport decarbonization. This study analyzes the bibliometric evolution of research on the thermodynamic analysis of the Otto cycle between 2010 and 2025, identifying its intellectual structure and emerging trends. Using a quantitative approach, 686 Scopus-indexed articles were examined through Bibliometrix and VOSviewer. The results reveal sustained growth in scientific production, reaching its highest level in 2025, with Fuel identified as the leading publication source. A shift is observed from conventional thermal efficiency toward exergy-based approaches and the integration of alternative fuels such as hydrogen and bioethanol. Furthermore, institutional leadership is concentrated in major technological powers, while Brazil shows a prominent role within Latin America. The study systematizes the available knowledge and identifies future research directions to support energy and environmental sustainability.

Keywords: Otto cycle, Internal combustion engines, Thermodynamic analysis, Thermal efficiency, Spark ignition.

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética está reconfigurando el debate sobre eficiencia y sostenibilidad en los sistemas de conversión de energía, pero no ha desplazado de inmediato a los motores de combustión interna (MCI) de los sectores donde su densidad energética, la infraestructura instalada y su versatilidad siguen siendo decisivas. En particular, los motores de encendido por chispa, sustentados en el ciclo termodinámico Otto, continúan ocupando un lugar relevante en movilidad y en aplicaciones de potencia, y su coexistencia con tecnologías emergentes se proyecta en escenarios realistas de las próximas décadas (Kalghatgi, 2018a, 2018b; Leach et al., 2020). Esta persistencia vuelve inevitable el “doble desafío” para la ingeniería térmica: elevar la eficiencia desde la primera y la segunda ley, y, a la vez, reducir impactos ambientales mediante hibridación y combustibles de menor huella de carbono, en coherencia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7) (Reitz et al., 2020). En economías emergentes, donde la renovación del parque automotor suele ser más lenta y la dependencia de combustibles líquidos permanece estructural, entender qué está cambiando en la investigación sobre el ciclo Otto no es un asunto teórico, sino una condición para orientar decisiones técnicas y de I+D con sentido de realidad.

En ese marco, el ciclo Otto funciona como un núcleo conceptual que conecta física, diseño y operación. Su versión idealizada permite formalizar relaciones entre compresión, adición y rechazo de calor y expansión, y con ello razonar sobre límites de desempeño y sobre cómo se “paga” la eficiencia en términos de irreversibilidades y restricciones operativas. Sin embargo, el interés científico actual se desplaza, con fuerza, hacia la brecha entre ese modelo aire-estándar y el ciclo real, porque allí se concentran los mecanismos que definen la eficiencia al freno: transferencia de calor y fricción, pérdidas de bombeo, tiempos finitos de combustión, variación de propiedades termofísicas, combustión incompleta y, en motores SI, la detonación (knock) como frontera práctica de operación (Caton, 2018; Kalghatgi, 2018b). En otras palabras, el ciclo Otto sigue siendo la base, pero ya no basta con repetirlo como esquema; se lo reinterpreta como un sistema dinámico real donde combustión y termodinámica de ciclo se condicionan mutuamente.

La literatura publicada entre 2010 y 2025 muestra esa evolución con nitidez. A los enfoques clásicos de calores específicos constantes y análisis ideal se les suman, cada vez más, modelos de termodinámica de tiempo finito y análisis exergéticos que incorporan irreversibilidades internas, transferencia de calor dependiente del tiempo y propiedades variables del fluido de trabajo (Ge et al., 2008). En paralelo, los estudios sobre combustibles alternativos han empujado el modelamiento hacia escenarios donde cambian la cinética y la liberación de calor, haciendo que parámetros como la relación de compresión o el tiempo de encendido dejen de ser “ajustes” y se conviertan en variables críticas para mantener estabilidad, rendimiento y control de emisiones (Tran et al., 2021). La adopción de herramientas computacionales también ha ampliado el nivel de detalle: la articulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con modelos termodinámicos 0D y 1D ha permitido representar turbulencia y transferencia de calor en la cámara de combustión con mayor realismo, refinando predicciones de eficiencia térmica y potencia más allá de las idealizaciones (Cengel & Boles, 2002).

El último quinquenio, además, concentra esfuerzos que no se limitan a “mejorar el Otto”, sino a replantear configuraciones y modos de operación para acercarse a regiones termodinámicamente favorables. Se discuten tecnologías de recuperación de calor residual, el empleo de ciclos Miller y Atkinson en configuraciones híbridas, y la inyección directa de alta presión como habilitadores de mayores eficiencias bajo restricciones reales (Dahham et al., 2022). El análisis termodinámico del ciclo Miller como variante del Atkinson ha sido presentado como una ruta de mejora, siempre que se manejen adecuadamente la compresión efectiva y la sobrealimentación para sostener el flujo másico de aire (Page et al., 2021). En la misma línea, se enfatiza que el ciclo Otto ideal sigue siendo un ancla conceptual, pero las irreversibilidades asociadas a transferencia de calor y a la cinética de combustión obligan a modelos de simulación más complejos si se pretende explicar el desempeño real (Kalghatgi, 2018b).

A nivel de combustibles y combustión, el estado del arte subraya que las ganancias de eficiencia raramente provienen de un “truco” aislado. Se ha sistematizado cómo propiedades del combustible condicionan el potencial de eficiencia térmica en motores SI, no solo por su química, sino por su capacidad de habilitar mayor compresión efectiva, mayor dilución y operación más cercana a regímenes de alto rendimiento termodinámico (Szybist et al., 2021). En paralelo, la evolución de tecnologías de ignición por precámara se ha descrito como un cambio con consecuencias directas sobre la tasa de liberación de calor, la fracción quemada temprana y la susceptibilidad a knock, abriendo espacio para operación pobre (lean burn) y mejoras de eficiencia en enfoques de bajo carbono (Zhu et al., 2022). También se reportan avances integradores que combinan aumento de relación de compresión, gestión térmica y

enriquecimiento con hidrógeno, particularmente en arquitecturas híbridas, aunque persisten desafíos en control de detonación y variabilidad cíclica (Dahham et al., 2022). Desde una lectura de segunda ley, se han propuesto marcos exergéticos generalizados para analizar mezclas como biogás enriquecido con hidrógeno, destacando la influencia del coeficiente adiabático y de la composición del combustible sobre la eficiencia teórica del ciclo Otto (Gómez Montoya, 2025).

Pese a esta producción abundante y técnicamente sofisticada, el campo presenta una limitación estructural que se vuelve más visible conforme crece el volumen de publicaciones y se diversifican los enfoques. Existen revisiones valiosas sobre componentes o tecnologías específicas, pero el conocimiento aparece disperso: se multiplican los trabajos experimentales y de simulación directa, mientras queda menos sistematizado cómo ha evolucionado, como “objeto de investigación”, la termodinámica del ciclo Otto en la era de la descarbonización (Abubakar et al., 2024). Esa fragmentación dificulta responder preguntas que hoy importan: cuáles son las corrientes dominantes, qué temas emergen o declinan, qué comunidades y redes de colaboración sostienen el avance, y qué vacíos persisten cuando cambian los combustibles, los modos de combustión o las metas de desempeño. También vuelve opaca la dimensión geográfica del desarrollo científico, con subrepresentación relativa de análisis comparativos a escala regional y local, pese a que contextos latinoamericanos plantean condiciones particulares, como variaciones de altitud o calidad de combustibles, que influyen en la agenda aplicada.

En este punto, el vacío de investigación es claro: falta un análisis bibliométrico longitudinal y sistémico, focalizado en la termodinámica del ciclo Otto, que permita cartografiar la estructura intelectual del campo y su dinámica temporal en el periodo 2010–2025, identificar redes de colaboración, autores y fuentes influyentes, y reconocer frentes emergentes con criterios reproducibles. La existencia de bibliometrías en subcampos cercanos, como motores alimentados con hidrógeno, confirma el valor del enfoque para revelar trayectorias, hotspots y problemas persistentes, pero no sustituye una caracterización específica de la termodinámica del ciclo Otto en motores SI en su propio desarrollo reciente (Abubakar et al., 2024). Sin esa cartografía, resulta difícil distinguir si la producción científica se organiza principalmente alrededor de modelos de ciclo (aire-estándar extendido, ciclo real), alrededor de tecnologías (ignición avanzada), alrededor de combustibles y propiedades, o alrededor de metas (límites de eficiencia), y con qué asimetrías temáticas y geográficas.

La relevancia de abordar este vacío va más allá de “ordenar bibliografía”. Un mapeo bibliométrico bien ejecutado puede convertir grandes volúmenes de registros en conocimiento útil para orientar decisiones de investigación y desarrollo, diferenciando campos maduros de frentes emergentes y reduciendo duplicación de esfuerzos, con implicancias directas para la eficiencia energética y la reducción de emisiones bajo el marco del ODS 7 (Reitz et al., 2020). Metodológicamente, la bibliometría ofrece herramientas para analizar productividad, impacto y colaboración, y para mapear redes de co-citación, acoplamiento bibliográfico y co-ocurrencia de palabras clave, aproximando la organización temática del conocimiento. En términos de buenas prácticas, se recomienda sostener estos estudios en estrategias de búsqueda transparentes, ventanas temporales justificadas y depuración consistente, triangulando análisis de desempeño con técnicas de mapeo científico para llegar a interpretaciones robustas (Donthu et al., 2021). En el plano instrumental, el uso de bibliometrix para análisis reproducible en R y VOSviewer para visualización y clustering de redes ha contribuido a estandarizar flujos de trabajo en ciencia de la información aplicada a ingeniería, aunque exige decisiones analíticas justificadas e interpretación contextualizada (Aria & Cuccurullo, 2017; van Eck & Waltman, 2010).

Desde la base conceptual, este estudio entiende el ciclo Otto como representación termodinámica del motor SI y, al mismo tiempo, como un sistema real sujeto a pérdidas e irreversibilidades. En su formulación ideal, el ciclo se compone de compresión isentrópica, adición de calor a volumen constante, expansión isentrópica y rechazo de calor a volumen constante, con una eficiencia térmica ideal que depende de la relación de compresión y del cociente de calores específicos, expresada clásicamente como $\eta = 1 - (1/r)^{(\gamma-1)}$ (Caton, 2018; Heywood, 1988). Sin embargo, el análisis contemporáneo incorpora fricción, transferencia de calor finita y combustión química, y recurre a la segunda ley para cuantificar destrucción de exergía y generación de entropía, lo que permite discutir límites termodinámicos alcanzables bajo restricciones reales y explicar por qué ciertas rutas tecnológicas exhiben rendimientos decrecientes o cambian de cuello de botella cuando se modifican combustibles y modos de operación (Caton, 2018; Gómez Montoya, 2025; Szybist et al., 2021; Zhu et al., 2022). Este marco guía la lectura bibliométrica: los patrones de citación, las palabras clave y los clústeres se interpretan como huellas de cómo la comunidad científica ha operacionalizado, extendido o reorientado la noción de “ciclo Otto” frente a demandas de eficiencia, emisiones y compatibilidad con vectores energéticos no convencionales.

En coherencia con lo anterior, el objetivo general de este artículo es analizar la evolución del conocimiento científico sobre la termodinámica del ciclo Otto en motores de combustión interna durante el periodo 2010–2025, mediante un enfoque bibliométrico mixto basado en literatura indexada en Scopus. A partir de ese propósito, se plantean preguntas de investigación que cubren tanto desempeño como estructura: ¿cuál ha sido la dinámica de crecimiento de la producción científica y cuáles son las revistas, autores e instituciones con mayor impacto?; ¿cómo han evolucionado los clústeres temáticos y las palabras clave, y qué relación guardan con avances tecnológicos, marcos regulatorios y el ODS 7?; ¿qué frentes de investigación emergentes se identifican y qué vacíos temáticos persisten?; y ¿cómo se configuran las redes de colaboración científica al contrastar escalas globales con lecturas regionales y locales? Como hipótesis de trabajo de carácter exploratorio, se espera observar (H1) una aceleración de la producción científica en la segunda mitad del periodo 2010–2025; (H2) un desplazamiento temático desde aproximaciones más idealizadas hacia enfoques integrados donde combustión, propiedades del combustible y tecnologías de ignición y operación ganan centralidad; y (H3) una estructura de colaboración concentrada en polos científicos globales, con menor centralidad relativa de la producción regional y local. En un sentido complementario, se plantea que la agenda investigativa tiende a transitar desde un foco en potencia hacia una orientación más marcada por eficiencia extrema y compatibilidad con combustibles de bajo carbono, bajo presión de marcos ambientales globales.

El alcance del estudio se delimita al periodo 2010–2025 y a registros recuperados desde Scopus, por su estandarización de metadatos para análisis bibliométrico. En términos de corpus, se considera producción revisada por pares y revisiones de conferencias de alto impacto, excluyendo literatura gris para asegurar calidad y comparabilidad. El recorte temporal permite capturar la transición desde combustibles convencionales hacia hibridación y movilidad sostenible, y dialoga con el contexto normativo asociado a la consolidación de estándares de emisiones Euro V/VI. Metodológicamente, se adopta un enfoque mixto: cuantitativo para el análisis de desempeño (producción, citas, índice h y leyes bibliométricas como Price y Lotka) y para el mapeo científico (redes de co-citación, acoplamiento bibliográfico y co-ocurrencia de palabras clave), y cualitativo para interpretar el sentido técnico de los clústeres y de los documentos más influyentes. El procesamiento y visualización se apoya en herramientas consolidadas como VOSviewer y Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017; van Eck & Waltman, 2010), lineamientos de rigor y transparencia recomendados para estudios bibliométricos (Donthu et al., 2021). El análisis se plantea con lectura global y desagregaciones regionales (América Latina) y locales, atendiendo a la afiliación y/o producción atribuible, con el fin de explorar asimetrías y patrones geográficos en la configuración del campo.

El artículo se organiza del siguiente modo: tras esta introducción, se describe el protocolo metodológico de búsqueda, depuración y análisis; luego se presentan los resultados bibliométricos y el mapeo de redes, acompañados de una interpretación temática; posteriormente se discuten los hallazgos a la luz del estado del arte técnico sobre límites de eficiencia, combustibles y tecnologías de combustión e ignición avanzada; finalmente, se sintetizan las conclusiones y se proponen implicancias para la agenda futura de investigación en sistemas térmicos aplicados a motores SI.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño del estudio y enfoque metodológico

Se desarrolló un estudio bibliométrico descriptivo, retrospectivo y longitudinal orientado a caracterizar la evolución del conocimiento científico sobre la termodinámica y el análisis de ciclo del motor de encendido por chispa (spark ignition, SI) asociado al marco conceptual del ciclo Otto durante el periodo 2010 - 2025. El enfoque metodológico integró un componente cuantitativo de análisis de desempeño, centrado en productividad, impacto y colaboración, y un componente relacional de mapeo científico para representar la estructura conceptual e intelectual del campo mediante redes de co-ocurrencia, coautoría, co-citación y acoplamiento bibliográfico.

2.2. Fuente de datos y estrategia de búsqueda bibliográfica

La fuente única de información fue Scopus (Elsevier), seleccionada por la estandarización de sus metadatos y su cobertura en ingeniería y ciencias de la energía. La búsqueda avanzada se ejecutó el 12 de febrero de 2026 y dicha fecha se registró como punto de corte para la replicación de métricas dinámicas como el conteo de citas. La estrategia de recuperación se formuló en los campos de Título, Resumen y Palabras Clave (TITLE-ABS-KEY), incorporando

sinónimos y truncadores para motores SI (spark ignition, SI engine, gasoline/petrol engine) y enfoques termodinámicos relevantes (cycle analysis, thermodynamic, exerg, finite-time thermodynamics, air-standard).

La ecuación final aplicada en Scopus fue:
TITLE-ABS-KEY (("spark ignition" OR "SI engine*" OR "gasoline engine*" OR "petrol engine*") AND ("cycle analysis" OR thermodynamic* OR exerg* OR "finite-time thermodynamics" OR "air-standard" OR "air standard"))) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")).

2.3. Criterios de elegibilidad y selección del corpus

Los registros recuperados se exportaron desde Scopus en formato CSV. Con fines analíticos se incluyeron metadatos bibliográficos, de citación, de afiliación y de referencias, tales como autores (incluyendo nombres completos e identificadores), título, año, fuente, volumen y paginación, conteo de citas, DOI y EID, afiliaciones y autores con afiliaciones, resumen, palabras clave de autor e indexadas, referencias citadas y dirección de correspondencia cuando estuvo disponible.

Los criterios de inclusión restringieron el corpus a artículos de revista en etapa final de publicación, publicados entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2025, con pertinencia temática explícita al análisis termodinámico, exergético o de ciclo de motores SI asociado al ciclo Otto, evaluada mediante título, resumen y palabras clave, y con metadatos suficientes para el procesamiento bibliométrico. Se excluyeron revisiones (incluyendo revisiones sistemáticas y metaanálisis), actas de congresos, libros, capítulos, editoriales, notas, cartas, short surveys y cualquier documento distinto de artículo; asimismo, se excluyeron duplicados, registros irrelevantes por cribado de título y resumen, y aquellos con metadatos insuficientes o ambiguos, aplicando exclusión conservadora ante dudas.

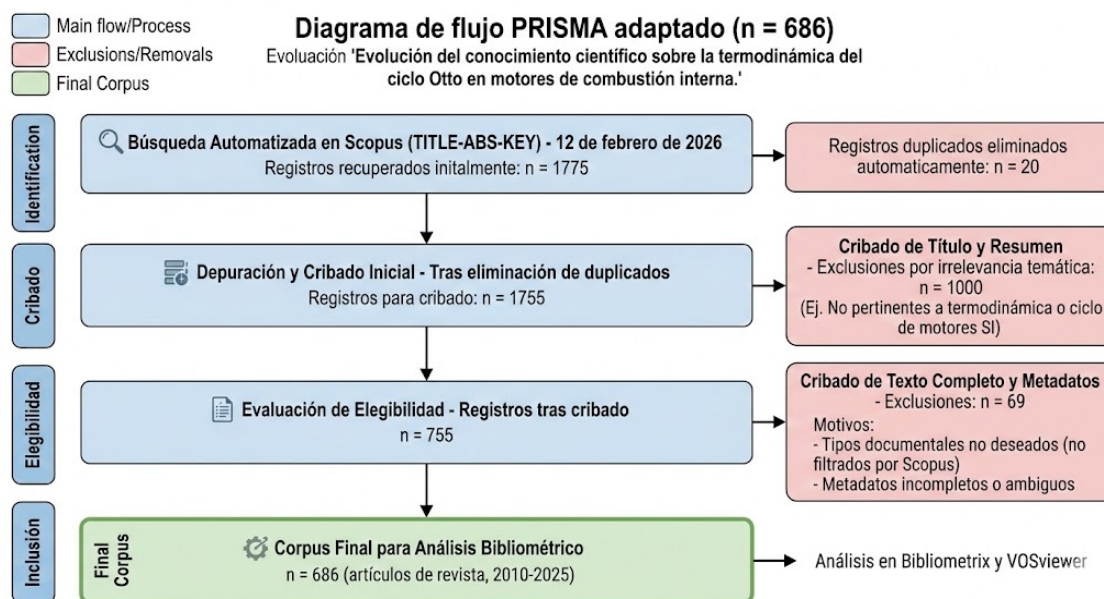


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA adaptado con contadores de cada fase

La trazabilidad del corpus se organizó mediante un flujo PRISMA adaptado para revisiones bibliométricas. La identificación inicial recuperó 1775 registros; en la depuración se eliminaron 20 duplicados. En el cribado de título y resumen se excluyeron 1000 documentos por irrelevancia temática respecto del objeto de estudio. En la etapa de elegibilidad se excluyeron 69 registros adicionales por corresponder a tipos documentales no deseados que no fueron filtrados por Scopus o por presentar metadatos incompletos. El corpus final consolidado para el análisis bibliométrico quedó compuesto por 686 artículos.

2.1. Procesamiento, depuración y normalización de los datos

La depuración, normalización y análisis se realizaron en el entorno R mediante el paquete bibliometrix y su interfaz Biblioshiny (Aria & Cuccurullo, 2017). Los registros del CSV consolidado se importaron y sometieron a controles de consistencia, incluyendo validación de campos críticos (año, título, fuente, DOI/EID, autores, afiliaciones, citas, palabras clave y referencias) y verificación de duplicidad priorizando identificadores únicos (EID y, secundariamente, DOI y coincidencia de título). Para reducir errores por homonimia y variantes de escritura, se priorizó el uso de identificadores de autor y de afiliación provistos por Scopus cuando estuvieron disponibles, complementando con revisión de inconsistencias evidentes en nombres de instituciones y países.

La normalización terminológica se centró en las palabras clave, integrando Author Keywords e Index Keywords para maximizar cobertura temática. Se construyó un tesoro manual en un archivo de texto plano para consolidar sinónimos y variantes (por ejemplo, SI engine, spark-ignition engine y gasoline/petrol engine), armonizar singular y plural, unificar guiones y espacios (air-standard y air standard) y expandir acrónimos hacia una forma canónica; además, se depuraron términos genéricos o no informativos que inflaran artificialmente la conectividad de las redes. La construcción del tesoro se apoyó en revisión iterativa de los términos más frecuentes y en la consistencia con el marco conceptual del estudio.

2.2. Herramientas y técnicas de análisis bibliométrico

Las matrices se generaron en bibliometrix y la visualización y agrupamiento de redes se realizaron en VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010), aplicando conteo completo y normalización por fuerza de asociación. Para mejorar legibilidad sin alterar el cálculo del corpus, se establecieron umbrales operativos de inclusión de cinco ocurrencias mínimas para términos en co-ocurrencia, cinco documentos mínimos para países e instituciones en coautoría, y tres documentos mínimos para autores en redes de coautoría. Adicionalmente, se reportaron las referencias metodológicas esenciales utilizadas en el procesamiento y visualización.

2.3. Indicadores bibliométricos y técnicas de mapeo científico

El análisis bibliométrico contempló, en primer lugar, indicadores de desempeño para describir la producción anual e identificar fuentes, autores, instituciones y países por productividad e impacto, empleando recuentos de documentos, recuentos de citas e índice h cuando correspondió al nivel de autor o fuente. En segundo lugar, se construyeron matrices y redes de mapeo científico para explorar la estructura conceptual e intelectual del dominio. Asimismo, se elaboraron redes de co-citación de referencias y de acoplamiento bibliográfico de documentos; para la visualización se restringieron a los nodos con mayor frecuencia en el corpus, manteniendo el cálculo sobre el conjunto completo de artículos.

2.4. Consideraciones de validez, alcance y reproducibilidad

La delimitación geográfica de la búsqueda fue global, sin filtros regionales en la ecuación de recuperación. La dimensión espacial se operacionalizó ex post a partir de la información de afiliación registrada en Scopus, de modo que la producción y la colaboración se analizaron por país e institución. Para análisis comparativos se definió una escala regional como América Latina y, para asignar país a cada documento en análisis descriptivos, se utilizó la afiliación del autor de correspondencia cuando estuvo disponible; en su ausencia, se consideró la primera afiliación listada por Scopus como criterio operativo. En artículos con múltiples afiliaciones o múltiples países, el análisis de colaboración se reportó como redes basadas en conteo completo para representar la existencia efectiva de vínculos, consignando esta decisión como parte de la transparencia metodológica.

Como procedimientos de validación, confiabilidad y control de sesgos se estandarizó la extracción en una única fecha, se preservó la ecuación final exacta y se aplicaron filtros por tipo documental y etapa de publicación para homogeneidad editorial. La depuración incluyó verificación de duplicados, consistencia de metadatos y estandarización terminológica mediante tesoro, y el cribado temático se realizó por revisión de título y resumen con exclusión conservadora ante ambigüedad. Para auditoría y replicación se conservaron el CSV original exportado de Scopus, el CSV consolidado y depurado, el tesoro utilizado, así como los parámetros y salidas empleados para reproducir tablas, figuras y mapas de redes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evolución de la producción científica y fuentes principales

El análisis de la trayectoria temporal de la producción científica revela un campo de estudio en fase de crecimiento sostenido, con un corpus final consolidado de 686 artículos. La evolución cronológica (Figura 2) muestra que, tras una fluctuación inicial entre 2010 y 2013, la investigación sobre la termodinámica del ciclo Otto experimentó un ascenso notable, alcanzando un pico de 65 publicaciones en 2025. Este crecimiento no es meramente cuantitativo; refleja una revitalización del interés por el motor de encendido por chispa (SI) en el marco de la transición energética. La progresión de 34 artículos en 2010 a más del doble al final del periodo sugiere que, lejos de ser una tecnología obsoleta, el análisis termodinámico del ciclo Otto continúa siendo un pilar fundamental para la optimización de la eficiencia y la reducción de emisiones contaminantes.

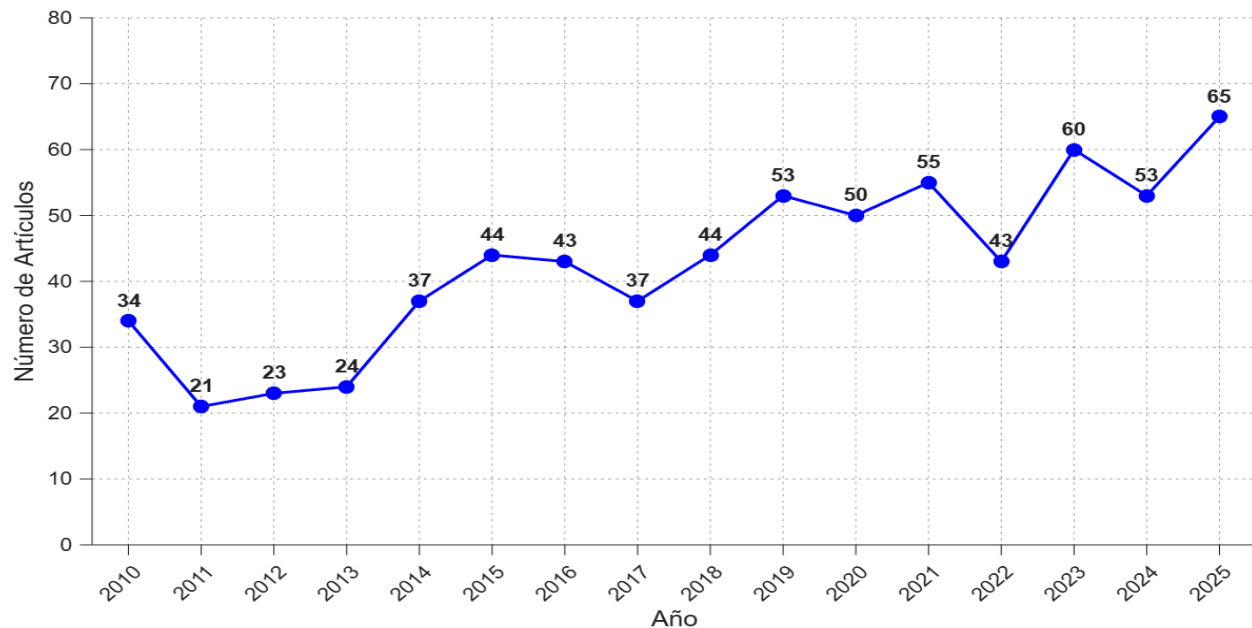


Figura 2. Evolución de la producción científica anual del corpus global (2010–2025).

En cuanto a la dispersión y concentración de la literatura, la Tabla 1 identifica las fuentes con mayor impacto y productividad. La revista *Fuel* lidera el campo con 69 artículos, lo que posiciona la discusión termodinámica en el centro del debate sobre la química de los combustibles y su comportamiento en la cámara de combustión. Es relevante destacar la segunda posición de *International Journal of Hydrogen Energy* (43 artículos), lo cual evidencia una transición paradigmática: la aplicación de los principios del ciclo Otto a vectores energéticos alternativos como el hidrógeno. La presencia de títulos especializados como *SAE International Journal of Engines* y *International Journal of Engine Research* confirma un núcleo editorial sólido (Core de Bradford) que garantiza el rigor técnico de la producción analizada. Esta distribución sugiere que la investigación actual integra la termodinámica clásica con la ciencia de materiales y la ingeniería de combustibles avanzados.

Tabla 1. Principales revistas por número de artículos publicados.

Revista	Número de artículos
Fuel	69
International journal of hydrogen energy	43
Sae international journal of engines	37
Energy	36
International journal of engine research	35
Energy conversion and management	31
Applied thermal engineering	28

Combustion and flame	26
Energies	26
Applied energy	24

Fuente: Elaboración propia con Bibliometrix (2026).

3.2. Análisis de rendimiento y redes de colaboración

El análisis de la productividad geográfica revela una hegemonía de potencias tecnológicas globales, pero con nichos de especialización regional significativos. En el contexto latinoamericano (Figura 3), Brasil emerge como el líder indiscutible con 58 artículos, seguido de Colombia con 30. Esta predominancia brasileña puede interpretarse a la luz de su histórica ventaja competitiva en el uso de bioetanol: el Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), activo desde 1975, y su evolución hacia la política RenovaBio han consolidado un ecosistema de investigación aplicada donde el análisis del ciclo Otto es crítico para optimizar el rendimiento de motores flex-fuel, que representan más del 80% de los vehículos ligeros vendidos en Brasil en la última década. Esta condición estructural ha incentivado una producción científica sostenida con foco en la interacción entre propiedades del combustible y parámetros de ciclo relación de compresión, tiempo de encendido, gestión de knock financiada en parte por agencias como FAPESP y CNPq. Las fluctuaciones observadas en la producción colombiana y chilena, en cambio, sugieren una dependencia de ciclos de financiación asociados a proyectos específicos en eficiencia energética y movilidad sostenible, sin el respaldo de una política industrial de largo plazo equivalente.

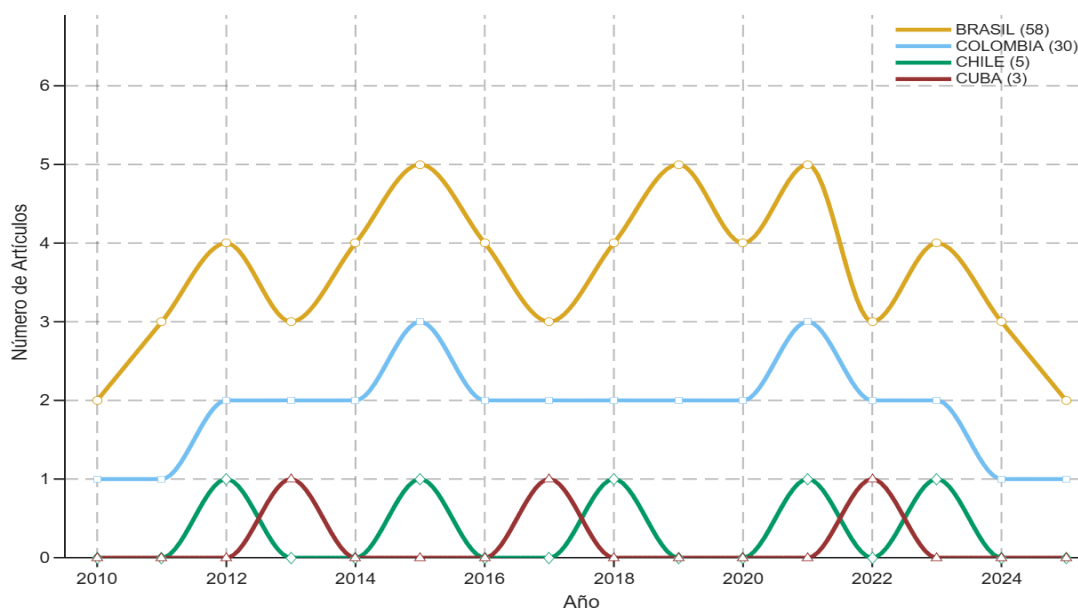


Figura 3. Producción científica anual de países latinoamericanos (2010-2025).

A nivel global, el mapa de colaboración (Figura 4) muestra una estructura de red densa, con nodos prominentes en China, Estados Unidos e India. La interconectividad entre estos nodos y los países europeos subraya que la optimización termodinámica es un desafío transnacional. Los vínculos de colaboración representados en el mapa reflejan no solo la coautoría, sino también la transferencia de conocimiento técnico y el uso compartido de infraestructuras de simulación avanzada. La posición de América Latina en esta red, aunque periférica en comparación con el eje Asia-Norteamérica, muestra puentes crecientes de colaboración internacional, lo que fortalece la validez y el alcance de sus hallazgos científicos.

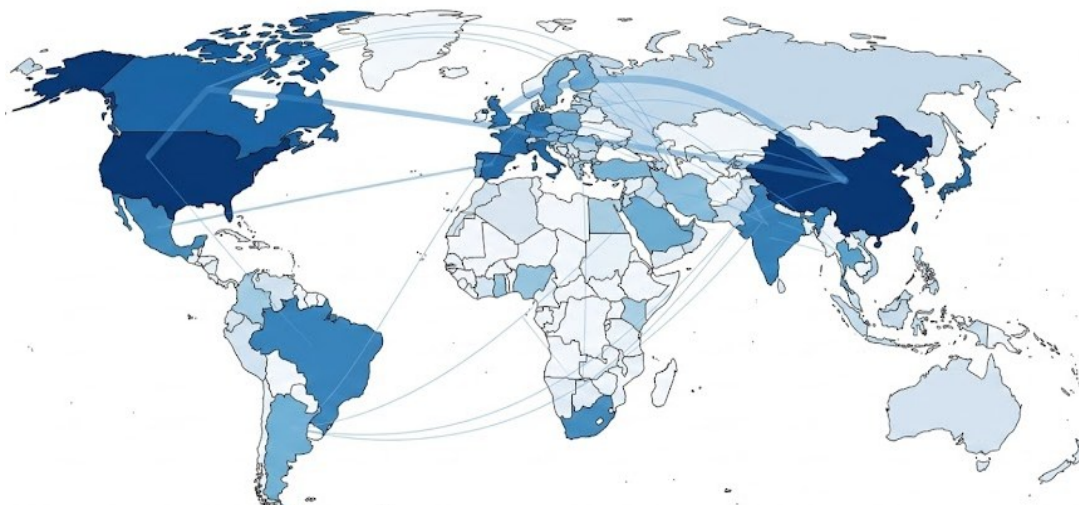


Figura 4. Mapa de red de colaboración entre países.

3.3. Estructura conceptual: temas de investigación consolidados y emergentes

La estructura intelectual del campo, visualizada mediante la co-ocurrencia de palabras clave (Figura 5), revela cuatro clústeres temáticos principales que definen la agenda de investigación actual. El nodo central "engines" actúa como articulador entre el análisis de combustión ("ignition", "combustion knock") y la eficiencia termodinámica ("thermodynamics", "efficiency"). Se observa un clúster emergente (verde) fuertemente vinculado a "ethanol fuels" y "alternative fuels", lo que valida la tendencia detectada en el análisis de fuentes sobre la diversificación del ciclo Otto hacia combustibles no fósiles.

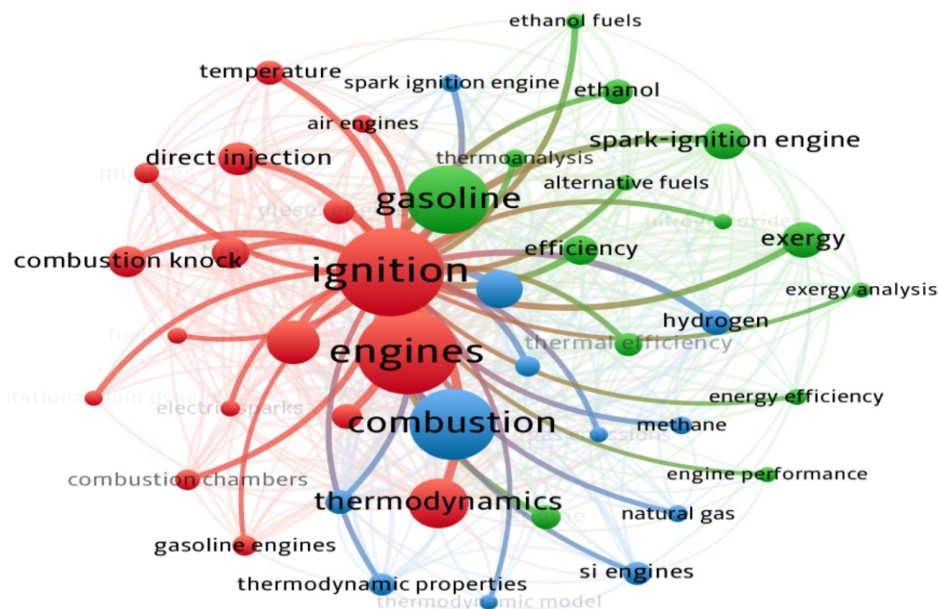


Figura 5. Mapa de Co-ocurrencia de Palabras Clave (Clústeres Temáticos).

El clúster centrado en "exergy" y "exergy analysis" representa una frontera del conocimiento donde la segunda ley de la termodinámica se aplica para identificar las irreversibilidades del ciclo Otto con mayor precisión que el análisis convencional. Esta transición del análisis de primera ley (energía) al de segunda ley (exergía) es un indicador de la madurez del campo. Asimismo, la vinculación entre "direct injection" y "combustion chambers" sugiere que la

investigación técnica está hoy volcada hacia el control preciso del frente de llama para mitigar el knock o detonación, permitiendo relaciones de compresión más elevadas y, por ende, mayores eficiencias térmicas.

3.4. Análisis de productividad científica frente a otras regiones

La correlación de la producción de Latinoamérica frente al resto del mundo (Figura 6) ilustra la inserción de la región en el ecosistema científico global. La red de colaboración muestra que Brasil, Colombia y Cuba mantienen vínculos estratégicos con potencias como Estados Unidos, Alemania, Italia y el Reino Unido. Este patrón de colaboración es fundamental para la reproducibilidad de los estudios y para la alineación con los estándares internacionales de experimentación.

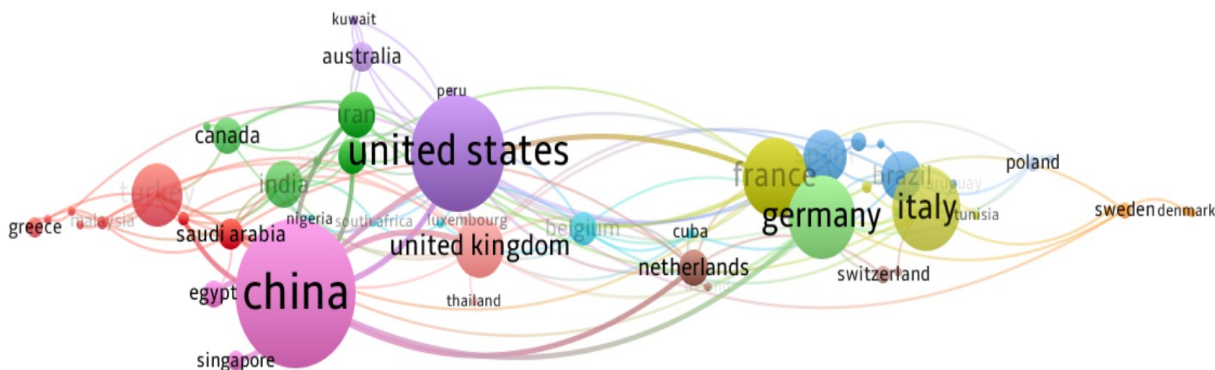


Figura 6. Correlación de la producción científica Latinoamérica frente a otras regiones y países.

La discusión integradora permite afirmar que la evolución del conocimiento sobre el ciclo Otto ha pasado de una fase de caracterización mecánica básica a una fase de optimización multivariable asistida por computación y centrada en la sostenibilidad. Mientras que los estudios iniciales del periodo (2010) se centraban en el desempeño con gasolina convencional, el corpus actual (2025) prioriza la exergía, los combustibles alternativos y la reducción de emisiones de GEI. La convergencia entre los indicadores de desempeño (crecimiento de citas) y el mapeo científico (emergencia de clústeres de exergía) confirma que el campo de la termodinámica de motores SI está en un proceso de sofisticación teórica y relevancia práctica ante la crisis climática global.

El análisis de co-citación de referencias permite identificar los documentos fundacionales que estructuran el campo. Las referencias con mayor densidad de co-citación en el corpus corresponden a trabajos clásicos de termodinámica del motor SI entre ellos Heywood (1988) y Caton (2018) y a estudios de termodinámica de tiempo finito, lo que revela que la comunidad científica sostiene simultáneamente un anclaje en los fundamentos y una orientación hacia modelos irreversibles más realistas. Esta doble gravitación explica por qué los clústeres temáticos no son excluyentes: el clúster de exergía y el clúster de eficiencia térmica convencional coexisten y se citan mutuamente, indicando una transición gradual más que un reemplazo abrupto de paradigma.

Desde el acoplamiento bibliográfico que agrupa documentos con mayor solapamiento de referencias recientes, se observa que los artículos publicados a partir de 2020 forman frentes de investigación diferenciados alrededor de tres ejes: la integración de hidrógeno y bioetanol como combustibles en motores SI, el análisis exergético bajo condiciones de operación con dilución y lean burn, y la aplicación de técnicas de optimización multivariable y aprendizaje automático para la calibración de parámetros de ciclo. Estos frentes no aparecen con igual peso en la producción anterior a 2015, lo que confirma empíricamente la hipótesis H2 sobre el desplazamiento temático hacia enfoques integrados.

En cuanto a las redes de coautoría, la estructura identificada tiene implicaciones directas para la agenda de I+D en ingeniería térmica. La concentración de vínculos entre nodos de China, Estados Unidos e India refleja una capacidad instalada de simulación computacional y experimentación de alto coste que dificulta la inserción de grupos emergentes sin infraestructura equivalente. Para la región latinoamericana, los puentes de colaboración identificados particularmente los de Brasil con Alemania e Italia, y los de Colombia con España representan rutas estratégicas de

acceso a equipamiento y metodologías que permiten estudios sobre combustibles locales (bioetanol de caña, biogás) con validación internacional. Esta lectura sugiere que fortalecer esos vínculos existentes, más que intentar replicar capacidades globales, es la vía más eficiente para aumentar el impacto regional y alinearse con los objetivos de descarbonización del transporte establecidos en el marco del ODS 7 (Reitz et al., 2020; Donthu et al., 2021).

El análisis comparativo entre los cuatro clústeres identificados en el mapa de co-ocurrencia evidencia además una asimetría de madurez: mientras el clúster centrado en "combustion knock" e "ignition" muestra alta densidad interna de vínculos indicativa de un problema técnico bien delimitado con comunidad consolidada, el clúster de "alternative fuels" y "ethanol" exhibe mayor dispersión y conexiones más débiles con el clúster de exergía. Esto señala que la integración conceptual entre ciencia de combustibles alternativos y análisis termodinámico de segunda ley constituye un vacío activo y una frontera de investigación con alto potencial de impacto, especialmente relevante para contextos donde la disponibilidad de combustibles sintéticos o renovables condiciona las decisiones de diseño de motor, contribuyendo así de manera directa a la agenda de acceso a energía limpia, asequible y eficiente que define el ODS 7 en el horizonte 2030 (Reitz et al., 2020)."

CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico desarrollado permite concluir que el estudio de la termodinámica del ciclo Otto en motores de combustión interna atraviesa una fase de sofisticación técnica y vigencia estratégica, desvirtuando la percepción de obsolescencia ante el avance de la electrificación. La trayectoria ascendente de la producción científica entre 2010 y 2025 confirma que la optimización de los motores de encendido por chispa sigue siendo un pilar fundamental en la transición energética global. Se ha dado respuesta al objetivo central de caracterizar la evolución de este campo, identificando una transición paradigmática: la investigación ha migrado de un enfoque centrado exclusivamente en el desempeño mecánico y la combustión de derivados del petróleo hacia un análisis termodinámico avanzado que prioriza la exergía, el uso de vectores energéticos como el hidrógeno y el bioetanol, y la mitigación de emisiones mediante el control de la detonación. Esta evolución refleja una madurez del dominio científico, donde la eficiencia de la segunda ley de la termodinámica se ha consolidado como la métrica crítica para la competitividad de las tecnologías de combustión interna en la década actual.

El aporte científico de este trabajo radica en la construcción de una cartografía estructural que revela la interconexión entre la ciencia de los combustibles y la termodinámica de ciclos. La identificación de clústeres temáticos específicos, como los asociados al análisis exergético y la inyección directa, proporciona a la comunidad académica una hoja de ruta clara sobre las fronteras del conocimiento. Asimismo, el estudio destaca el papel de América Latina, con Brasil a la vanguardia, evidenciando que la especialización regional en combustibles alternativos ha generado nichos de excelencia científica con impacto global. Esta investigación ofrece una base empírica sólida para investigadores y tomadores de decisiones, permitiendo alinear los esfuerzos de I+D con las tendencias dominantes de descarbonización y alta eficiencia térmica que exige el mercado energético contemporáneo.

No obstante, el estudio presenta limitaciones inherentes al diseño metodológico que deben ser consideradas. La utilización de Scopus como fuente única de datos, si bien garantiza la calidad de los metadatos y una amplia cobertura técnica, excluye registros presentes en otras bases como Web of Science o repositorios regionales especializados que podrían complementar la visión espacial del campo. Asimismo, la restricción a artículos originales en etapa final de publicación deja fuera la "literatura gris", como informes técnicos industriales y actas de congresos, donde suelen reportarse innovaciones tecnológicas en fases tempranas de desarrollo. Finalmente, la normalización terminológica mediante tesauros manuales, aunque rigurosa, está sujeta a la interpretación de los autores frente a la rápida evolución de la nomenclatura técnica en ingeniería.

Hacia el futuro, se identifican líneas de investigación emergentes que demandan atención prioritaria. Es imperativo profundizar en la integración de técnicas de aprendizaje automático (machine learning) para la optimización en tiempo real de los parámetros del ciclo Otto, así como en el modelado termodinámico de motores destinados a la hibridación pesada. Se sugiere también expandir el análisis hacia estudios comparativos que integren múltiples bases de datos y herramientas de minería de texto para capturar la evolución terminológica con mayor granularidad. Por último, resulta fundamental investigar el comportamiento exergético de los motores SI bajo condiciones de operación con combustibles sintéticos (e-fuels), asegurando que el ciclo Otto evolucione en total coherencia con los objetivos de neutralidad de carbono y sostenibilidad ambiental para el horizonte post-2030.

REFERENCIAS

- Abubakar, S., Muhamad Said, M. F., Abas, M. A., Ismail, N. A., Khalid, A. H., Roslan, M. F., & Kaisan, M. U. (2024). Hydrogen-fuelled internal combustion engines - Bibliometric analysis on research trends, hotspots, and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 61, 623–638. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.280>
- 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>
- Caton, J. A. (2018). Maximum efficiencies for internal combustion engines: Thermodynamic limitations. *International Journal of Engine Research*, 19(10), 1005–1023. <https://doi.org/10.1177/1468087417737700>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). Thermodynamics an engineering approach. In 9th (Ed.), *Energy* (Vol. 1). McGraw-Hill Education. <http://www.ulb-tu-darmstadt.de/tocs/182108600.pdf>
- Dahham, R. Y., Wei, H., & Pan, J. (2022). Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. *Energies*, 15(17), 6222. <https://doi.org/10.3390/en15176222>
- 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>
- 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>
- Ge, Y., Chen, L., & Sun, F. (2008). Finite-time thermodynamic modelling and analysis of an irreversible Otto-cycle. *Applied Energy*, 85(7), 618–624. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.09.008>
- Heywood, J. B. (1988). Internal combustion engine fundamentals. In *Choice Reviews Online* (2nd ed., Vol. 26, Number 02). McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.5860/choice.26-0943>
- Kalghatgi, G. (2018a). Is it really the end of internal combustion engines? *Engineering*, 4(4), 425–427. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.06.009>
- Kalghatgi, G. (2018b). Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*, 225, 965–974. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.076>
- Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for the internal combustion engine to contribute to greenhouse gas emissions reductions. *Transportation Engineering*, 1, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., & Mulrow, C. D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>
- Reitz, R. D., Ogawa, H., Payri, R., Fan, J., Kokjohn, S., Agarwal, A., Sellnau, M., & Zhong, S. (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>
- Szybist, J. P., Busch, S., McCormick, R. L., Pihl, J. A., Splitter, D. A., Ratcliff, M. A., Kolodziej, C. P., Storey, J. M. E., Moses-DeBusk, M., Vuilleumier, D., Sjöberg, M., Sluder, C. S., Rockstroh, T., & Miles, P. (2021). What fuel properties enable higher thermal efficiency in spark-ignited engines? *Progress in Energy and Combustion Science*, 82, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100876>
- Tran, M.-K., Akinsanya, M., Panchal, S., Fraser, R., & Fowler, M. (2021). Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance and Fuel Economy Optimization. *Applied Sciences*, 11(1), 228. <https://doi.org/10.3390/app11010228>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Zhu, S., Akehurst, S., Lewis, A., & Yuan, H. (2022). A review of the pre-chamber ignition system applied on future low-carbon spark ignition engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111872. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111872>