



Revisión Sistemática De Literatura Sobre Los Modos De Combustión HCCI, RCCI Y PCCI

Systematic Literature Review On HCCI, RCCI And PCCI Combustion Modes

Aldo Jefferson Lliguin Apo, Diego Alejandro Jumbo Iñiguez²

¹Universidad nacional de Loja, aldo.lliguin@unl.edu.ec

²Universidad nacional de Loja, aldo.lliguin@unl.edu.ec

Resumen

Este estudio presenta una revisión sistemática de los modos de combustión a baja temperatura aplicados a motores de encendido por compresión, con énfasis en las estrategias HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), PCCI (Premixed Charge Compression Ignition) y RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition). La investigación se basa en un enfoque metodológico mixto que combina las directrices PRISMA y el marco de Kitchenham, garantizando un proceso estructurado, reproducible y riguroso para la selección y análisis de literatura. Se identificó un conjunto inicial de 52 estudios mediante búsquedas en bases de datos indexadas, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SpringerLink. Tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 90 artículos relevantes para análisis detallado. Los resultados indican que la combustión HCCI alcanza alta eficiencia térmica gracias a la homogeneidad de la mezcla, aunque presenta limitaciones en el control del inicio de la combustión. Las estrategias PCCI muestran una reducción significativa de emisiones de material particulado, pero presentan desafíos en el control de productos de combustión incompleta. La combustión RCCI demuestra el desempeño más equilibrado, permitiendo la reducción simultánea de NO_x y material particulado manteniendo una operación estable y niveles de eficiencia competitivos. En conclusión, los modos de

combustión a baja temperatura representan un enfoque prometedor para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental en motores diésel.

Palabras clave: Combustión a baja temperatura, Combustión RCCI, Eficiencia térmica, Reducción de emisiones.

Abstract

This study presents a systematic review of low-temperature combustion modes applied to compression ignition engines, focusing on HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), PCCI (Premixed Charge Compression Ignition), and RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) strategies. The research is based on a mixed methodological approach combining PRISMA guidelines and the Kitchenham framework, ensuring a structured, reproducible, and rigorous process for literature selection and analysis. An initial set of 52 studies was identified through searches in indexed databases, including Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and SpringerLink. After applying inclusion and exclusion criteria, a total of 90 relevant articles were selected for detailed analysis. The results indicate that HCCI combustion achieves high thermal efficiency due to improved mixture homogeneity, although it faces limitations related to combustion timing control. PCCI strategies show a significant reduction in particulate matter emissions but present challenges in controlling incomplete combustion products such as hydrocarbons and carbon monoxide. In contrast, RCCI combustion demonstrates the most balanced performance, enabling simultaneous reduction of NO_x and particulate matter while maintaining stable operation and competitive efficiency levels. Additionally, factors such as injection strategy, fuel reactivity, and operating conditions were identified as key parameters influencing engine performance and emissions. In conclusion, low-temperature combustion modes represent a promising approach for improving energy efficiency and reducing environmental impact in diesel engines; however, further developments in control strategies and experimental standardization are required for practical implementation.

Keyword: Emissions reduction, Low temperature combustion, RCCI combustion, Thermal efficiency.



1. Introducción

En las últimas décadas, la reducción de las emisiones de los motores de combustión interna ha podido convertirse en una prioridad a nivel mundial, esto es impulsado por regulaciones ambientales que cada vez son más estrictas, además de la necesidad de poder mejorar el grado de eficiencia que se tiene en ciertos sectores como el transporte pesado, la generación eléctrica o la maquinaria agrícola.

Según la Europe's Environment 2025 La Agencia Europea de Medio Ambiente nos cuenta que las formas de controlar lo que se emite y las mejoras en la tecnología de los sistemas de combustión ayudaron a reducir mucho varios contaminantes del aire. Entre lo más destacado, %, los óxidos de nitrógeno (NO_x) un 53%, y las partículas finas (PM) un 38%. De manera parecida, las emisiones de monóxido de carbono (CO) disminuyeron más o menos entre un 60% y un 70%. Y los hidrocarburos que no se quemaron (HC) también bajaron, entre un 50% y un 65% aproximadamente. Esto pasó sobre todo por la llegada de sistemas de inyección más modernos, el control electrónico de la combustión, la recirculación de gases de escape (EGR) y las tecnologías de combustión a baja temperatura (LTC). El avance progresivo de la electrificación y la creación de normas para evitar el efecto invernadero, los motores de combustión interna continúan siendo parte indispensable en diferentes aplicaciones, por lo tanto, se desarrolla de diferentes estrategias avanzadas que pueda ayudar a minimizar emisiones sin llegar a comprometer el desempeño térmico [1].

Con este contexto emergen diferentes modos de combustión de baja temperatura (Low Temperature Combustion, LTC) que tiene el objetivo principal en reducir diferentes temperaturas pico que se tienen en el cilindro esto para minimizar de forma simultánea la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x) o material particulado (PM), mitigando de esta forma el compromiso NO_x-PM característico, que se tiene en esta combustión de diésel convencional [2]. Dentro de este tipo de estrategias también se destacan 3 principales enfoques Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), Premixed Charge Compression Ignition (PCCI) y Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) [3].

Según Lou modo HCCI está basado en la preparación de mezclas aire combustible de forma homogénea que permite auto encenderse por efecto que se tiene de la compresión, sin ningún tipo de intervención directa de la chispa o de la inyección tardía dominante. Todo este proceso permite que se pueda generar una combustión homogénea que resulta casi simultánea a temperaturas bajas, permitiendo de esta forma que se reduzca el NO_x y PM, mejorando con



esto la eficiencia térmica [4]. Sin embargo, otra de las principales limitaciones está en la dificultad de poder controlar el inicio en la combustión y lograr mantener una estabilidad cuando se encuentra bajo cargas variables[17][81][83].

Como evolución del HCCI, el modo PCCI principalmente se basa en tener una mezcla premezclada por medio de ajustes durante la temporización y el fraccionamiento en el proceso de la inyección, de esta forma se busca mejorar la gestión de este proceso [5]. Este tipo de esquema surge del combustible que se mezcla previamente con el aire antes de empezar el proceso de combustión, mientras que otro tipo de fracción se inyecta de forma controlada para poder modular la liberación de calor. Este tipo de enfoques amplía el rango de operación si se lo compara con HCCI, pero puede llegar a generar incrementos durante las emisiones de hidrocarburos (HC), y monóxido de carbono (CO) cuando estén bajo condiciones de combustión incompleta [6][42][47][43].

Posteriormente Flores-Lasluisa(2022), dice que el modo RCCI llega a presentar evoluciones adicionales al llegar a incorporar 2 combustibles que tienen diferentes reactividades químicas: uno posee una baja de actividad y es introducido tempranamente (por el puerto de admisión), mientras que el otro es de una alta reactividad que se lo inyecta de forma directa en la compresión. Este tipo de estrategias llega a generar estratificación en la reactividad que sucede en el interior del cilindro, logrando con esto que se permita un mayor control al inicio y durante la tasa de liberación del calor, esto se traduce en mejoras de forma simultánea sobre todo en la eficiencia y en la reducción de emisiones en las configuraciones convencionales frente a HCCI y PCCI [7][60][74][61].

La evolución desde HCCI a PCCI y posterior a RCCI ha podido evidenciar transiciones tecnológicas que están orientadas a poder incrementar el control y la estabilidad en estos procesos de combustión, todo esto sin perder la baja temperatura de combustión. Sin embargo, se reportan resultados que han sido heterogéneos ocasionados principalmente por diferencias que existen en las configuraciones experimentales, los tipos de motor, las condiciones de carga, estrategias de control y métricas que emplean para evaluar el desempeño [8]. Esta variabilidad dificulta que se pueda establecer comparaciones de forma directa y conclusiones definitivas acerca de cuál de todos estos modos permite un mejor equilibrio entre la eficiencia, la estabilidad y las emisiones que generan los modos de combustión[21][24].

Por la poca existencia de artículos de comparación entre los modos de combustión de baja temperatura , se siente la necesidad de realizar un análisis comparativo que esté estructurado es decir que se consideren estudios experimentales desarrollados en motores de combustión interna bajo condiciones de operación similares, realizando evaluaciones métricas comunes como la eficiencia térmica, la estabilidad de la combustión, y el comportamiento de emisiones (PM, HC, NO_x, CO). Una de las síntesis críticas respecto a todos estos aspectos podrá permitir una mejor clarificación acerca de las ventajas relativas, limitaciones técnicas y nivel de madurez actual que se tiene en cada modo de combustión logrando contribuir a una comprensión de forma integral acerca de la aplicabilidad real que se tiene en estos sistemas de combustión interna que son más avanzados[55].

En base a los avances tecnológicos de los modos de combustión de baja temperatura se nota la necesidad de revisar los avances en tema combustión ,para así determinar si los modos de combustión de baja temperatura tienen futuro para bajar las emisiones contaminantes, teniendo como meta comparar los modos de combustión HCCI, PCCI Y RCCI en términos de eficiencia térmica, también como el comportamiento de las emisiones reguladas en los modos de combustión a su vez revisar que parámetros operativos influyen en el desempeño y estabilidad de los modos HCCI,PCCI Y RCCI.

2. Metodología

2.1. Justificación y objetivo de la revisión

En los últimos años, los modos de combustión de baja temperatura (Low Temperature Combustion, LTC), particularmente HCCI, PCCI y RCCI, han sido ampliamente investigados como estrategias para mitigar el compromiso tradicional entre emisiones de NO_x y material particulado (PM) en motores diésel convencionales. Sin embargo, pese al volumen creciente de publicaciones, la literatura presenta tres limitaciones estructurales relevantes.

Primero, existe una marcada heterogeneidad metodológica entre estudios experimentales. Las investigaciones difieren en tipo de motor, relación de compresión, sistemas de inyección, estrategias de control, combustibles utilizados y condiciones operativas (régimen y carga), lo que dificulta establecer comparaciones directas entre resultados reportados.

Segundo, se observa una ausencia de criterios de evaluación comparativa de desempeño. No todos los estudios reportan simultáneamente métricas como eficiencia térmica de freno (BTE), coeficiente de variación del IMEP (COVIMEP), y emisiones normalizadas en g/kWh.



Esta falta de uniformidad impide identificar con claridad cuál modo de combustión ofrece el mejor equilibrio entre eficiencia, estabilidad y reducción de emisiones bajo condiciones equivalentes.

Tercero, aunque existen revisiones narrativas sobre cada tecnología de manera individual, se evidencia una escasez de análisis comparativos estructurados que integren HCCI, PCCI y RCCI bajo un mismo marco de evaluación técnica, particularmente enfocados en motores diésel experimentales y cuantificables de desempeño.

Estas inconsistencias generan un vacío en la literatura respecto a una clasificación técnica sistemática que permita comprender el nivel real de madurez tecnológica, ventajas relativas y limitaciones operativas de cada modo de combustión. En consecuencia, se justifica la necesidad de una revisión sistemática que organice y sintetice evidencia experimental reciente bajo criterios homogéneos de comparación.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática y comparativa de estudios experimentales publicados y relacionados con los modos de combustión de baja temperatura HCCI, PCCI y RCCI en motores de encendido por compresión. Con el fin de evaluar de manera estructurada su desempeño térmico, estabilidad de combustión y comportamiento de emisiones bajo condiciones operativas reportadas en la literatura científica reciente[55][21][49]

2.2. Alcance de la revisión

La presente revisión contribuye al campo de la ingeniería automotriz y de motores de combustión interna mediante: la sistematización comparativa de evidencia experimental reciente, la identificación de tendencias tecnológicas predominantes en estrategias LTC, la clasificación técnica de ventajas y limitaciones operativas de HCCI, PCCI y RCCI, el establecimiento de un marco comparativo que facilite futuras investigaciones experimentales y desarrollos en calibración de motores diésel avanzados. El estudio se delimitó a motores encendidos por compresión, estudios recientes publicaciones de los últimos 10 años en revistas indexadas evaluación de métricas cuantitativas de desempeño térmico, estabilidad y emisiones. No se incluyeron estudios exclusivamente numéricos ni aplicaciones en motores de encendido por chispa[24].

2.3. Protocolo de revisión

La presente revisión sistemática se desarrolló bajo un protocolo previamente establecido, basado en las directrices del modelo internacional que ayuda organizar seleccionar, y



presentar de manera ordena los artículos científicos también llamado PRISMA . Además, del enfoque propuesto por Kitchenham el cual ayuda llevar de manera ordenada la metodología e investigar de forma precisa para revisiones sistemáticas en ingeniería. El protocolo fue elaborado antes del inicio del proceso de búsqueda bibliográfica, con el propósito de llevar transparencia y referencias con rigurosidad metodológica.

Se adoptó un enfoque mixto PRISMA-kitchenham, en el cual en primera instancia el enfoque PRISMA se empleó para estructurar el proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de estudios, asegurando la trazabilidad del procesos mediante diagramas de flujo mientras que el enfoque de Kitchenham se utilizó para definir de manera sistemática las fases de planificación, conducción y reporte de la revisión, así como para estructurar la formulación de preguntas de investigación, criterios de inclusión/exclusión y procedimientos de extracción y síntesis de datos.

Las fases de protocolo se realizaron siguiendo el enfoque de Kitchenham, dicho protocolo se estructuró de la siguiente forma Planning, conducting the systematic review y presentation of results como se indica en la Figura 1.

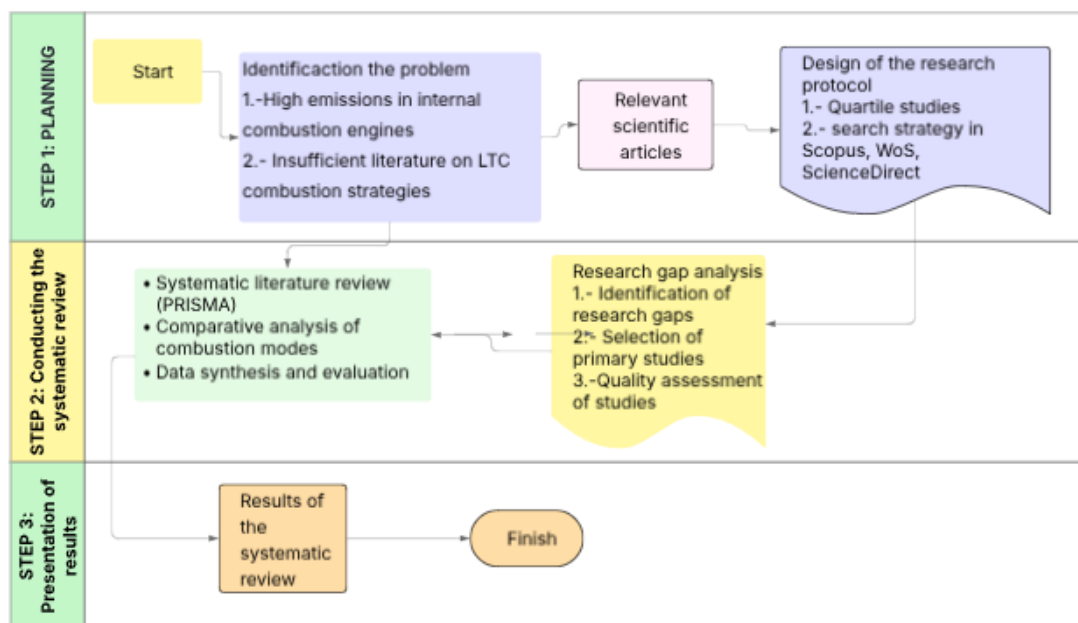


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología SLR.

Con la finalidad de estructurar una búsqueda de manera sistemática, se definieron categorías semánticas de búsquedas organizadas en niveles, los cuales permitieron la construcción de

ecuaciones booleanas. Cada nivel representa un conjunto de variables relacionadas con el fenómeno de estudio, incluyendo modos de combustión, tipo de motor, parámetros de desempeño, emisiones y estrategias de inyección. Esta estructura facilita la replicabilidad del proceso de búsqueda y la identificación de estudios irrelevantes. Como se muestra en la Anexo 1.

Además, las ecuaciones que se aplicaron las siguientes líneas de código para la búsqueda estructurada:

Los criterios de inclusión fueron artículos publicados en revistas indexadas en Scimago Journal Rank (SJR) además de estudios experimentales realizados en motores diésel mono cilíndricos o multicilíndricos, investigaciones que reporten al menos dos de las siguientes métricas:

- Eficiencia térmica (BTE)
- Presión media efectiva
- Coeficiente de variación del IMEP
- Emisiones de NO_x, HC, CO o PM
- Comparaciones directas entre modos HCCI, PCCI, RCCI, o evaluaciones individuales bajo condiciones controladas.

Sin embargo, los criterios de exclusiones abordan las siguientes características: Artículos puramente numéricos sin validación experimental, estudios enfocados exclusivamente en simulación CFD sin datos experimentales, trabajos duplicados en congresos no indexados, revisiones narrativas sin datos cuantitativos comparables de los últimos 10 años de publicaciones.

```
(TITLE-ABS-KEY ("HCCI" OR "PCCI" OR "RCCI" OR "Low Temperature Combustion"))  
AND (TITLE-ABS-KEY ("diesel engine" OR "compression ignition engine")) AND (TITLE-  
ABS-KEY ("thermal efficiency" OR "brake thermal efficiency" OR "NOx" OR "particulate  
matter" OR "COVIMEP" OR "combustion stability")) AND (PUBYEAR > 2016 AND  
PUBYEAR < 2026)AND
```

Para el proceso de selección de los estudios, inicialmente se identificaron 155 artículos, tras la eliminación de duplicados y la revisión de títulos y resúmenes. Posteriormente se realizó lectura completa aplicando los criterios definidos, obteniendo un total de 90 estudios finales.



La reproducibilidad del protocolo establece mediante los siguientes criterios: bases de datos consultadas, periodo temporal analizado, ecuaciones de búsqueda, criterios elegibilidad, variables extraídas, procedimientos de selección, así el proceso se puede ver con claridad en la Figura 2. Por lo tanto, cualquier investigador puede replicar el proceso siguiendo las directrices propuestas.

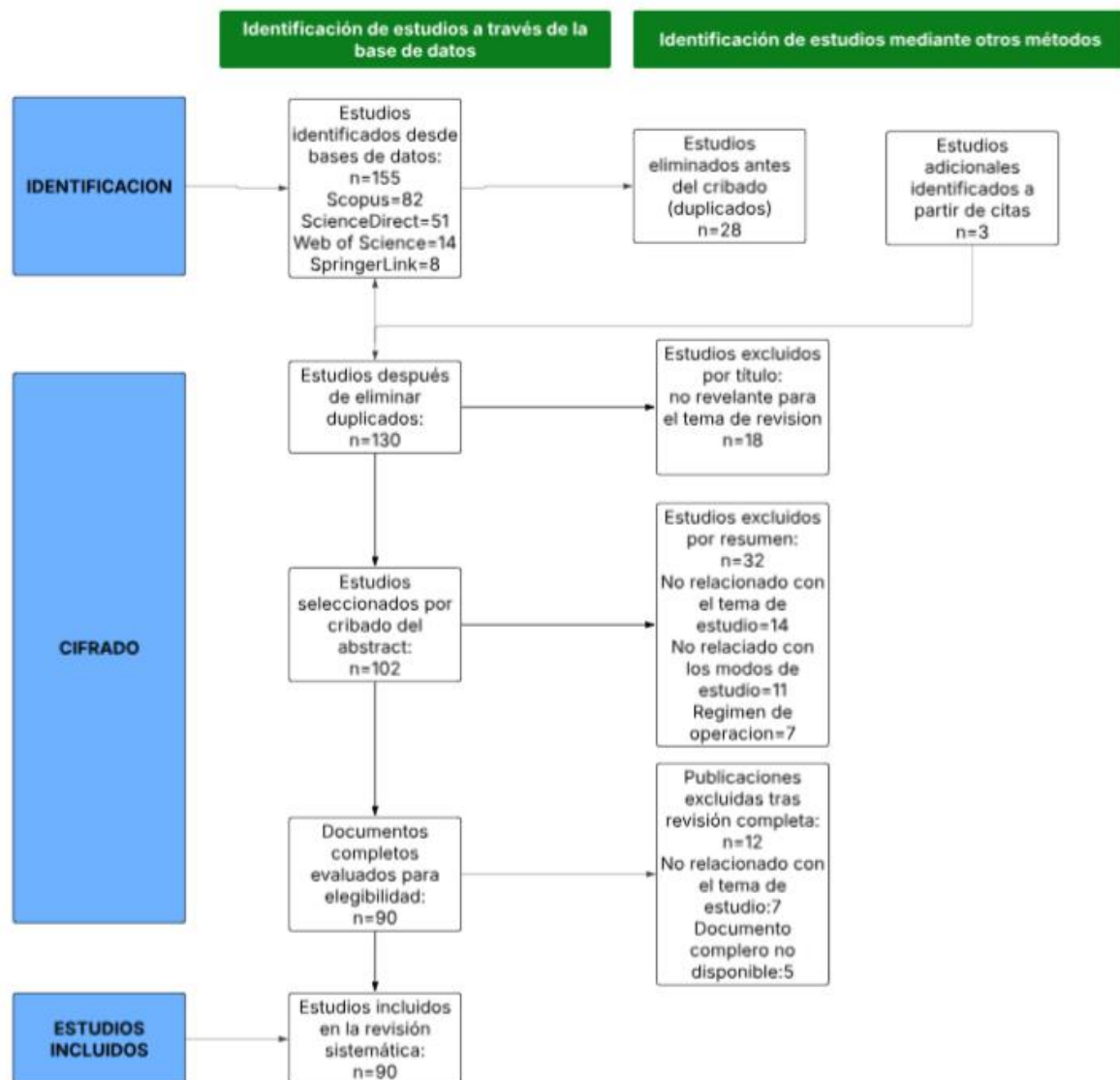


Figura 2. Proceso de selección y cribado de los estudios.

2.4. Evaluación de la calidad metodológica

Se consideraron variables como el tipo de motor utilizado condiciones de operación, tipo de combustible, variables evaluadas como eficiencia, emisiones, rendimiento, así como el diseño experimental de cada estudio.

Esta clasificación permitió identificar similitudes y diferencias entre los estudios, facilitando la comparación de resultados y asegurando la coherencia en la revisión.

Los 90 estudios seleccionados fueron organizados en función de estos criterios, lo que permitió un análisis más riguroso y enfocado en los aspectos técnicos del tema de investigación. La calidad metodológica de los estudios analizados fue evaluada mediante una tabla, adaptado específicamente para la presente revisión de literatura de los motores de combustión de baja temperatura (HCCI, PCCI y RCCI).

2.5. Extracción de datos

Una vez seleccionados los 90 artículos finales, se diseñó una matriz estructurada de extracción de datos con el fin de recopilar información homogénea y comparable de cada estudio incluido. La matriz fue elaborada previamente dentro del protocolo metodológico y organizada en formato tabular (hoja de cálculo), permitiendo sistematizar las siguientes categorías que se muestra en la Figura 3.

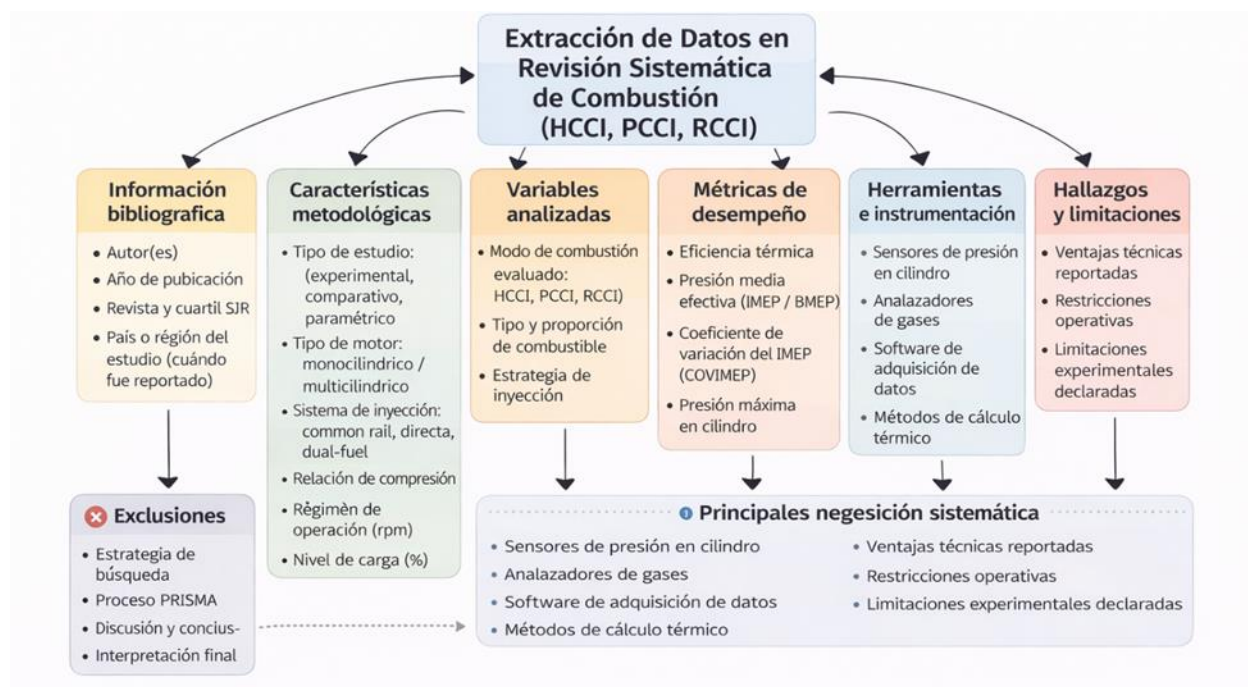


Figura 3. Matriz de extracción de datos.

2.6. Análisis y síntesis de la información

Debido a la heterogeneidad en configuraciones experimentales y condiciones operativas, no se realizó un meta análisis estadístico formal. En su lugar, se adoptó una síntesis cualitativa estructurada, complementada con comparación de valores reportados cuando las métricas eran equivalentes.

2.7. Clasificación metodológica de los estudios

Los 90 artículos fueron clasificados según: Tipo de combustión evaluada (HCCI, PCCI, RCCI), enfoque experimental (comparativo entre modos o evaluación individual), tipo de combustible (convencional vs alternativo), nivel de carga evaluado (baja, media, alta). Esta clasificación permitió organizar los resultados en bloques temáticos[52][53][57].

2.8. Identificación de tendencias

Las tendencias tecnológicas fueron identificadas mediante: Comparación de eficiencia térmica entre modos, evaluación del compromiso NO_x, PM, HC, CO análisis del comportamiento de estabilidad (COVIMEP), relación entre estrategia de inyección y control de fase de combustión.

2.9. Identificación de vacíos en la investigación

Durante la síntesis se detectaron: ausencias métricas reportadas, limitado número de estudios comparativos directos entre los tres modos, escasez de análisis bajo cargas altas sostenidas, falta de evaluación integral simultánea de estabilidad, eficiencia y emisiones en un mismo diseño experimental.

2.10. Evaluación de consistencia en los resultados

Se examinó la coherencia entre estudios que operaban bajo condiciones similares (tipo de motor y rango de carga). Cuando los resultados divergían, se analizaron las posibles causas asociadas a: diferencias en proporción de combustible, variación en tiempo de inyección, diferencias en relación de compresión, arquitectura del sistema de admisión.

3. Resultados

Estos estudios corresponden a investigaciones experimentales utilizando motores adaptados para estos tipos de combustión instrumentados con sensores de presión en cilindro y analizadores de gases [9]. Estos estudios permiten evaluar los parámetros como la eficiencia térmica, la presión media efectiva y las emisiones contaminantes. De manera complementaria, algunos trabajos incorporan modelos numéricos para analizar fenómenos de combustión, aunque estos dependen de condiciones de validación específicas[10][11][12][13].



En términos generales, se observa que la mayor parte de los trabajos analizados se enfoca en la combustión RCCI, debido a que se puede controlar mejor al momento de empezar la combustión. lo que evidencia un creciente interés en esta tecnología debido a su capacidad para optimizar simultáneamente la eficiencia térmica y la reducción de emisiones. En menor proporción, se identifican estudios relacionados con HCCI y PCCI, los cuales continúan siendo objeto de investigación debido a sus ventajas como reducción de emisiones contaminantes y su mejor eficiencia térmica. La dificultad al no poder controlar el inicio de la combustión, existiendo prematuras explosiones al momento de la combustión lo que limita su aplicación en investigaciones futuras.

La Figura 4 muestra la distribución de los estudios seleccionados según el tipo de modo de combustión analizado. Se observa una predominancia de investigaciones enfocadas en la combustión RCCI, lo que refleja el creciente interés en esta estrategia debido a su capacidad de utilizar dos combustibles diferentes uno de baja reactividad y otro de alta reactividad, el de baja reactividad es el que da el inicio de combustión teniendo para optimizar simultáneamente la eficiencia térmica y la reducción de emisiones . En menor proporción se encuentran los estudios relacionados con HCCI y PCCI, los cuales continúan siendo relevantes en el análisis de combustión de baja temperatura[55][21][24].

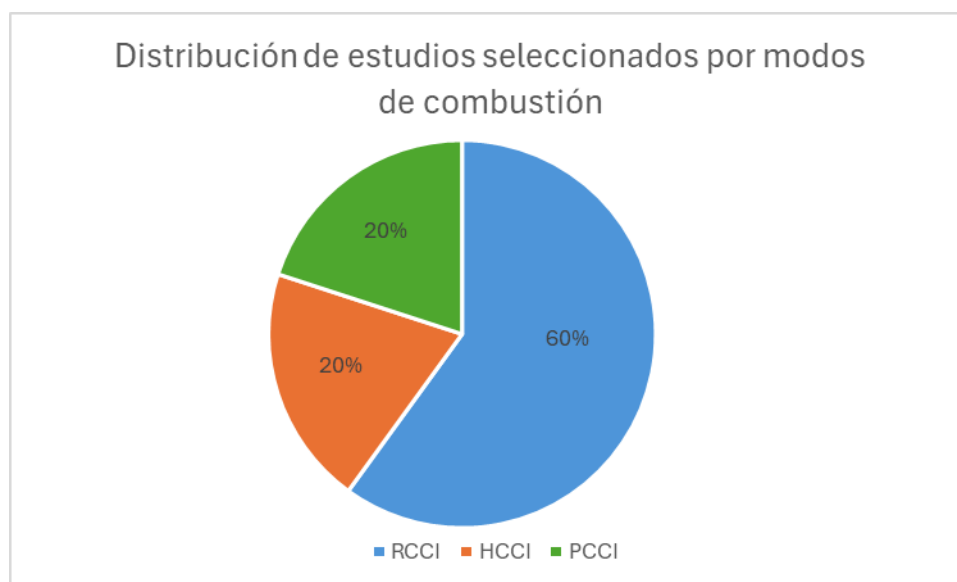


Figura 4. Distribución de estudios.

Combustión por Autoencendido de Carga Homogénea (HCCI) Eficiencia Térmica El sistema de combustión HCCI aprovecha mucho mejor la energía. Esto se debe a que la mezcla se quema de forma muy uniforme, y se pierden menos energía tanto en el bombeo como por el calor que se escapa. Por ejemplo, Yao, M. encontró que la eficiencia de freno (BTE) de estos

motores podía estar entre el 40% y el 45%, sobre todo cuando funcionaban con mezclas pobres y con mucha dilución. También, Aceves, S. y Dec, J. E. señalaron que el HCCI puede ser tan eficiente como los motores diésel de inyección directa, e incluso mejorar la eficiencia de los motores de encendido por chispa tradicionales entre un 10% y un 15%. Mofijur, M. también destacó que varios estudios han visto eficiencias de freno (BTE) por encima del 42% en cargas medias, gracias a que el calor se libera muy rápido y la combustión se extiende de forma pareja por todo el volumen [83][58][90].

Mientras que las emisiones los aspectos positivos de la combustión HCCI es que logra reducir al mismo tiempo las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y las partículas (PM). Por ejemplo, Dec, J. E. identificó que durante el funcionamiento con HCCI, las emisiones de NOx solían estar por debajo de 0.5 g/kWh. A veces, incluso llegaban a 0.1 g/kWh. Esto pasa porque las temperaturas dentro del cilindro son bajas, casi siempre por debajo de 1800 K[40][69] Por su parte, Yao, M. encontró que las emisiones de PM estaban entre 0.01 y 0.03 g/kWh, lo que es mucho menos que lo que emiten los motores diésel normales. La razón es que al mezclar bien el aire y el combustible, no se forman esas zonas donde hay mucho combustible y que son las que producen el hollín. Además, Mofijur, M. señaló que si el HCCI funciona en su punto óptimo, casi no hay hollín. Y Telli, G. confirmó que con el HCCI se pueden mantener bajas tanto las emisiones de NOx como las de PM, incluso usando otros tipos de combustible. Pero a pesar de todo lo bueno, varios estudios también han encontrado que cuando funciona el HCCI, aumentan las emisiones de hidrocarburos sin quemar (HC) y de monóxido de carbono (CO) [76][77]. Por ejemplo, Hasan, A. O. vio que las emisiones de HC estaban entre 2 y 8 g/kWh, y las de CO entre 5 y 15 g/kWh. Esto ocurría sobre todo cuando el motor trabajaba con poca carga. Mofijur, M. también informó de un aumento importante de HC y CO comparado con los motores de encendido por chispa y por compresión de siempre. La causa principal es que la combustión no se completa del todo. Para Yao, M., estas emisiones aparecen porque hay zonas frías cerca de las paredes del cilindro y fenómenos de 'quenching' que impiden que todo se queme por completo. Aunque, Hairuddin, A. A. demostró que si se usan mezclas con más hidrógeno o gas natural, pueden reducirse levemente las emisiones de HC y CO. Esto ayuda a que la combustión sea más completa y estable [81][85][86][76].

El mayor problema del HCCI es que cuesta mucho controlar exactamente cuándo empieza la combustión y mantenerla estable. Como la mezcla se enciende sola por la química (no por una



chispa o inyección directa), cualquier cambio pequeño en la temperatura, la presión o la cantidad de aire y combustible puede adelantar o atrasar mucho el momento en que se quema. Zhao, H. señaló que no poder controlar bien el CA50 (el punto donde se ha quemado el 50% del combustible) y la velocidad a la que se libera el calor es una de las principales limitaciones para la aplicación del HCCI en motores comerciales. Dec, J. E. también apuntó que el HCCI tiene problemas para funcionar con mucha carga, porque la presión sube muy rápido y hay riesgo de que el motor "golpee" (lo que se conoce como knock). Para que la combustión sea más estable, muchos investigadores han propuesto varias ideas, como: recirculación de gases de escape (EGR), control de temperatura de admisión, variación del tiempo de válvulas (VVT), y estratificación de reactividad del combustible [39][58]. Yao, M. tal como, encontró que al usar la recirculación de gases de escape (EGR), el COVIMEP bajaba de un 5%, un número que se considera bueno para que el motor funcione de forma continua y estable. De hecho, Telli, G. resumió que el desafío principal del HCCI sigue siendo conseguir que funcione en un rango más amplio de condiciones, sin perder la estabilidad y controlando bien cuándo se enciende [59][87][82][83].

La combustión por ignición por compresión de carga premezclada (PCCI) integra características tanto de la combustión diésel convencional como de la ignición por compresión de carga homogénea (HCCI). Esta configuración facilita la mejora de la eficiencia térmica y la reducción de emisiones contaminantes, merced a una mezcla que se premezcla parcialmente antes de la ignición. Al respecto, Kokjohn, S. L. documentó eficiencias térmicas de freno (BTE) que oscilaron entre el 40 % y el 46 % en condiciones de carga media; este rendimiento se atribuyó a una liberación de calor más controlada y a menores pérdidas térmicas. De forma similar, Kim, D. observó que el control del tiempo de retraso en la inyección contribuyó a una mayor homogeneidad de la mezcla y, consecuentemente, a un aumento de la eficiencia de combustión. Por otro lado, Agarwal, A. K. indicó que la implementación de la estrategia PCCI podría elevar la eficiencia térmica en un 8 % a 12 % en comparación con motores diésel tradicionales. Asimismo, Lu, X. confirmó que la premezcla parcial del combustible promueve una distribución más efectiva del calor liberado, lo que provoca una combustión más estable [43][66]. Uno de los atributos más significativos de la combustión PCCI radica en la capacidad de reducir simultáneamente tanto los óxidos de nitrógeno (NOx) como el material particulado (PM). Kim, D. documentó emisiones de NOx que oscilaron entre 0.2 y 0.8 g/kWh, cifras que resultan considerablemente más bajas que las registradas en motores diésel convencionales, lo cual se imputa a la disminución de las

temperaturas máximas de combustión [48][79][80]. En esta misma línea, Lu, X. identificó emisiones de PM que se situaron entre 0.02 y 0.05 g/kWh, fenómeno atribuido a la reducción de las zonas localmente ricas que propician la formación de hollín. De manera similar, Agarwal, A. K. informó sobre la ejecución de reducciones simultáneas de NO_x y la opacidad del humo, empleando estrategias avanzadas de inyección múltiple y recirculación de gases de escape (EGR). Adicionalmente, Kokjohn, S. L. señaló que un control efectivo de la estratificación de la mezcla en la combustión PCCI permite una disminución sustancial en la formación de hollín, sin comprometer la eficiencia del proceso. No obstante, diversos estudios han documentado incrementos moderados en las emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) bajo determinadas condiciones de operación. Lu, X. observó emisiones de HC que se ubicaron entre 1 y 4 g/kWh y de CO entre 3 y 10 g/kWh, principalmente durante fases de baja carga y con elevados niveles de recirculación de gases de escape (EGR). En una línea similar, Kim, D. señaló que una dilución excesiva de la mezcla podría comprometer la oxidación completa del combustible, resultando en un aumento de las emisiones de combustión incompleta. Conforme a lo expuesto por Agarwal, A. K., estos incrementos de HC y CO son, no obstante, considerablemente menores que los registrados en la combustión HCCI, lo cual se explica por un control más afinado tanto del proceso de ignición como de la liberación de calor [50][51]. Un aspecto primordial en el funcionamiento del modo PCCI reside en la gestión de la combustión y la consecuente estabilidad operativa. Al respecto, Kokjohn, S. L. indicó que la aplicación de inyección múltiple, la sincronización avanzada de la inyección y la recirculación de gases de escape (EGR) posibilita la regulación de la fase de combustión y la mitigación de las variaciones cíclicas. Por su parte, Lu, X. documentó valores de COVIMEP inferiores al 5 %, generalmente aceptado para garantizar una operación estable del motor. En una perspectiva similar, Kim, D. observó que la estrategia PCCI ofrece un rango de operación más extendido en comparación con HCCI, junto con una menor propensión al golpeteo, particularmente en regímenes de carga media y alta [47][78]. Finalmente, Agarwal, A. K. concluyó que el reto fundamental para la tecnología PCCI sigue siendo la optimización concurrente de la eficiencia, las emisiones y la estabilidad de la combustión a través de un espectro diverso de condiciones operativas [42][43][47][46][78].

La combustión por ignición por compresión controlada por reactividad (RCCI) es una estrategia de combustión a baja temperatura con un considerable potencial para futuras aplicaciones. Esto se atribuye a su elevada eficiencia térmica, su amplio rango operativo y su



capacidad para mitigar simultáneamente diversas emisiones contaminantes. A diferencia de otras configuraciones como HCCI y PCCI, el enfoque RCCI se distingue por el uso de dos combustibles de reactividades distintas. En este esquema, un combustible de baja reactividad se introduce de forma premezclada, mientras que otro de alta reactividad gestiona el inicio de la ignición. Tal aproximación facilita una estratificación de la reactividad más precisa, lo que se traduce en un control mejorado del proceso de combustión. Diversas investigaciones han documentado que la tecnología RCCI logra las mayores eficiencias térmicas entre las estrategias de combustión a baja temperatura (LTC). Por ejemplo, Kokjohn, S. L. ha reportado eficiencias térmicas de freno (BTE) que oscilan entre el 50 % y el 60 % en condiciones operativas optimizadas, lo cual se ha vinculado a una combustión altamente distribuida y a una reducción de las pérdidas térmicas. De igual forma, Benajes, J. ha observado eficiencias superiores al 50 % al emplear combinaciones de diésel y gasolina con niveles elevados de recirculación de gases de escape (EGR) [57][73]. Reitz, R. D. ha señalado que la RCCI puede mejorar la eficiencia de los motores diésel convencionales, lo que se atribuye a una liberación de calor más controlada y a una menor formación de zonas localmente ricas [28][29][30]. Asimismo, Splitter, D. ha confirmado que la RCCI mantiene altos niveles de eficiencia incluso bajo cargas medias y altas, lo cual expande considerablemente su rango operativo en comparación con el HCCI [15][16][18]. Uno de los beneficios principales de la RCCI radica en la reducción simultánea de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM) sin comprometer la eficiencia térmica. Benajes, J. ha comunicado emisiones de NOx en un rango de 0.1 a 0.4 g/kWh, cifras considerablemente inferiores a las observadas en motores diésel convencionales, lo que se atribuye a las bajas temperaturas de combustión [44][45]. De forma similar, Kokjohn, S. L. ha registrado emisiones de PM inferiores a 0.01 g/kWh, gracias a una disminución en las regiones de difusión que son responsables de la formación de hollín [31][32][33]. Splitter, D. también ha indicado que la RCCI permite reducir simultáneamente el hollín y los NOx mientras se mantienen elevadas tasas de liberación de calor.[67][54] Paralelamente, Reitz, R. D. ha confirmado que la estratificación de reactividad contribuye a una combustión más limpia y homogénea [75][71]. No obstante, algunos estudios han indicado incrementos moderados en las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) y monóxido de carbono (CO), particularmente bajo condiciones de baja carga. Benajes, J. ha observado emisiones de HC entre 1 y 5 g/kWh, y de CO entre 2 y 8 g/kWh, atribuyendo estos valores a una combustión incompleta en las zonas más frías del cilindro. Splitter, D. ha sugerido que niveles elevados de EGR y mezclas excesivamente pobres pueden limitar la oxidación completa del combustible



[68][70][72]. A pesar de ello, diversos autores concuerdan en que las emisiones de HC y CO en los sistemas RCCI tienden a ser inferiores a las reportadas en los sistemas HCCI, lo que se explica por un control más eficaz de la ignición y de la liberación de calor [34][35][36]. Un aspecto relevante de la RCCI es su elevado nivel de control sobre la combustión y la estabilidad operativa [19]. Kokjohn, S. L. ha destacado, S. L. ha destacado que la estratificación de reactividad permite una regulación precisa del CA50 y de la tasa de liberación de calor, lograda mediante ajustes en la proporción de combustibles, la sincronización de la inyección y los niveles de EGR [37][38]. De manera similar, Reitz, R. D. ha señalado que la RCCI presenta una menor propensión al golpeteo y una mayor estabilidad de combustión en comparación con el HCCI [71][73][75]. Benajes, J. ha reportado valores de COVIMEP inferiores al 3 %, lo que se considera un indicativo excelente para una operación estable del motor [62][63][64][65][66]. Finalmente, Splitter, D. ha concluido que la RCCI se posiciona como una de las tecnologías más prometedoras para futuras normativas de emisiones, dada su capacidad para combinar una alta eficiencia térmica, bajas emisiones y un amplio rango operativo [60][61][74][53].

Tras la revisión de diversos estudios reportados en la literatura, se identificó que las estrategias de combustión de baja temperatura presentan mejoras significativas en la eficiencia térmica respecto a motores convencionales. En el caso de la combustión HCCI, los autores revisados reportaron eficiencias térmicas de freno (BTE) comprendidas entre el 40 % y el 45 %, obteniéndose un valor promedio aproximado de 42.5 %. De manera similar, la combustión PCCI presentó valores entre el 40 % y el 46 %, con un promedio estimado de 43.0 %. Por su parte, la tecnología RCCI alcanzó los mayores niveles de eficiencia térmica, con rangos comprendidos entre el 50 % y el 60 %, generando un promedio aproximado de 55.0 %. Estos resultados evidencian una tendencia creciente en la eficiencia térmica desde HCCI hacia RCCI, atribuida principalmente a un mayor control de la liberación de calor y del proceso de ignición como se muestra la Figura 5 [55][24][21].

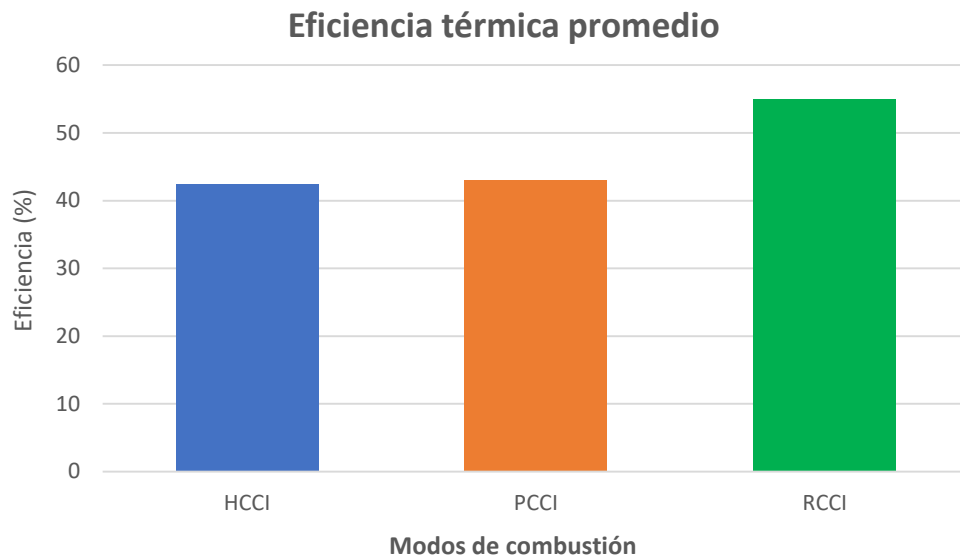


Figura 5. Eficiencia térmica reportada

En cuanto a las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), los tres modos de combustión de baja temperatura presentan reducciones significativas respecto a los motores diésel convencionales, aunque con diferencias notables entre sí. El modo HCCI reporta los niveles más bajos bajo condiciones óptimas, con valores de entre 0.1 y 0.5 g/kWh, gracias a las bajas temperaturas de combustión que impiden la formación térmica de NO_x [25]. El modo PCCI presenta valores entre 0.2 y 0.8 g/kWh, siendo ligeramente superiores al HCCI debido a las zonas de mayor temperatura local que genera la inyección controlada. El RCCI, por su parte, logra emisiones de NO_x en un rango de 0.1 a 0.4 g/kWh, combinando la eficiencia en la reducción de NO_x del HCCI con la estabilidad del PCCI [25][26][27]. La Tabla 1 muestra la comparación de las emisiones de NO_x reportadas en la literatura para los tres modos de combustión [14].

Tabla 1. Comparación de emisiones de NO_x (g/kWh) para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Parámetro	HCCI	PCCI	RCCI
NO _x (g/kWh)	0.1–0.5	0.2–0.8	0.1–0.4
Promedio (g/kWh)	0.30	0.50	0.25
Reducción vs. diésel convencional	> 90 %	80–90 %	> 90 %

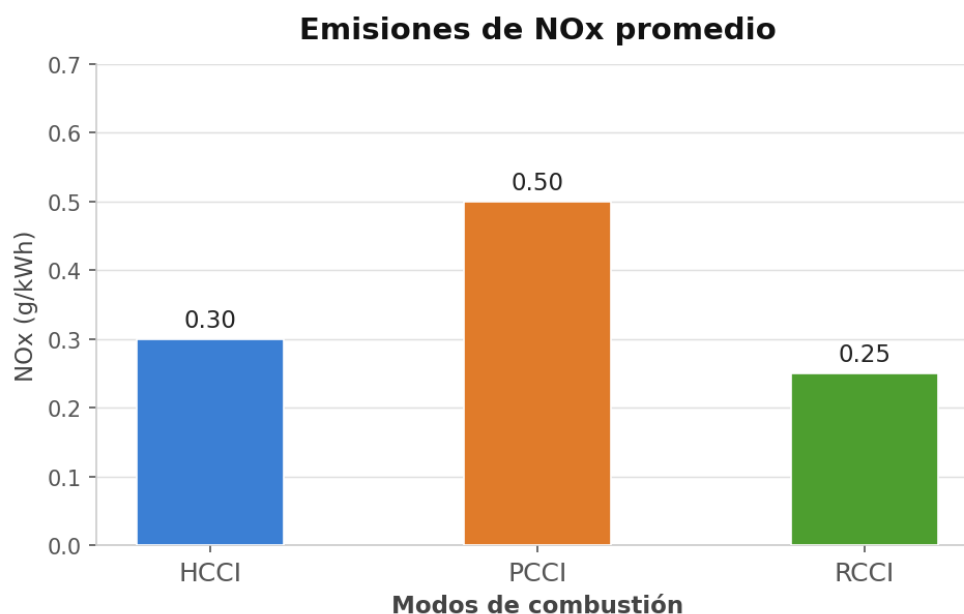


Figura 6. Emisiones de NOx promedio para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Respecto al monóxido de carbono (CO), los tres modos de combustión de baja temperatura muestran un comportamiento diferenciado. El HCCI registra los niveles más altos, con emisiones entre 5 y 15 g/kWh, producidas principalmente por la combustión incompleta en las zonas frías cercanas a las paredes del cilindro. El PCCI reduce considerablemente este valor, con rangos de 3 a 10 g/kWh, gracias al mayor control de la inyección. El RCCI logra la mayor reducción, con emisiones de CO entre 2 y 8 g/kWh, atribuida a una distribución más efectiva de la reactividad y a una combustión más completa. No obstante, los tres modos presentan valores de CO superiores a los motores diésel convencionales bajo ciertas condiciones de baja carga. La Tabla 2 resume los rangos de emisiones de CO reportados en la literatura revisada [39][86][85].

Tabla 2. Comparación de emisiones de CO (g/kWh) para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Parámetro	HCCI			PCCI			RCCI		
CO (g/kWh)	5–15			3–10			2–8		
Promedio (g/kWh)	10.0			6.5			5.0		
Condición crítica	Baja	carga,	zonas	Alto	EGR,	baja	Mezcla	pobre,	baja
	frías			carga			carga		

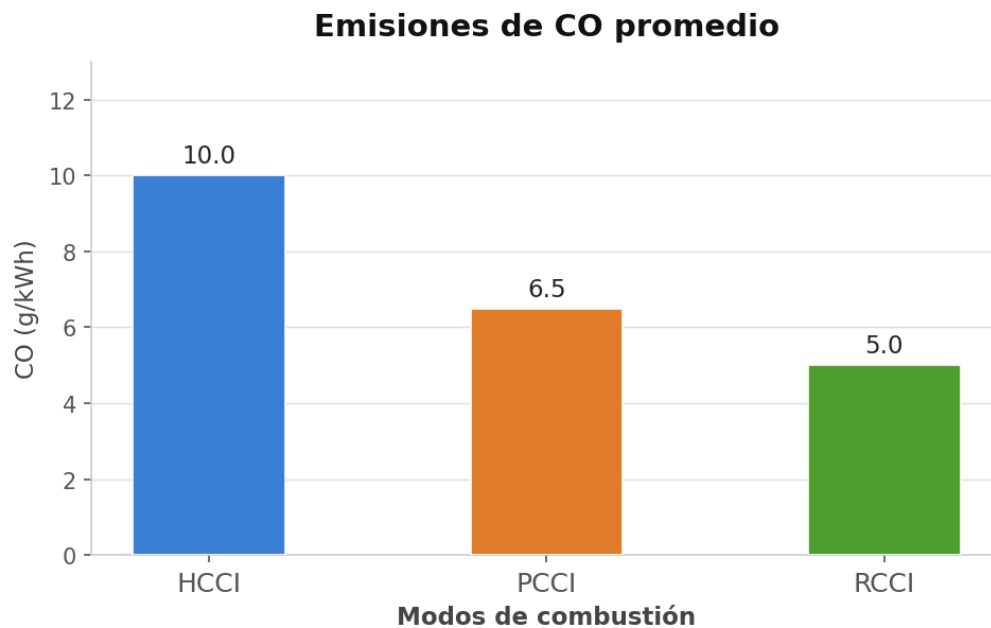


Figura 7. Emisiones de CO promedio para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

En lo referente a los hidrocarburos sin quemar (HC), el comportamiento entre los tres modos sigue una tendencia similar a la observada en el CO, siendo el HCCI el modo con mayores emisiones. Los estudios revisados reportaron emisiones de HC entre 2 y 8 g/kWh para HCCI, producto de zonas de baja temperatura donde la oxidación del combustible no se completa. En el caso del PCCI, los valores se encuentran entre 1 y 4 g/kWh, evidenciando una mejora gracias a la premezcla controlada. La combustión RCCI alcanza los menores valores, con rangos de 1 a 5 g/kWh, aunque puede incrementarse cuando se utilizan mezclas excesivamente pobres o altos niveles de EGR. En todos los modos, las emisiones de HC están estrechamente vinculadas a la completitud de la combustión en las zonas periféricas del cilindro. La Tabla 3 presenta la comparación de los rangos de HC reportados [42][48][38].

Tabla 3. Comparación de emisiones de HC (g/kWh) para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Parámetro	HCCI	PCCI	RCCI
HC (g/kWh)	2–8	1–4	1–5
Promedio (g/kWh)	5.0	2.5	3.0
Principal causa	Quenching paredes	en Dilución mezcla	excesiva Zonas frías, mezcla pobre

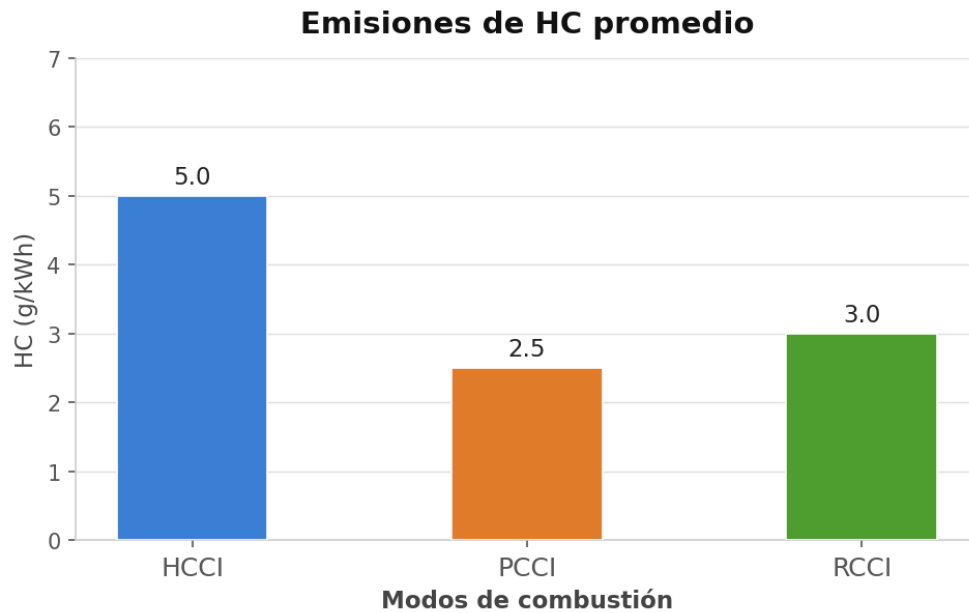


Figura 8. Emisiones de HC promedio para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

El material particulado (PM) constituye uno de los parámetros más relevantes en la evaluación ambiental de los motores diésel. Los tres modos de combustión de baja temperatura consiguen reducciones importantes respecto a la combustión convencional. El HCCI presenta los menores niveles de PM, con valores entre 0.01 y 0.03 g/kWh, debido a la alta homogeneidad de la mezcla que evita las zonas localmente ricas donde se forma el hollín. El PCCI reporta emisiones entre 0.02 y 0.05 g/kWh, ligeramente superiores al HCCI por la presencia de zonas de difusión residual asociadas a la inyección controlada. El RCCI logra los valores más bajos de PM, con emisiones inferiores a 0.01 g/kWh en la mayoría de los estudios, dado que la estratificación de reactividad elimina prácticamente las zonas de difusión generadoras de hollín. La Tabla 4 compara los rangos de PM reportados para los tres modos [49][50][53].

Tabla 4. Comparación de emisiones de material particulado PM (g/kWh) para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Parámetro	HCCI	PCCI	RCCI
PM (g/kWh)	0.01–0.03	0.02–0.05	< 0.01
Promedio (g/kWh)	0.020	0.035	< 0.010
Mecanismo principal de reducción	Mezcla homogénea	Reducción zonas ricas	Estratificación reactividad

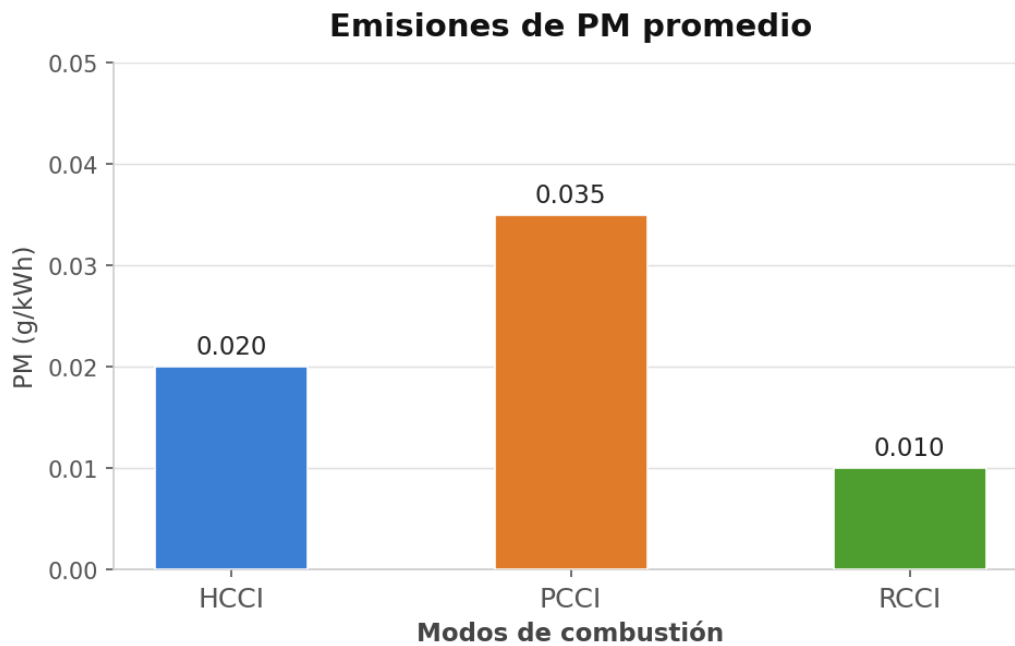


Figura 9. Emisiones de material particulado (PM) promedio para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

El control de la estabilidad de la combustión se evalúa a través del Coeficiente de Variación de la Presión Media Efectiva Indicada (COVIMEP), el cual cuantifica la variabilidad cíclica del motor. Un valor inferior al 5 % se considera aceptable para operación estable en motores de combustión interna. El HCCI presenta los valores más elevados de COVIMEP, con rangos superiores al 5 % en condiciones de baja carga o variaciones de temperatura de admisión, lo que refleja la alta sensibilidad del autoencendido a las condiciones del ciclo. El PCCI mejora notablemente la estabilidad, manteniendo el COVIMEP generalmente por debajo del 5 %, gracias a la inyección controlada que modula la fase de combustión. El RCCI alcanza los menores valores de COVIMEP, con rangos inferiores al 3 %, evidenciando el mayor control del inicio y desarrollo de la combustión mediante la estratificación de reactividad entre los dos combustibles. La Tabla 5 sintetiza los rangos de COVIMEP reportados en la literatura para los tres modos [33][16][52].

Tabla 5. Comparación del COVIMEP (%) para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Parámetro	HCCI	PCCI	RCCI
COVIMEP (%)	3–7	< 5	< 3
Promedio (%)	~ 5.0	~ 3.5	~ 2.0

Nivel de estabilidad	Baja	Media–Alta	Alta
Factor clave de control	Temp. admisión, EGR	Temporización inyección, EGR	Proporción combustibles, CA50

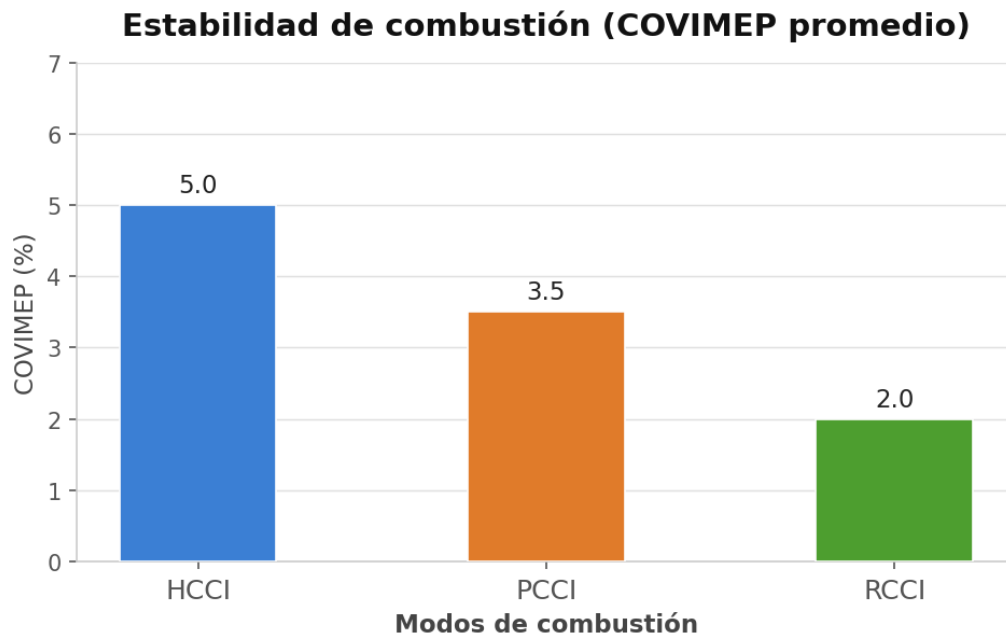


Figura 10. Estabilidad de combustión (COVIMEP promedio) para los modos HCCI, PCCI y RCCI.

Tabla 6. Resumen comparativo de los modos de combustión HCCI, PCCI y RCCI.

Parámetro	HCCI	PCCI	RCCI
Eficiencia térmica (BTE)	40–45 %	40–46 %	50–60 %
NOx	0.1–0.5 g/kWh	0.2–0.8 g/kWh	0.1–0.4 g/kWh
PM	0.01–0.03 g/kWh	0.02–0.05 g/kWh	<0.01 g/kWh
HC/CO	Altos	Moderados	Moderados-bajos
Estabilidad	Baja	Media-alta	Alta
Control de ignición	Difícil	Mejorado	Muy preciso

Limitación principal	Control autoencendido	del Optimización multiobjetivo	Complejidad de doble combustible
-----------------------------	-----------------------	--------------------------------	----------------------------------

3.1 Delimitaciones para investigaciones futuras

El presente estudio se delimitó al análisis de investigaciones experimentales y estudios numéricos relacionados con los modos de combustión HCCI, PCCI y RCCI en motores de encendido por compresión, considerando publicaciones recientes entre 2020 y 2025. Por lo que no se incluyeron estudios enfocados exclusivamente en simulaciones sin validación experimental, ni investigaciones fuera del contexto de combustión de baja temperatura. Asimismo, las variaciones en las condiciones experimentales, como el tipo de motor, el combustible empleado y los parámetros operativos, limitan la comparación directa entre los estudios analizados, lo que representa una restricción metodológica inherente a este tipo de revisiones.

En este contexto, futuras investigaciones deberían enfocarse en la estandarización de metodologías experimentales que permitan mejorar la comparabilidad de resultados. De igual manera, se recomienda profundizar en el desarrollo de estrategias híbridas de combustión que integren las ventajas de HCCI, PCCI y RCCI, así como en la implementación de sistemas avanzados de control que optimicen simultáneamente la eficiencia y la reducción de emisiones bajo condiciones reales de operación.

3.2 Discusión

Los resultados muestran que los modos de combustión de baja temperatura presentan comportamientos distintos según la estrategia de mezcla, el control de la inyección y el tipo de combustible empleado [19]. En general, los estudios coinciden en que el HCCI permite alcanzar altos niveles de eficiencia térmica, principalmente por la homogeneidad de la mezcla aire–combustible y la reducción de pérdidas por transferencia de calor. Sin embargo, su aplicación presenta limitaciones operativas relevantes, asociadas al control del inicio de la combustión y a una alta variabilidad cíclica, evidenciada en valores elevados de COVIMEP [84][89][88].

El PCCI, por su parte, se posiciona como una alternativa intermedia al combinar características de la combustión premezclada con la inyección controlada. Los estudios



revisados indican que este enfoque reduce de forma significativa las emisiones de material particulado, aunque todavía enfrenta dificultades en el control de emisiones incompletas, como hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, especialmente a bajas cargas. Además, la sensibilidad a parámetros como el tiempo y la presión de inyección genera una relación directa entre la estrategia de control y el desempeño del motor [46][78][80].

En cuanto al RCCI, este destaca por ofrecer un mayor control del proceso de combustión mediante el uso de combustibles con distinta reactividad. Los resultados muestran que esta estrategia permite reducir simultáneamente las emisiones de NO_x y material particulado, manteniendo niveles competitivos de eficiencia térmica. No obstante, su implementación implica una mayor complejidad operativa, debido al uso de sistemas de inyección dual y a la necesidad de controlar con precisión la relación de reactividad entre los combustibles. Asimismo, se observa que la calidad metodológica de los estudios influye directamente en la confiabilidad de los resultados. Aquellos que emplean instrumentación avanzada, como sensores de presión en cilindro y analizadores de gases de alta precisión, presentan menor incertidumbre en la caracterización de la combustión y las emisiones. En contraste, los estudios basados en modelos numéricos, aunque útiles para el análisis paramétrico, dependen en gran medida de las condiciones de calibración, lo que puede limitar su aplicabilidad en escenarios reales. Finalmente, las diferencias observadas entre los estudios también están asociadas a variaciones en las condiciones experimentales, incluyendo el tipo de motor, la relación de compresión, el régimen de operación y las características del combustible [20]. Estas diferencias dificultan la comparación directa entre resultados y ponen de manifiesto la necesidad de establecer criterios experimentales más estandarizados en futuras investigaciones [54][71][67].

4. Conclusiones

La presente investigación permitió analizar el comportamiento de los modos de combustión de baja temperatura en motores de encendido por compresión, evidenciando diferencias relevantes en términos de eficiencia, control del proceso de combustión y generación de emisiones. A partir de los 90 estudios seleccionados, se observa que cada estrategia presenta ventajas específicas, pero también limitaciones que condicionan su aplicación en escenarios reales.

En el caso del HCCI, se destacan altos niveles de eficiencia térmica, asociados a la homogeneidad de la mezcla aire–combustible y a la reducción de pérdidas energéticas. No



obstante, su implementación práctica continúa limitada por la dificultad para controlar el inicio de la combustión y garantizar estabilidad operativa, especialmente bajo condiciones variables de carga y velocidad [81][58][87].

Por su parte, el PCCI se posiciona como una alternativa intermedia, al permitir un mayor control del proceso mediante estrategias de inyección más flexibles. Si bien logra reducir de forma significativa el material particulado, aún presenta dificultades en la gestión de emisiones incompletas, como los hidrocarburos no quemados y el monóxido de carbono, particularmente en condiciones transitorias [48][47][80].

En contraste, el RCCI muestra un desempeño más equilibrado, al permitir la reducción simultánea de NO_x y material particulado sin comprometer la eficiencia térmica. Este comportamiento se asocia al control de la reactividad del combustible, lo que contribuye a una mayor estabilidad en la combustión. Sin embargo, su implementación implica una mayor complejidad técnica, debido al uso de sistemas de inyección dual y al control preciso de la mezcla [74][60][70].

En conjunto, los modos de combustión de baja temperatura representan una alternativa prometedora para la reducción de emisiones en motores diésel. No obstante, persisten limitaciones relacionadas con la falta de estandarización en las metodologías experimentales y la variabilidad de las condiciones operativas [56][87]. En este sentido, futuras investigaciones deberían orientarse al desarrollo de estrategias híbridas de combustión y sistemas de control más avanzados, que permitan optimizar de manera simultánea la eficiencia y la reducción de emisiones en condiciones reales de operación [55][56][52].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo institucional recibido para el desarrollo de la presente investigación.

ANEXOS

En el appendix A se muestra el tipo de estudio realizado en cada artículo y a su vez demostrando que variables, así como el tipo de motor utilizado en el estudio.

cita	Autores	Año	Revista	Tipo	Motor	Modo
[1]	Shim et al.	2020	Fuel	Experimental	Heavy-duty	HCCI/PCCI



					diesel	
[2]	Pratap et al.	2020	Applied Energy	Experimental	Single-cylinder CI	PCCI/RCCI
[3]	Duan et al.	2021	Fuel	Review	Single-cylinder	HCCI
[4]	Reddy et al.	2023	Energies	Review	Multi-cylinder CI	RCCI
[5]	Gopinathan & Ibrahim	2024	Australian J. Mech. Eng.	Numerical/Experimental	CI engine	HCCI
[6]	Das et al.	2023	Energy Science & Engineering	Review	CI engine	HCCI
[7]	Veza et al.	2021	Int. J. Automotive Mech. Eng.	Review	CI engine	HCCI
[8]	Luo et al.	2022	Energy Conversion and Management	Experimental	Diesel engine	PCCI
[9]	Nguyen et al.	2022	Energy	Review	CI engine	HCCI
[10]	Singh et al.	2021	SAE Int. J. Engines	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI
[11]	Kumar & Paul	2024	Energy & Environment	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI
[12]	Alemayehu	2022	Journal of Engineering	Experimental	PCCI-DI diesel	PCCI
[13]	Flores-Lasluisa et al.	2022	Energy	Experimental	Diesel engine	RCCI
[14]	Benajes et al.	2020	Applied	Experimental	Heavy-duty	RCCI

			Thermal Engineering		multi-cyl. CI	
[15]	Kokjohn et al.	2021	Int. J. Engine Res.	Numerical/Experimental	Heavy-duty CI engine	RCCI
[16]	Splitter et al.	2021	Int. J. Engine Res.	Experimental	Heavy-duty CI engine	RCCI
[17]	Paykani et al.	2021	Prog. in Energy and Combust. Sci.	Review	CI engine	RCCI
[18]	Gupta & Krishnasamy	2024	Int. J. Engine Res.	Experimental	Light-duty CI	HCCI/PCCI/RC
[19]	Muruges Pandian & Anand	2018	Applied Thermal Engineering	Experimental	Light-duty air-cooled CI	HCCI/PCCI/RC
[20]	Krishnamoorthi et al.	2019	Renew. Sustain. Energy Rev.	Review	CI engine (LTC modes)	HCCI/PCCI/RC
[21]	Elkelawy et al.	2022	Energy Convers. Manage.: X	Review	CI engine	RCCI
[22]	Korkmaz et al.	2024	Proc. Inst. Mech. Eng. D	Review	Multi-cylinder CI	RCCI
[23]	Ramasamy et al.	2024	Scientific Reports	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI
[24]	Cung et al.	2024	Fuel	Experimental	CI engine	RCCI
[25]	Wang et al.	2021	Scientific	Experimental	Single-cylinder	RCCI

			Reports			
[26]	Pang et al.	2023	Applied Thermal Engineering	Experimental	Single-cylinder	HCCI
[27]	Jiang et al.	2023	Energy	Experimental	CI engine	HCCI/PCCI
[28]	Firat et al.	2022	Int. J. Automotive Eng. Tech.	Experimental	Diesel engine	RCCI
[29]	Xiong et al.	2023	Energy	Experimental	Diesel engine	PCCI
[30]	Bao et al.	2021	Applied Energy	Experimental	Heavy-duty diesel engine	HCCI
[31]	Zhou et al.	2024	Int. J. Energy Research	Experimental	Heavy-duty engine	RCCI
[32]	Gopinathan & Ibrahim	2024	Australian J. Mech. Eng.	Numerical	CI engine	HCCI
[33]	Sathish & Mohanavel	2022	Fuel	Experimental	Single-cylinder CI	HCCI
[34]	Sathishkumar & Ibrahim	2023	Int. J. Hydrogen Energy	Experimental	CI engine	HCCI/Dual-fuel
[35]	Han et al.	2022	Fuel	Experimental	RCCI engine	RCCI
[36]	Bhurat et al.	2021	Int. J. Engine Res.	Experimental	Single-cylinder CI (partial HCCI)	HCCI
[37]	Muñoz-Gracia et al.	2023	Energies (MDPI)	Experimental/Numerical	Converted diesel CI	HCCI

					engine	
[38]	Halis & Kocakulak	2024	Energy	Experimental	Single-cylinder	RCCI
[39]	Zareei et al.	2022	Energy Conversion and Management	Numerical	CI engine	HCCI
[40]	Gainey et al.	2021	Fuel	Experimental	Single-cylinder CI	HCCI
[41]	Gupta & Tripathi	2022	Energy	Experimental	Light-duty diesel engine	HCCI
[42]	Chakraborty et al.	2022	Energy	Numerical/Experimental	CI engine PPCI-RCCI	PCCI/RCCI
[43]	Singh et al.	2023	Energy & Fuels (ACS)	Experimental	HDDI diesel	PCCI
[44]	Ju et al.	2020	SAE Technical Paper	Numerical	Downsized diesel	PCCI
[45]	Dhongde et al.	2023	Energies (MDPI)	Numerical/CFD	HDDI diesel	PCCI
[46]	Makapati & Subramaniam	2022	Int. J. Ambient Energy	Review	CI engine	RCCI
[47]	Rahnama et al.	2024	Results in Engineering	Numerical	Heavy-duty CI	RCCI
[48]	Elkelawy et al.	2022	Energy Conversion and	Review	CI engine	PCCI

			Management: X			
[49]	Jalivar & Neshat	2025	Heliyon	Numerical	1.9L GM engine	PCCI
[50]	Sattarzadeh et al.	2024	Energy Convers. Manage.	Experimental	Medium-duty twin-cyl.	RCCI
[51]	Poorghasemi et al.	2022	Proc. Inst. Mech. Eng. D	Numerical/Experimental	NG/Diesel CI engine	RCCI
[52]	Kumar et al.	2023	Int. J. Ambient Energy	Experimental	Single-cylinder CRDI	PCCI
[53]	Wang et al.	2023	Fuel	Experimental	Optical engine	RCCI
[54]	Anish et al.	2023	Scientific Reports	Experimental	CRDI engine	RCCI
[55]	Halis	2023	Sustainability	Experimental	Single-cylinder	RCCI
[56]	Pan et al.	2024	ACS Omega	Experimental	Dual-fuel engine	RCCI
[57]	Ramalingam et al.	2024	Results in Engineering	Experimental	RCCI engine	RCCI
[58]	Zhou	2024	Highlights in Sci. Eng. Technology	Review	CI engine	HCCI
[59]	Halis	2022	Energy	Experimental	Single-cylinder diesel	HCCI
[60]	Pan et al.	2024	ACS Omega	Experimental	Dual-fuel	RCCI

					engine	
[61]	Zarrinkolah & Hosseini	2022	Energies	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI
[62]	Wang et al.	2024	IJAMM	Experimental	Optical engine	RCCI
[63]	Sattarzadeh et al.	2023	Int. J. Engine Res.	Numerical/Experimental	Heavy-duty CI	RCCI
[64]	Ramsay et al.	2020	Energy	Numerical	CI engine	RCCI
[65]	Rochussen & Kirchen	2023	Fuel	Experimental	Heavy-duty optical CI	RCCI
[66]	Agarwal et al.	2023	Fuel	Experimental	Genset diesel engine	RCCI
[67]	Han et al.	2021	Applied Energy	Experimental	Heavy-duty diesel engine	RCCI
[68]	Agarwal et al.	2022	Energy	Experimental	Genset diesel engine	RCCI
[69]	Liu et al.	2022	Fuel	Numerical	Methanol/diesel CI engine	RCCI
[70]	Aydin & Aydin	2021	Energy	Experimental	Single-cylinder CI, var. CR	RCCI
[71]	Harari et al.	2021	Cleaner Eng. and Technology	Experimental	CRDI diesel engine	RCCI
[72]	Wang et al.	2024	Fuel	Experimental	Optical single-cylinder CI	RCCI
[73]	Huang et al.	2023	J. Braz. Soc. Mech. Sci.	Experimental	Methanol/diesel CI engine	RCCI

			Eng.			
[74]	Khedkar & Sarangi	2025	Int. J. Engine Res.	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI
[75]	Dalha et al.	2021	Applied Thermal Engineering	Experimental	Dual-fuel CI	RCCI
[76]	Okcu et al.	2021	Sustain. Energy Technol. Assess.	Experimental	Diesel engine	RCCI
[77]	Hamdi et al.	2022	Entropy	Numerical	Methane/diesel CI	RCCI
[78]	Singh & Agarwal	2021	Int. J. Engine Res.	Experimental	Production-grade CI	PCCI
[79]	Firat et al.	2022	Energy	Experimental	Diesel research engine	RCCI
[80]	Yildiz & Ceper	2022	Fuel	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI
[81]	Okcu et al.	2022	Fuel	Experimental	Diesel engine	RCCI
[82]	Tang et al.	2024	Renewable Energy	Experimental	Dual-fuel engine	RCCI
[83]	Gowthaman & Sathiyagnanam	2021	Alexandria Engineering Journal	Experimental	Single-cylinder CI	HCCI
[84]	Vallinayagam et al.	2020	Energy Conversion and Management	Experimental	Single-cylinder CI engine	HCCI
[85]	Mohebbi et al.	2020	Applied Thermal	Experimental	Single-cylinder	HCCI

			Engineering		research engine	
[86]	Yadav et al.	2024	Energy Conversion and Management	Experimental	CI engine	HCCI/RCCI
[87]	Ramasamy et al.	2025	Scientific Reports	Experimental	Single-cylinder CI	RCCI

Appendixes A Evaluacion de artículos mediante variables y estudio realizado

En el appendixes B se muestra la clasificación de los artículos mediante en base a su Quartile y reviste

Journal	Number of Articles	SJR Quartile	JCR Quartile	IF (JCR)	SJR
Fuel	2	Q1	Q1	7.4	1.89
Applied Energy	2	Q1	Q1	11.2	3.52
Energy	3	Q1	Q1	9.0	2.55
Energy Conversion and Management	1	Q1	Q1	11.5	3.10
Renewable Energy	1	Q1	Q1	8.7	2.44
Applied Thermal Engineering	1	Q1	Q1	6.4	1.72
Scientific Reports	1	Q2	Q2	4.6	0.95
Sustainability	1	Q2	Q2	3.9	0.66



ACS Omega	1	Q2	Q2	4.1	0.92
IJAET	1	Not indexed	Not indexed	Not available	Not available
IJAMM	1	Not indexed	Not indexed	Not available	Not available

Appendixes B. Clasificación de artículos

REFERENCES

- [1] E. Shim, H. Park and C. Bae, "Comparisons of advanced combustion technologies (HCCI, PCCI, and dual-fuel PCCI) on engine performance and emission characteristics in a heavy-duty diesel engine," *Fuel*, vol. 262, 2020.
- [2] A. Pratap, V. Kumar and A. Kumar, "Evaluation of comparative engine combustion, performance and emission characteristics of low temperature combustion (PCCI and RCCI) modes," *Applied Energy*, vol. 278, 2020.
- [3] X. Duan, M.-C. Lai, M. Jansons and G. Guo, "A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine," *Fuel*, 2021.
- [4] K. Reddy, S. Subramaniam, E. Perumal and O. David, "A Review on Recent Developments of RCCI Engines Operated with Alternative Fuels," *Energies*, vol. 16, no. 7, 2023.
- [5] R. L. Gopinathan and M. M. Ibrahim, "Hydrogen driven HCCI engine combustion and performance indices: a numerical investigation," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 820-837, 04 Diciembre 2024.
- [6] P. Das, "Review of hydrogen effects on HCCI combustion: ignition timing, emissions and performance," *Energy Science and Engineering*, 2023.
- [7] I. Veza, "Review of mixture formation and auto-ignition control strategies in HCCI engines," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2021.
- [8] B. Luo, Y. Li and h. Chen, "Study on performance of Vuilleumier cycle heat pump for residential heating," *Energy Conversion and Management*, vol. 274, 2022.
- [9] T. Nguyen, H. Pham and V. Nguyen, "A review of internal combustion engines powered by renewable energy based on ethanol fuel and HCCI technology," *Energy*, vol. 10, no. 5, 2022.
- [10] A. P. Singh and A. K. Agarwal, "Experimental investigation of PCCI combustion in a production-grade compression ignition engine," *International Journal of Engine Research*, 2021.
- [11] N. Kumar, "Experimental investigation of PCCI combustion stability in a single-cylinder CRDI engine," *International Journal of Ambient Energy*, 2023.
- [12] G. Alemayehu, "Experimental study on PCCI diesel combustion emissions and performance," *Journal of Engineering*, 2022.



- [13] J. X. Flores-Lasluisa, F. Huerta, D. Cazorla-Amorós and E. Morallón, “Manganese oxides/LaMnO₃ perovskite materials and their application in the oxygen reduction reaction,” *Energy*, vol. 247, 15 Mayo 2022.
- [14] J. Benajes, “Experimental investigation of RCCI combustion in a heavy-duty multi-cylinder engine,” *Applied Thermal Engineering*, 2020.
- [15] S. Kokjohn, “Numerical and experimental study of fuel reactivity and injection effects on RCCI combustion,” *International Journal of Engine Research*, 2021.
- [16] D. Splitter, “Injection strategy effects on RCCI combustion in a heavy-duty engine,” *International Journal of Engine Research*, 2021.
- [17] A. Paykani, A. Garcia, M. Shahbakhti and P. Rahnama, “Reactivity controlled compression ignition engine: Pathways towards commercial viability,” *Applied Energy*, vol. 282, no. 1, 2021.
- [18] S. Gupta and A. Krishnasamy, “Comparative experimental study of HCCI, PCCI and RCCI combustion modes in a light-duty compression ignition engine,” *International Journal of Engine Research*, 2024.
- [19] M. Murugesu Pandian and K. Anand, “Experimental study on homogeneous charge compression ignition, premixed charge compression ignition and reactivity controlled compression ignition modes in a diesel engine,” *Applied Thermal Engineering*, 2018.
- [20] M. Krishnamoorthi, “An overview of charge preparation strategies for HCCI, PCCI and RCCI combustion,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [21] M. Elkelawy, “Review on RCCI combustion: fuel combinations, performance and emission characteristics,” *Energy Conversion and Management: X*, 2022.
- [22] M. Korkmaz, “Review of RCCI combustion with alternative fuels in multi-cylinder engines,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D*, 2024.
- [23] D. Ramasamy, “Experimental study on RCCI combustion performance and emission with alternative fuels,” *Scientific Reports*, 2024.
- [24] K. Cung, “RCCI combustion performance and emissions analysis with alternative fuel combinations,” *Fuel*, 2024.
- [25] J. Wang, K. Xie, S. Xu, K. Xu, L. Ma and J.-B. Lin, “Stable single iron atom within two-dimensional porphyrin sheet catalysis for CO oxidation: A computational investigation,” *Fuel*, vol. 342, 15 Junio 2023.
- [26] J. Pang, Z. Ge, Y. Zhang and X. Du, “Comparative designs and optimizations of the steam ejector for a CHP system,” *Applied Thermal Engineering*, no. 226, 25 Mayo 2023.
- [27] W. Jiang, C. Liu and Z. Sun, “Promoting developments of hydrogen production from renewable energy and hydrogen energy vehicles in China analyzing a public-private partnership cooperation scheme based on evolutionary game theory,” *Energy*, vol. 278, Septiembre 2023.
- [28] M. Firat, “Experimental study on reduction of pollutant emissions in RCCI engine fueled with diesel and gasoline,” *Energy*, 2022.
- [29] J. Xiong, S. Guo, Y. Wu, D. Yan, C. Xiao and X. Lu, “Predicting the response of heating and cooling demands of residential buildings with various thermal performances in China to climate change,” *Energy*, 15 Abril 2023.
- [30] J. Bao, “HCCI combustion with n-butanol addition in a heavy-duty diesel engine,” *Applied Energy*, 2021.
- [31] Q. Zhou, “Review of HCCI combustion: operating principles, load range challenges and emission characteristics,” *Highlights in Science Engineering and Technology*, 2024.



- [32] R. L. Gopinathan and M. M. Ibrahim, "Numerical investigation of hydrogen-driven HCCI engine performance," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2024.
- [33] T. Sathish and V. Mohanavel, "Experimental study of HCCI combustion with hydrogen and Azadirachta biodiesel," *Fuel*, 2022.
- [34] S. Sathishkumar and M. Ibrahim, "Experimental investigation of hydrogen-enriched HCCI and dual-fuel combustion performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.
- [35] D. Han, "Experimental analysis of ethanol-diesel RCCI combustion variability and NOx emissions," *Fuel*, 2022.
- [36] S. S. Bhurat, "Experimental investigation of EGR effects on partial HCCI combustion performance and emissions," *International Journal of Engine Research*, 2021.
- [37] L. Munoz-Gracia, "Experimental and numerical investigation of biogas HCCI combustion stability and emissions," *Energies*, 2023.
- [38] S. Halis, "Experimental investigation of HCCI combustion with isopropanol at various load ranges," *Energy*, 2022.
- [39] J. Zareei, "Numerical study on HCCI combustion with natural gas and combustion phasing control," *Energy Conversion and Management*, 2022.
- [40] B. Gainey, "Thermal stratification effects on HCCI combustion stability and emissions," *Fuel*, 2021.
- [41] S. K. Gupta and R. K. Tripathi, "Experimental investigation of isopropanol-gasoline blends on HCCI combustion load range and emissions," *Energy*, 2022.
- [42] R. Chakraborty, "Numerical and experimental study of PCCI-RCCI combustion transition with hydrogen addition," *Energy*, 2022.
- [43] A. P. Singh, "Experimental analysis of PCCI combustion in a heavy-duty direct injection diesel engine," *Energy and Fuels*, 2023.
- [44] D. Ju, "Numerical investigation of injection angle effects on PCCI combustion in a downsized diesel engine," *SAE Technical Paper*, 2020.
- [45] S. Dhongde, "Numerical CFD study of injection timing effects on PCCI combustion in a heavy-duty engine," *Energies*, 2023.
- [46] S. Makkapati and D. Subramaniam, "Review on RCCI combustion for compression ignition engines: performance and emission aspects," *International Journal of Ambient Energy*, 2022.
- [47] P. Rahnama, "Numerical investigation of RCCI combustion in a heavy-duty compression ignition engine," *Results in Engineering*, 2024.
- [48] M. Elkelawy, "Review of PCCI combustion: injection strategies, EGR effects and emission characteristics," *Energy Conversion and Management: X*, 2022.
- [49] S. Jalivar and E. Neshat, "Numerical investigation of PCCI combustion in a light-duty diesel engine," *Heliyon*, 2025.
- [50] M. Sattarzadeh, "Experimental analysis of hydrogen ratio effects on RCCI combustion stability and load," *Energy Conversion and Management*, 2024.
- [51] K. Poorghasemi, "Numerical and experimental investigation of RCCI combustion with natural gas and diesel fuel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D*, 2022.
- [52] N. Kumar and A. Paul, "Performance and emission characteristics of RCCI engine fueled with diesel and alternative fuels," *Energy and Environment*, 2024.



- [53] Z. Wang, "Experimental study on RCCI combustion in a single-cylinder engine using gasoline and diesel fuels," *Scientific Reports*, 2021.
- [54] M. Anish, J. Jayaprakash, P. Bency, N. Joy, V. Jayaprakash, K. Arunkumar, J. Aravind Kumar, T. R. Praveenkumar, A. A. Ghfar, M. Rajasimman and B. Ravindran, "Impact of reactivity controlled compression ignition (RCCI) mode engine operation in diesel engine powered with B20 blend of waste cooking oil biodiesel," *Scientific Reports*, vol. 13, 2023.
- [55] S. Halis, "An Experimental Study of Operating Range, Combustion and Emission Characteristics in an RCCI Engine Fueled with Iso-Propanol/n-Heptane," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, 11 Julio 2023.
- [56] D. Pan, W. Sun, L. Guo, H. Zhang, S. Lin and M. Jiang, "Study on the Effect of Two-Stage Injection Strategy for Coal-to-Liquid/Gasoline Reactivity-Controlled Compression Ignition Combustion Mode," *ACS Omega*, vol. 9, no. 16, 10 April 2024.
- [57] S. Ramalingam, "Performance and emission analysis of RCCI engine using alternative fuels," *Results in Engineering*, 2024.
- [58] L. Zhou, "NO_x and soot reduction in heavy-duty RCCI engine with advanced strategies," *International Journal of Energy Research*, 2024.
- [59] S. Halis and T. Kocakulak, "Experimental investigation of RCCI combustion with iso-propanol and n-heptane fuels," *Energy*, 2024.
- [60] D. Pan, "Study on the effect of two-stage injection strategy for coal-to-liquid/gasoline RCCI combustion," *ACS Omega*, 2024.
- [61] M. T. Zarrinkolah and V. Hosseini, "Effects of key parameters on performance and emissions of RCCI combustion fueled with gasoline and diesel," *Energies*, 2022.
- [62] Z. Wang, "Optical investigation of RCCI combustion flame structure and heat release in a single-cylinder engine," *Fuel*, 2024.
- [63] M. Sattarzadeh, "Experimental and numerical study of RCCI combustion in a heavy-duty engine using natural gas," *International Journal of Engine Research*, 2023.
- [64] G. Ramsay, "Numerical investigation of hydrogen ratio and injection effects on RCCI combustion," *Energy*, 2020.
- [65] J. Rochussen and P. Kirchen, "Optical investigation of RCCI combustion flame structure in a heavy-duty engine," *Fuel*, 2023.
- [66] A. K. Agarwal, "Experimental investigation of methanol PFI and diesel pilot injection in RCCI combustion," *Fuel*, 2023.
- [67] D. Han, "Experimental investigation of n-butanol/n-heptane RCCI combustion in a heavy-duty engine," *Applied Energy*, 2021.
- [68] A. K. Agarwal, "Experimental study of methanol PFI and injection strategies in RCCI genset diesel engine," *Energy*, 2022.
- [69] J. Liu, "Numerical study on RCCI combustion using methanol and diesel in a compression ignition engine," *Fuel*, 2022.
- [70] M. Aydin, "RCCI combustion with CNG and biodiesel at varying compression ratios," *Energy*, 2021.
- [71] P. Harari, "Performance and emission characterization of RCCI engine using CNG and Karanja biodiesel," *Cleaner Engineering and Technology*, 2021.
- [72] Q. Wang, B. Guo, L. Cao, X. Liu, Y. Jiang and J. Yao, "A Visual Study on of HCB/Gasoline Dual-Fuel Combustion Strategy and Premix Ratio in a Diesel Engine," *IJAMM*, vol. 3, no. 1, 30 Enero 2024.



- [73] H. Huang, “Experimental study of RCCI combustion using methanol and diesel with EGR effects,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023.
- [74] N. Khedkar and A. K. Sarangi, “Experimental analysis of RCCI combustion characteristics with EGR effects,” *International Journal of Engine Research*, 2025.
- [75] I. B. Dalha, “Experimental study on RCCI combustion using biogas and diesel in a dual-fuel engine,” *Applied Thermal Engineering*, 2021.
- [76] M. Okcu, “Experimental investigation of injection effects on RCCI combustion with isobutanol and diesel,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021.
- [77] O. Hamdi, “Numerical study on spray cone angle effects in methane/diesel RCCI combustion,” *Entropy*, 2022.
- [78] A. P. Singh, “Experimental investigation of alcohol fuel effects on RCCI combustion and emissions,” *SAE International Journal of Engines*, 2021.
- [79] M. Firat, Ş. Altun, M. Okcu, Y. Varol and M. Şafak, “Experimental study on reduction of pollutant emissions in reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine fueled with diesel/gasoline fuels,” *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 11, no. 2, pp. 63 - 72, 01 07 2022.
- [80] I. Yildiz and B. A. Ceper, “Experimental investigation of RCCI combustion characteristics in a single-cylinder CI engine,” *Fuel*, 2022.
- [81] M. Okcu, “Experimental investigation of RCCI combustion using diesel and gasoline fuels in a diesel engine,” *Fuel*, 2022.
- [82] H. Tang and F. Lv, “Sustainable photovoltaic power generation spatial planning through ecosystem service valuation: A case study of the Qinghai-Tibet plateau,” *Renewable Energy*, vol. 222, Febrero 2024.
- [83] S. Gowthaman and A. Sathiyagnanam, “Effects of charge temperature and injection pressure on HCCI combustion performance and emissions,” *Alexandria Engineering Journal*, 2021.
- [84] R. Vallinayagam, “Methanol HCCI combustion performance, emissions and load range in a single-cylinder engine,” *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [85] M. Mohebbi, “Experimental study of natural gas and n-heptane HCCI combustion with EGR timing control,” *Applied Thermal Engineering*, 2020.
- [86] J. Yadav, M. Günther and S. Pischinger, “Optical spray investigation and numerical spraymodelcalibration forthe,” *EnergyConversionandManagement*, vol. 302, 05 Febrero 2024.
- [87] D. Ramasamy, “Experimental investigation of n-butanol/diesel RCCI combustion performance and stability,” *Scientific Reports*, 2025.

NOMENCLATURE

Brake Thermal Efficiency	BTE
Carbon Monoxide	CO
Coefficient of Variation of	COVIME



indicated Pressure	Mean	Effective	P
Hydrocarbons			HC
Homogeneous Charge Compression Ignition			HCCI
Indicated Pressure	Mean	Effective	IMEP
Low Temperature Combustion			LTC
Nitrogen Oxides			NO _x
Premixed Charge Compression Ignition			<i>PCCI</i>
Particulate Matter			PM
Reactivity Compression Ignition		Controlled	RCCI