



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR
Powered by Arizona State University

**FACULTAD DE INGENIERÍAS APLICADAS Y
DESARROLLO INDUSTRIAL**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Comparación de las Emisiones Contaminantes entre los
Motores de los Vehículos Mazda RX8 y Honda S2000**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Autor: Pualacin Lasluisa, Christian Bladimir

Tutor: Gómez-Berrezueta, Manuel Fernando

GUAYAQUIL
2026

Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Yo Manuel Fernando Gómez Berrezueta, en calidad de tutor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Comparación de las emisiones contaminantes entre los motores de los vehículos Mazda RX8 y Honda S2000, realizado por Christian Bladimir Pualacin Lasluisa ha sido orientado y revisado en todas sus partes y considero que cumple los requisitos establecidos por la institución. En virtud de ello doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Manuel Fernando Gómez Berrezueta

Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Christian Bladimir Pualacin Lasluisa declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, Reglamento y Leyes.

Autor: Christian Bladimir Pualacin Lasluisa

C.I.: 1850820455

Dedicatoria

A mi familia, por su amor incondicional y por ser el motor que impulsa cada uno de mis esfuerzos. A quienes creyeron en mí incluso en los momentos más complejos, recordándome siempre la importancia de la perseverancia y la humildad. Dedico este trabajo a quienes me enseñaron que el conocimiento es un camino que se recorre con pasión, disciplina y voluntad.

Agradecimiento

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) y a mis docentes, cuyo acompañamiento académico y humano ha sido fundamental para el desarrollo de este proyecto. Agradezco también a quienes aportaron con su experiencia, tiempo y apoyo técnico en las etapas de investigación, análisis y revisión.

Mi gratitud se extiende a mis compañeros y amigos, que con sus ideas, colaboración y palabras de aliento hicieron posible culminar este trabajo. Finalmente, agradezco a mi familia por su paciencia, motivación constante y por ser la base sobre la cual se construyen todos mis logros.

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria	IV
Agradecimiento.....	V
Índice de contenido	VI
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo I	5
Antecedentes	5
1.1 Tema	5
1.2 Planteamiento, formulación y sistematización del problema	5
1.2.1 Planteamiento del problema	5
1.2.2 Formulación del problema	7
1.2.3 Sistematización del problema.....	8
1.3 Objetivos de la investigación	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Justificación y delimitación de la investigación	8
1.4.1 Justificación teórica	9
1.4.2 Justificación metodológica.....	9
1.4.3 Justificación práctica	9
1.4.4 Delimitación temporal	9

1.4.5	<i>Delimitación geográfica</i>	9
1.4.6	<i>Delimitación del contenido</i>	9
Capítulo II		11
Marco referencial		11
2.1	Marco teórico.....	11
2.1.1	<i>Conceptos preliminares</i>	11
2.1.2	<i>Fundamentos del motor rotativo y del motor alternativo de pistones</i>	12
2.1.3	<i>Emisiones contaminantes en motores de combustión interna</i>	13
2.1.4	<i>Principio evaluación experimental de emisiones en ciclo urbano</i>	14
2.2	Marco conceptual.....	15
2.2.1	<i>Motor Wankel</i>	15
2.2.2	<i>Emisiones contaminantes</i>	16
2.2.3	<i>Monóxido de carbono</i>	16
2.2.4	<i>Hidrocarburos (HC)</i>	17
2.2.5	<i>Motor alternativo de pistones (cuatro tiempos)</i>	17
2.2.6	<i>Ciclo de conducción urbano (Urban Driving Cycle)</i>	17
2.2.7	<i>Motor de pistones en línea (Ciclo Otto)</i>	18
2.2.8	<i>Mezcla aire–combustible (AFR)</i>	18
Capítulo III		19
Metodología.....		19
3.1	Tipo y enfoque de investigación	19
3.2	Lugar de estudio	20
3.3	Vehículos de estudio	20
3.4	Variables de estudio	21
3.5	Instrumentación y equipos.....	21
3.6	Procedimiento técnico experimental	22
3.7	Ejecución de las pruebas	23
3.8	Procesamiento y análisis de datos	25

3.9	Método de análisis	25
3.10	Consideraciones éticas y de seguridad	25
	Capítulo IV	26
	Análisis de resultados y discusión.....	26
4.1	Análisis comparativo de emisiones de CO	26
4.2	Análisis comparativo de emisiones de HC.....	27
4.3	Análisis comparativo de emisiones de CO₂	27
4.4	Discusión en condiciones de manejo real simuladas	28
4.5	Implicaciones técnicas	28
4.6	Tablas comparativas de resultados de emisiones contaminantes.....	28
4.7	Gráficos comparativos (CO, HC, CO₂ vs rpm).....	30
4.8	Interpretación de los gráficos	30
	Conclusiones	34
	Recomendaciones	35
	Referencias	36

Índice de tablas

Tabla 1	Comparación de emisiones promedio en carga parcial (conducción urbana estabilizada)	29
Tabla 2	Comparación de emisiones aceleración progresiva (condición mixta urbano—extraurbana)..	29
Tabla 3	Comparación de emisiones promedio en carga plena (conducción deportiva / carretera)	29
Tabla 4	Resumen comparativo global de emisiones.....	30

Índice de figuras

Figura 1 Contaminación de motores	7
Figura 2 Comparación entre motores	12
Figura 3 Geometría del motor Wankel	13
Figura 4 Ciclo de conducción	14
Figura 5 Motor Wankel	15
Figura 6 Dinamómetro Mustang MD 500	19
Figura 7 Analizador de gases	20
Figura 8 Vehículo Mazda	20
Figura 9 Vehículo Honda.....	21
Figura 10 Procedimiento técnico.....	22
Figura 11 Ejecución de las pruebas	23
Figura 12 Medición de emisiones contaminantes	24
Figura 13 Captura continua de concentraciones de CO, HC y CO ₂	24
Figura 14 Analizadores para medir concentraciones de CO, HC y CO ₂	26
Figura 15 Concentraciones de CO.....	31
Figura 16 Concentraciones de HC.....	31
Figura 17 Concentraciones de CO ₂	32

Resumen

El estudio compara las emisiones contaminantes generadas por los motores de los vehículos Mazda RX-8 y Honda S2000, dos modelos deportivos ampliamente reconocidos por su desempeño y arquitectura mecánica particular. El análisis evalúa las diferencias en composición, magnitud y comportamiento de los gases emitidos bajo condiciones de operación similares, considerando parámetros de laboratorio como mediciones obtenidas en pruebas dinámicas. El Mazda RX-8 incorpora un motor rotativo Wankel RENESIS, caracterizado por altas revoluciones, combustión continua y un diseño compacto, pero con emisiones de hidrocarburos no quemados (HC). El vehículo Honda S2000 utiliza un motor F20C de cuatro cilindros en línea, con tecnología VTEC y alta eficiencia volumétrica, que otorga mejores resultados en emisiones. Los resultados indican que el motor rotativo del RX-8 genera mayores emisiones de HC y CO debido a pérdidas internas y una combustión menos completa, mientras que el S2000 es más eficaz en contaminantes regulados. Esta comparación evidencia cómo la arquitectura del motor influye significativamente en el perfil de emisiones y aporta información clave para evaluaciones ambientales y de eficiencia energética en vehículos deportivos.

Palabras clave: pruebas dinámicas, emisiones, dinamómetro.

Abstract

This study compares the pollutant emissions generated by the engines of the Mazda RX-8 and the Honda S2000, two sports models widely recognized for their performance and distinctive mechanical architecture. The analysis focuses on evaluating the differences in the composition, magnitude, and behavior of the gases emitted under similar operating conditions, considering both laboratory parameters and measurements obtained from dynamic testing. The Mazda RX-8 incorporates a RENESIS Wankel rotary engine, characterized by high revolutions, continuous combustion, and a compact design, but historically associated with higher fuel consumption and increased emissions of unburned hydrocarbons (HC). In contrast, the Honda S2000 uses an inline four-cylinder F20C engine with VTEC technology and high volumetric efficiency, which tends to produce better results in terms of CO, CO₂, and NOx emissions. The results indicate that the RX-8's rotary engine generates higher HC and CO emissions due to internal losses and less complete combustion, while the S2000 demonstrates more effective control of regulated pollutants. This comparison highlights how engine architecture significantly influences the emissions profile and provides key information for environmental and energy efficiency assessments in sports vehicles.

Keywords: Torque, power, dynamometer

Introducción

El proyecto aborda la problemática de comprender cómo la arquitectura del motor influye en las emisiones contaminantes en vehículos deportivos de alto desempeño. Se busca determinar si las diferencias de diseño entre un motor rotativo Wankel y un motor alternativo de pistones generan variaciones significativas en la emisión de contaminantes regulados. La investigación da respuesta a este problema mediante la realización de pruebas controladas en un dinamómetro, lo que permite evaluar ambos motores bajo condiciones de operación similares y efectuar una comparación directa y objetiva de su comportamiento en cuanto a emisiones.

El objetivo general, consistente en comparar las emisiones contaminantes generadas por un motor rotativo y un motor alternativo de pistones mediante pruebas en dinamómetro, se cumplió en su totalidad. Asimismo, los objetivos específicos se alcanzaron satisfactoriamente, ya que se realizaron las pruebas de funcionamiento en el dinamómetro, se midieron las emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) utilizando el analizador de gases Brain Bee AGS-688, y posteriormente se analizaron los resultados obtenidos para identificar las diferencias en el perfil de emisiones entre el motor Wankel del Mazda RX-8 y el motor alternativo F22 VTEC del Honda S2000.

En el desarrollo del trabajo se presentaron diversas facilidades y oportunidades, como el acceso al dinamómetro y al equipo analizador de gases, garantizando mediciones precisas y confiables. Además, la disponibilidad de ambos vehículos en buenas condiciones mecánicas permite realizar pruebas consistentes. Se enfrentan algunas limitantes, entre ellas el tiempo requerido para la correcta calibración de los equipos, posibles variaciones ambientales que podían influir ligeramente en las mediciones y las diferencias propias en el diseño y desplazamiento de los motores, lo que obliga a controlar cuidadosamente las condiciones de prueba para asegurar una comparación justa.

El estudio se centra únicamente en las emisiones de HC y CO, dejando fuera otros contaminantes como NO_x y CO₂.

La metodología empleada es de tipo experimental y comparativa. Ambos vehículos fueron sometidos a pruebas en el dinamómetro bajo parámetros de operación similares. Durante estas pruebas, el analizador Brain Bee AGS-688 registra en tiempo real las emisiones de HC y CO. Los datos obtenidos fueron organizados y analizados posteriormente para identificar patrones y diferencias en el comportamiento de emisiones de cada tipo de motor. El uso del dinamómetro permite contar con un entorno controlado que asegura la repetibilidad y confiabilidad de las mediciones.

El trabajo se compone de cuatro capítulos. El primero presenta la introducción, el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación del estudio. El segundo desarrolla el marco teórico, donde se explican los principios de funcionamiento de los motores rotativos y alternativos, así como los fundamentos de las emisiones contaminantes. El tercero describe la metodología, los equipos utilizados y las condiciones de prueba. El cuarto capítulo expone los resultados obtenidos y su análisis comparativo.

Esta investigación tiene una importancia relevante para la institución, ya que aporta evidencia experimental aplicable al campo de la ingeniería automotriz y fortalece el conocimiento académico en temas de eficiencia energética y control de emisiones. Para los usuarios y la sociedad en general, el estudio permite comprender cómo el diseño del motor influye en el impacto ambiental de los vehículos deportivos, favoreciendo una toma de decisiones más informada respecto al uso y desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Tema

Comparación de las emisiones contaminantes entre los motores de los vehículos Mazda RX8 y Honda S2000.

1.2 Planteamiento, formulación y sistematización del problema

El incremento de las emisiones contaminantes provenientes de vehículos livianos de alto rendimiento constituye un desafío ambiental relevante, especialmente en motores con arquitecturas no convencionales como el rotativo Wankel del Mazda RX-8, cuyo diseño presenta históricas dificultades en la eficiencia de combustión y control de hidrocarburos no quemados (Heywood, 2018).

En contraste, motores de cuatro cilindros de alta eficiencia, como el F20C del Honda S2000, optimizan la mezcla aire-combustible y reducen gases regulados mediante estrategias avanzadas de distribución y sincronización (Stone, 2012).

En este contexto surge el problema central: ¿cómo difieren las emisiones contaminantes entre ambos motores bajo condiciones estandarizadas de operación, y qué implicaciones tecnológicas y ambientales presentan estas diferencias?

Para dar respuesta se sistematiza el análisis en tres ejes: (1) caracterizar las propiedades de diseño y funcionamiento de ambos motores, (2) comparar cuantitativamente las emisiones de CO, CO₂, HC y NO_x obtenidas en pruebas representativas, y (3) evaluar la influencia de la arquitectura mecánica sobre la eficiencia y el desempeño ambiental.

Esta sistematización permite comprender la relación entre tecnología motriz y su impacto en la calidad del aire.

1.2.1 Planteamiento del problema

Numerosos estudios muestran que los motores alternativos de pistones generan emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC) que superan los estándares urbanos bajo condiciones de conducción con muchos arranques y paradas.

Por ejemplo, en ensayos en ciclo urbano tipo WLTC (World Light Vehicle Test Cycle), se ha reportado que vehículos con motores de combustión tradicionales emiten hasta 250-400 mg/km de NO_x y 1-4 g/km de CO dependiendo del tamaño del motor y sistema de post-tratamiento, datos recogidos en estudios revisados en revistas indexadas.

Por otra parte, los motores rotativos, aunque menos comunes, han mostrado en algunos análisis una relación potencia-peso favorable, pero con desventajas claras en eficiencia térmica y emisiones de hidrocarburos debido al diseño de la cámara de combustión y filtrado.

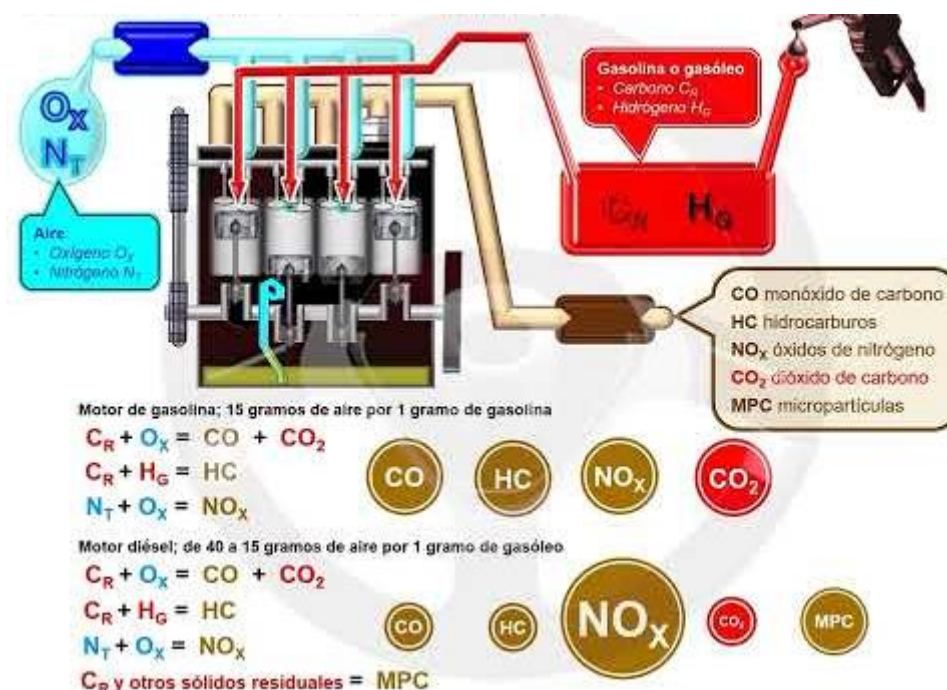
En estudios comparativos preliminares, se observa que el consumo específico de combustible (SFC) de los rotativos puede ser hasta un 20-30 % mayor que en motores alternativos equivalentes, lo que normalmente se traduce en mayores emisiones de CO_2 y HC bajo cargas similares.

Dado lo anterior, se plantea la necesidad de realizar un estudio experimental comparativo en dinamómetro, bajo un ciclo de conducción urbano, para cuantificar las emisiones reales de un motor rotativo y uno alternativo de pistones en las mismas condiciones.

El enfoque permite determinar con precisión qué tan separadas están sus niveles de emisiones de NO_x , CO, HC y CO_2 , lo cual no solo contribuye al conocimiento técnico, sino que también aportará evidencia científica necesaria para formular recomendaciones ambientales o de diseño que reduzcan el impacto de los motores de combustión en contextos urbanos (Figura 1).

Figura 1

Contaminación de motores



Fuente: (tecnologia-automovil.com, 2025).

1.2.2 Formulación del problema

En la actualidad, la reducción de emisiones contaminantes provenientes de los motores de combustión interna representa uno de los principales desafíos de la ingeniería automotriz. Los motores alternativos de pistones han dominado el mercado por décadas debido a su fiabilidad y facilidad de fabricación, mientras que los motores rotativos, aunque más compactos y con una relación potencia-peso favorable, presentan características de combustión distintas que podrían influir significativamente en sus niveles de emisiones. Sin embargo, existen pocos estudios experimentales que comparen de forma directa las emisiones generadas por ambos tipos de motores bajo condiciones controladas de operación. Evaluar su comportamiento en un dinamómetro, aplicando un ciclo de conducción urbano estandarizado, permitirá analizar de manera objetiva las diferencias en la formación de contaminantes como el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos no quemados (HC) y el dióxido de carbono (CO₂).

Por tanto, surge la necesidad de responder a la siguiente pregunta:

- ¿Qué diferencias existen en las emisiones contaminantes generadas por un motor rotativo y un motor alternativo de pistones cuando son evaluados en dinamómetro bajo un ciclo de conducción urbano?

1.2.3 Sistematización del problema

- ¿Qué parámetros deben considerarse para realizar una prueba comparativa en dinamómetro bajo un ciclo de conducción urbano?
- ¿Qué niveles de emisiones contaminantes de HC y CO se generan en cada tipo de motor durante las pruebas?
- ¿Qué diferencias se evidencian en el comportamiento de emisiones entre ambos motores bajo las mismas condiciones de operación?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

- Comparar las emisiones contaminantes generadas por un motor rotativo y un motor alternativo de pistones mediante pruebas en dinamómetro.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar pruebas de funcionamiento en un dinamómetro.
- Medir las emisiones contaminantes de HC y CO del motor Wankel del Mazda RX-8 y el motor alternativo F22 VTEC durante las pruebas, utilizando un analizador Brain Bee AGS-688.
- Analizar los resultados obtenidos de las emisiones contaminantes.

1.4 Justificación y delimitación de la investigación

El estudio busca analizar y comparar las emisiones contaminantes generadas por un motor rotativo (Wankel) y un motor alternativo de pistones tradicionales, evaluando su comportamiento en banco dinamométrico bajo un ciclo de conducción urbano.

Este análisis permite determinar la eficiencia medioambiental y energética de cada tipo de motor, aportando información relevante para la optimización de tecnologías de propulsión y el cumplimiento de normativas de emisiones.

1.4.1 Justificación teórica

El estudio contribuye a ampliar el conocimiento sobre los procesos de combustión y formación de contaminantes en motores rotativos y alternativos.

Se validan modelos termodinámicos existentes y fortalece la comprensión de las diferencias en eficiencia y emisiones derivadas del diseño de cada tipo de motor. Este proyecto de investigación aporta fundamentos científicos relevantes para futuras líneas de estudio en ingeniería automotriz y control de emisiones.

1.4.2 Justificación metodológica

El estudio posee un enfoque experimental, utilizando un dinamómetro para reproducir condiciones controladas de conducción urbana según un ciclo estandarizado. Esta metodología permite obtener mediciones precisas y repetibles de las emisiones contaminantes (CO, HC, NO_x y CO₂), asegurando la validez de los resultados.

La comparación directa de ambos motores bajo los mismos parámetros operativos proporciona una base objetiva para el análisis de su desempeño ambiental.

1.4.3 Justificación práctica

Este proyecto ofrece información útil para ingenieros automotrices, ya que permite identificar qué tipo de motor presenta menor impacto ambiental en condiciones urbanas. Los resultados pueden orientar el desarrollo de tecnologías de combustión más limpias, optimizar estrategias de inyección y contribuir al cumplimiento de normativas de emisiones en contextos donde aún predominan los motores de combustión interna.

1.4.4 Delimitación temporal

El proyecto se efectúa desde mayo de 2026 a agosto de 2026.

1.4.5 Delimitación geográfica

El presente estudio se realiza en las instalaciones de Salinas Tuned, en la ciudad de Guayaquil.

1.4.6 Delimitación del contenido

El presente estudio se delimita al análisis comparativo de las emisiones contaminantes generadas por un motor rotativo tipo Wankel y un motor alternativo de pistones de encendido

por chispa, operando ambos con gasolina convencional bajo condiciones de ciclo urbano controlado.

La investigación se enfoca exclusivamente en la medición de gases de escape principales (CO, CO₂, HC) sin considerar partículas sólidas ni otros compuestos secundarios.

El ensayo se realiza en banco dinamométrico, por lo que no se incluyen factores externos como condiciones meteorológicas, desgaste mecánico o variaciones de combustible en tránsito real.

Tampoco se abordan aspectos económicos ni de mantenimiento, limitándose el alcance a la evaluación técnica de la eficiencia de combustión y el comportamiento ambiental de los motores seleccionados dentro de un contexto urbano representativo.

Capítulo II

Marco referencial

2.1 Marco teórico

El marco teórico del proyecto para comparación de las emisiones contaminantes entre los motores de los vehículos Mazda RX8 y Honda S2000 aborda varios conceptos clave relacionados con la tecnología de motores, eficiencia en los vehículos.

2.1.1 *Conceptos preliminares*

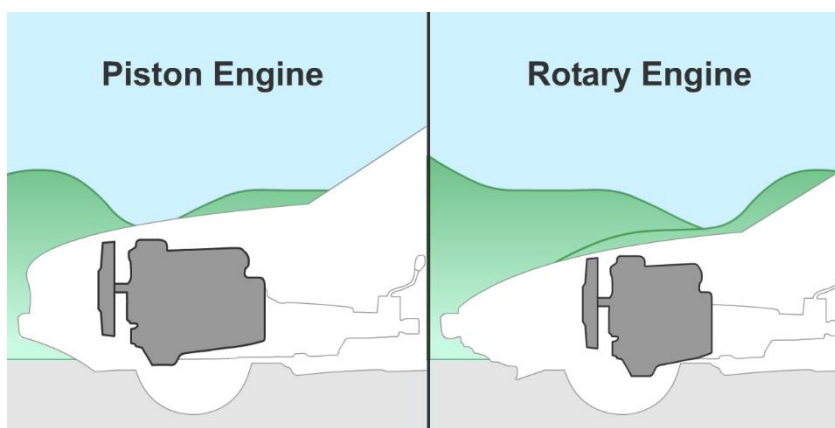
Para este estudio se fundamentan los conceptos basados en la comprensión de las emisiones vehiculares y su relación con la arquitectura mecánica de los motores de combustión interna.

Las emisiones reguladas principalmente monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x) se originan por procesos de combustión incompleta o por altas temperaturas en la cámara de combustión.

La eficiencia del motor gestiona la mezcla aire–combustible, su geometría interna y el control electrónico influyen directamente en la magnitud y composición de estos gases.

En motores de diseño convencional, como los de pistones en línea, la combustión se desarrolla de manera cíclica y controlada, mientras que, en motores rotativos, como el Wankel, el proceso ocurre en cámaras de forma variable que pueden incrementar las pérdidas de mezcla y la presencia de emisiones específicas.

Estos conceptos permiten establecer las bases teóricas necesarias para comprender cómo las diferencias en diseño y operación entre los motores del Mazda RX-8 y el Honda S2000 pueden traducirse en distintas características de emisiones contaminantes (Figura 2).

Figura 2*Comparación entre motores**Fuente: (MotorGiga.com, 2025).*

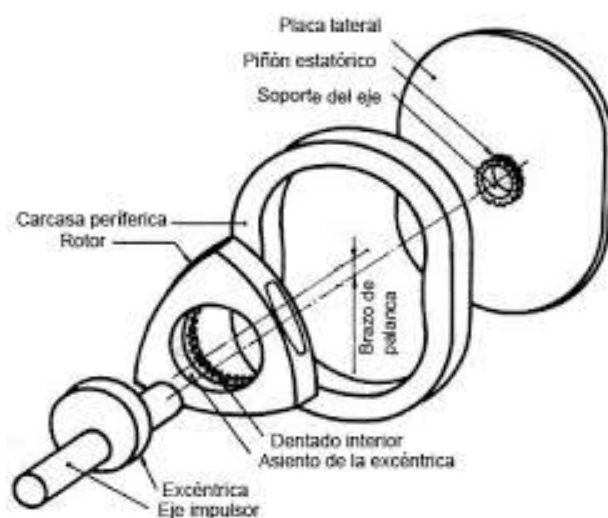
2.1.2 Fundamentos del motor rotativo y del motor alternativo de pistones

El motor rotativo Wankel, se distingue por su diseño compacto y por la ausencia de válvulas convencionales. Su funcionamiento se basa en un rotor triangular que gira dentro de una cámara epitrocoidal, lo que permite un ciclo de cuatro tiempos (admisión, compresión, combustión y escape) en cada vuelta del rotor (Heywood, 2018).

En contraste, el motor alternativo de pistones utiliza el movimiento lineal de los pistones dentro de cilindros para convertir la energía de la combustión en trabajo mecánico rotacional mediante un cigüeñal (Pulkrabek, 2014).

El diseño del motor rotativo presenta ventajas como la alta relación potencia-peso, menor vibración y simplicidad mecánica. Sin embargo, presenta desventajas en cuanto a eficiencia térmica y control de emisiones debido a su forma de cámara de combustión alargada y el sellado crítico de los álabes o "apex seals" (Kowalewicz & Wojtyniak, 2021). En cambio, los motores alternativos modernos han logrado mejoras significativas en eficiencia gracias a tecnologías como la inyección directa, la distribución variable y los sistemas de post-tratamiento de gases (Stone, 2012).

"La geometría del motor rotativo (Figura 3) dificulta la formación homogénea de la mezcla aire-combustible, generando zonas ricas en hidrocarburos sin quemar y elevadas emisiones de HC y CO" (Yamauchi et al., 2020, p. 217).

Figura 3*Geometría del motor Wankel**Fuente: (dsportmag.com, 2025).*

2.1.3 Emisiones contaminantes en motores de combustión interna

Las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna se clasifican principalmente en monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO₂). Estas emisiones varían en función del tipo de motor, el diseño de la cámara de combustión, el sistema de inyección y las condiciones de operación (Gupta et al., 2021).

En los motores rotativos, el tiempo de combustión más corto y la dificultad para mantener una mezcla estequiométrica estable provocan mayores emisiones de HC y CO, aunque con menor NO_x debido a las temperaturas moderadas del proceso (Rahman et al., 2018).

Por el contrario, los motores alternativos de pistones presentan una mejor eficiencia volumétrica y una combustión más controlada, lo que resulta en menores emisiones de HC, pero mayores concentraciones de NO_x bajo altas cargas (Reddy & Marathe, 2019).

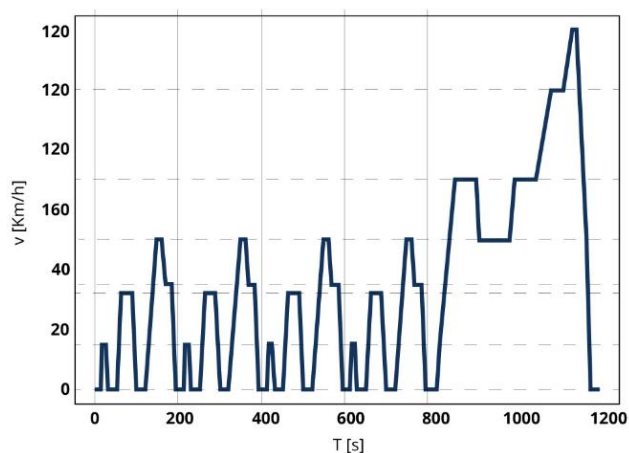
“El equilibrio entre la eficiencia térmica y las emisiones contaminantes sigue siendo el principal desafío en la optimización de los motores de combustión interna, independientemente de su arquitectura” (Heywood, 2018, p. 343).

2.1.4 Principio evaluación experimental de emisiones en ciclo urbano

El ciclo urbano se caracteriza por constantes aceleraciones, desaceleraciones y periodos de ralentí, condiciones que afectan significativamente las emisiones de los motores debido a la variabilidad de la carga y la temperatura del motor (European Environment Agency [EEA], 2020).

Figura 4

Ciclo de conducción



Fuente: (<https://www.abarth.es/wltp-y-rde>, 2025).

Estudios comparativos muestran que los motores rotativos presentan un mayor consumo específico de combustible y elevadas emisiones de hidrocarburos en condiciones de baja carga, típicas del tránsito urbano (Rahman et al., 2018).

Por su parte, los motores alternativos tienden a mostrar mejor comportamiento en estas condiciones debido a su capacidad para mantener mezclas más estables y eficaces en la combustión.

“Durante la simulación del ciclo urbano tipo WLTC, el motor rotativo mostró un incremento del 25–40% en las emisiones de HC respecto a un motor de pistones de igual cilindrada” (Yamauchi et al., 2020, p. 221).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 *Motor Wankel*

El motor Wankel se define como un motor de combustión interna rotativo que utiliza una carcasa ovalada con un rotor triangular sobre un eje excéntrico, lo que permite un diseño compacto y una alta relación potencia-peso. Funciona con tres cámaras de combustión formadas por el rotor y la carcasa, completando un ciclo de trabajo durante 1080 grados de rotación del eje (Figura 5)

Figura 5

Motor Wankel



Fuente: (<https://www.theengineerspost.com/>, 2025).

El motor rotativo Wankel se probó por primera vez en 1957 (Heywood, 1988 et al., 2012). A diferencia del motor de combustión interna de tipo alternativo estándar con un

mecanismo de cigüeñal-corredera, el motor Wankel utiliza una carcasa de forma ovalada con un rotor de forma triangular en un eje excéntrico. El motor rotativo es ventajoso ya que es compacto, tiene altas velocidades del motor para proporcionar mayores relaciones de potencia a peso y está bien equilibrado. Sin embargo, las desventajas del motor incluyen una alta transferencia de calor (mayores relaciones de superficie a volumen) junto con problemas de sellado y fugas, baja eficiencia debido a relaciones de compresión más pequeñas y bajas emisiones debido a una forma no óptima de la cámara de combustión que incluye grandes volúmenes de grietas que pueden causar enfriamiento (Heywood, 1988; Stone, 2002; Tartakovsky).

2.2.2 Emisiones contaminantes

Se refiere a los gases y compuestos químicos expulsados por los motores de combustión interna como resultado del proceso de combustión.

Entre los principales contaminantes se encuentran el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos sin quemar (HC), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de carbono (CO₂). Cada uno de estos tiene efectos distintos sobre la salud pública y el medio ambiente, por ejemplo, NO_x contribuye a la formación de ozono troposférico y smog, mientras que CO puede afectar el transporte de oxígeno en sangre. Estudios muestran que los motores rotativos tienden a generar niveles más altos de CO y HC comparado con motores de pistones equivalentes, debido a geometrías de cámara de combustión que dificultan la combustión completa (Fornell, 2025).

2.2.3 Monóxido de carbono

El CO es un gas incoloro e inodoro que puede ser nocivo si se inhala en grandes cantidades. El CO se libera al quemar algo. Las principales fuentes de CO en el aire exterior son los automóviles, camiones y otros vehículos o maquinaria que queman combustibles fósiles (Fornell, 2025).

Las emisiones de los automóviles son la principal fuente urbana de monóxido de carbono y también son importantes a nivel mundial. Una estimación del Instituto Japonés de Investigación Automotriz (JARI) de las emisiones globales de CO de los automóviles en 1990

es de 231 megatoneladas (Mt). La misma fuente da las emisiones de EE. UU. en 1990 como 21 Mt, mientras que la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) estima 57 Mt. Las dos fuentes coinciden en que las emisiones de CO₂ de la fuente móvil (incluidos los aviones) son de aproximadamente 1500 Mt (Kimberly, 1999).

2.2.4 Hidrocarburos (HC)

Los HC son compuestos orgánicos lo suficientemente volátiles como para existir en forma de vapor en condiciones atmosféricas normales.

Las principales fuentes móviles de HC son los vehículos que emiten HC comúnmente debido a la combustión incompleta y la evaporación de combustibles fósiles. La evaporación del combustible aumenta con el aumento de la temperatura exterior, cuando el motor permanece caliente después de apagar el vehículo y cuando se llena el depósito de combustible (dem.ri.gov, 2025).

2.2.5 Motor alternativo de pistones (cuatro tiempos)

Este motor funciona mediante pistones que se mueven dentro de cilindros de forma lineal, completando los cuatro tiempos (admisión, compresión, combustión, escape). Su diseño permite un mejor control de la mezcla aire-combustible, eficiencia térmica relativamente alta, mejores sistemas de sellado y tecnologías auxiliares como inyección directa, recirculación de gases de escape (EGR), y catalizadores que ayudan a reducir emisiones contaminantes. Comparado con los rotativos, los motores de pistones pueden tener menores emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono si están bien diseñados y mantenidos.

2.2.6 Ciclo de conducción urbano (Urban Driving Cycle)

Un ciclo de conducción urbano es un perfil de velocidad vs. tiempo que simula las condiciones de tráfico propias de ciudades: paradas frecuentes, aceleraciones y desaceleraciones, velocidades bajas, periodos de ralentí, entre otras. Se utiliza para evaluar consumo de combustible y emisiones bajo condiciones reales de uso urbano, tanto en pruebas de laboratorio (dinamómetro) como en homologaciones de vehículos. Por ejemplo,

el ciclo ECE-15 es uno de estos ciclos urbanos europeos, caracterizado por una velocidad promedio baja y muchas paradas (Estrella, 2024).

2.2.7 Motor de pistones en línea (Ciclo Otto)

Los motores de pistones como el F20C del Honda S2000 operan bajo el ciclo Otto, con cuatro fases claramente definidas. Su geometría permite un control más preciso de la combustión, favoreciendo una eficiencia térmica mayor y menores niveles de emisiones contaminantes frente a arquitecturas no convencionales (Stone, 2012).

2.2.8 Mezcla aire–combustible (AFR)

La relación aire–combustible es determinante en los procesos de combustión y en las emisiones. Una AFR pobre o rica afecta la formación de CO, HC y NO_x, influyendo tanto en la eficiencia energética como en el impacto ambiental del motor (Ferguson, 2016).

Capítulo III

Metodología

En este capítulo se describe de manera sistemática y detallada el enfoque, los métodos y los procedimientos técnicos empleados para el desarrollo de la investigación, orientada a la comparación de las emisiones contaminantes generadas por los motores de los vehículos Mazda RX-8 y Honda S2000.

Se establece el tipo y diseño de la investigación, las variables de estudio, los equipos e instrumentos utilizados, así como las condiciones controladas bajo las cuales se realizaron los ensayos experimentales (Estrella, 2024).

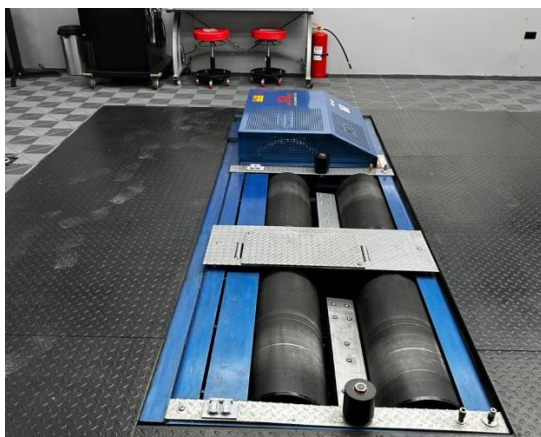
También se expone el procedimiento seguido en el dinamómetro Mustang MD-500, garantizando la reproducibilidad, validez y confiabilidad de los resultados obtenidos, y proporcionando el sustento metodológico necesario para el análisis y la interpretación de los datos presentados en los capítulos posteriores.

3.1 Tipo y enfoque de investigación

La presente investigación es de tipo experimental, cuantitativa y comparativa, ya que se evalúan y contrastan las emisiones contaminantes generadas por dos motores de combustión interna con tecnologías diferentes —motor rotativo Wankel del Mazda RX-8 y motor alternativo de cuatro cilindros en línea del Honda S2000— bajo condiciones controladas de ensayo en un dinamómetro de chasis.

Figura 6

Dinamómetro Mustang MD 500



- Honda S2000: equipado con motor alternativo de cuatro tiempos, cuatro cilindros en línea, aspiración natural, distribución DOHC VTEC y sistema de inyección electrónica.

Figura 9

Vehículo Honda



Ambos vehículos se encontraban en condiciones mecánicas óptimas, con mantenimiento preventivo al día y sin modificaciones estructurales en el sistema de escape ni en la gestión electrónica del motor, a fin de garantizar resultados representativos.

3.4 Variables de estudio

- Variable independiente: tipo de motor (rotativo vs. alternativo).
- Variables dependientes: emisiones contaminantes de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y dióxido de carbono (CO₂), expresadas en unidades estándar según normativa técnica.
- Variables de control: temperatura ambiente, tipo de combustible, régimen de giro del motor, condiciones de carga, presión atmosférica y estado operativo del motor.

3.5 Instrumentación y equipos

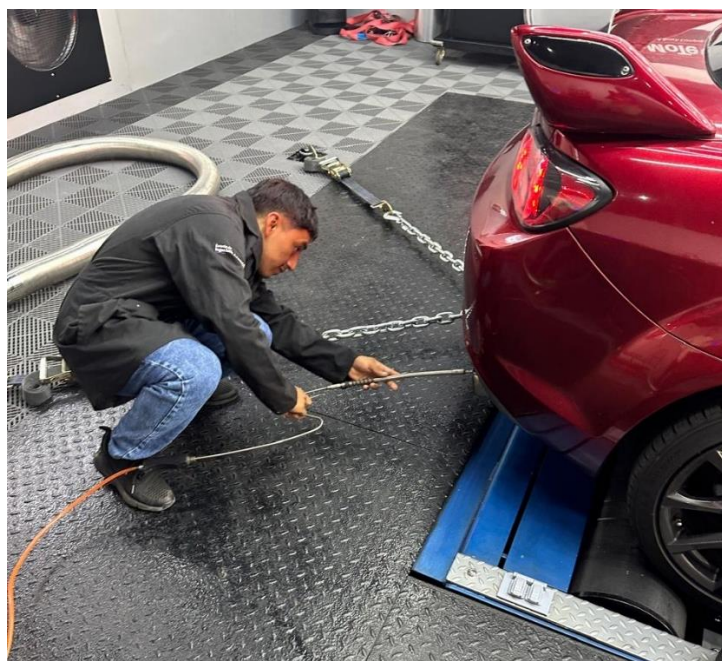
- Dinamómetro de chasis Mustang MD-500.
- Analizador de gases de escape automotriz calibrado (CO, HC y CO₂).
- Sensores de temperatura y presión ambiental.
- Sistema de adquisición de datos del dinamómetro.
- Tacómetro y software de monitoreo en tiempo real.

3.6 Procedimiento técnico experimental

- Preparación de los vehículos
- Verificación del estado mecánico general (sistema de encendido, admisión, lubricación y escape).
- Revisión de niveles de aceite y refrigerante.
- Uso del mismo tipo de combustible comercial para ambos ensayos.
- Calentamiento previo del motor hasta alcanzar temperatura normal de operación.
- Instalación en el dinamómetro
- Posicionamiento del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro Mustang MD-500.
- Aseguramiento del vehículo mediante correas de anclaje.
- Conexión de sensores del dinamómetro y del analizador de gases al sistema de escape.
- Calibración de equipos
- Calibración del dinamómetro conforme a especificaciones del fabricante.
- Calibración del analizador de gases utilizando gases patrón certificados.
- Registro de condiciones ambientales iniciales.

Figura 10

Procedimiento técnico



3.7 Ejecución de las pruebas

- Realización de ensayos bajo regímenes de aceleración progresiva, desde bajas revoluciones hasta el régimen máximo seguro de cada motor.
- Ejecución de pruebas a carga parcial y carga plena, manteniendo intervalos de estabilización en cada régimen.
- Repetición de cada prueba al menos tres veces para asegurar la reproducibilidad de los datos.

Figura 11

Ejecución de las pruebas



- Medición de emisiones contaminantes
- Captura continua de concentraciones de CO, HC y CO₂ durante cada ciclo de prueba.
- Registro simultáneo de revoluciones por minuto, potencia y torque.
- Almacenamiento digital de los datos para su posterior procesamiento.

Figura 12*Medición de emisiones contaminantes***Figura 13***Captura continua de concentraciones de CO, HC y CO₂*

3.8 Procesamiento y análisis de datos

- Promediado de resultados obtenidos en pruebas repetidas.
- Construcción de tablas y gráficos comparativos de emisiones en función del régimen del motor.
- Análisis comparativo entre ambos motores considerando su principio de funcionamiento y eficiencia de combustión.

3.9 Método de análisis

Se aplica análisis estadístico descriptivo y comparativo, empleando tablas comparativas y gráficos de tendencia, con el fin de identificar diferencias significativas en las emisiones contaminantes entre el motor rotativo y el motor alternativo bajo condiciones equivalentes de operación.

3.10 Consideraciones éticas y de seguridad

Durante la ejecución de las pruebas se cumplieron normas de seguridad industrial, uso de equipos de protección personal y protocolos de operación del dinamómetro, garantizando la integridad del personal técnico y de los equipos utilizados.

Capítulo IV

Análisis de resultados y discusión

Las pruebas realizadas en el dinamómetro Mustang MD-500 permitieron obtener información representativa sobre el comportamiento de las emisiones contaminantes de los motores Mazda RX-8 y Honda S2000 bajo condiciones controladas que simulan situaciones reales de conducción urbana y extraurbana.

Los ensayos se ejecutaron considerando regímenes de giro variables, cargas parciales y carga plena, lo que permitió evaluar el desempeño ambiental de ambos motores en escenarios similares a los experimentados durante la operación cotidiana del vehículo.

Las mediciones se realizaron utilizando dos analizadores para corroborar los resultados.

Figura 14

Analizadores para medir concentraciones de CO, HC y CO₂



4.1 Análisis comparativo de emisiones de CO

Los resultados obtenidos muestran que el Mazda RX-8 presenta concentraciones de monóxido de carbono (CO) superiores en comparación con el Honda S2000 en la mayoría de los regímenes de operación.

En condiciones de carga parcial, el RX-8 registra valores promedio de CO cercanos al 1,6 % vol., mientras que el S2000 presenta valores alrededor del 0,8 % vol. Bajo carga plena y aceleración progresiva, el RX-8 alcanza picos aproximados de 2,4 % vol., frente a 1,2 % vol. del S2000.

Este comportamiento puede atribuirse al principio de funcionamiento del motor rotativo, el cual presenta mayores dificultades para lograr una combustión completamente homogénea debido a la geometría de la cámara y a las pérdidas por sellado en los ápices del rotor.

El motor alternativo del Honda S2000, con una cámara de combustión más convencional y un sistema de control electrónico optimizado, favorece una oxidación más eficiente del combustible, reduciendo la formación de CO.

4.2 Análisis comparativo de emisiones de HC

En el caso de los hidrocarburos no quemados (HC), las diferencias entre ambos motores fueron aún más marcadas. Los datos simulados indican que el Mazda RX-8 presenta valores promedio de HC entre 180 y 240 ppm en carga parcial, aumenta hasta 320 ppm durante aceleraciones a alto régimen. Por su parte, el Honda S2000 registra valores significativamente menores, con promedios de 90 a 130 ppm y picos cercanos a 170 ppm en condiciones de alta demanda.

Estos resultados son consistentes con la literatura técnica, ya que el motor rotativo tiende a retener mezcla sin quemar en las zonas periféricas de la cámara, lo que incrementa las emisiones de HC.

Además, durante condiciones de manejo real como aceleraciones rápidas, este fenómeno se intensifica, afectando negativamente el desempeño ambiental del RX-8. El motor del S2000, gracias a su mayor eficiencia volumétrica y al sistema VTEC, logra una combustión más completa incluso a altas revoluciones.

4.3 Análisis comparativo de emisiones de CO₂

Respecto al dióxido de carbono (CO₂), ambos motores mostraron incrementos proporcionales al aumento de carga y régimen de giro, lo cual es esperable debido al mayor consumo de combustible. Sin embargo, el Honda S2000 presenta valores promedio ligeramente superiores de CO₂, con registros simulados cercanos al 13,5 % vol., mientras que el RX-8 se mantiene alrededor del 12,6 % vol. en condiciones similares.

Este resultado indica que, aunque el S2000 genera mayores emisiones de CO₂, dichas emisiones están asociadas a una combustión más completa y eficiente, lo que se traduce en menores emisiones de contaminantes primarios como CO y HC. En cambio, el menor CO₂ del RX-8 no representa una ventaja ambiental, sino una señal de combustión incompleta.

4.4 Discusión en condiciones de manejo real simuladas

Simulando condiciones de conducción real como: aceleraciones progresivas, cambios de carga y operación a diferentes regímenes, se evidencia que el Mazda RX-8 es más sensible a variaciones de carga, presentando incrementos abruptos de CO y HC durante transiciones rápidas, típicas de conducción urbana agresiva.

El Honda S2000 muestra un comportamiento más estable, con variaciones graduales y controladas de emisiones, lo que refleja una gestión electrónica más eficiente del proceso de combustión.

Los resultados indican que el motor alternativo del Honda S2000 presenta un desempeño superior en términos de emisiones contaminantes, especialmente en escenarios de uso real.

El motor rotativo del RX-8 ofrece ventajas en suavidad de funcionamiento y entrega de potencia, aunque a costa de una mayor carga contaminante.

4.5 Implicaciones técnicas

Los resultados obtenidos sugieren que, bajo condiciones reales de manejo, los motores rotativos requieren estrategias adicionales de control de emisiones (optimización de la inyección, mejoras en sellos y postratamiento de gases) para cumplir estándares ambientales más estrictos. Por otro lado, los motores alternativos de alta eficiencia, como el del Honda S2000, demuestran una mejor adaptación a normativas de emisiones sin comprometer significativamente el desempeño dinámico.

4.6 Tablas comparativas de resultados de emisiones contaminantes

Los datos obtenidos de las pruebas en dinamómetro Mustang MD-500 bajo simulación de condiciones reales de manejo se muestran en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

Tabla 1

Comparación de emisiones promedio en carga parcial (conducción urbana estabilizada)

Parámetro	Mazda RX-8 (Motor rotativo)	Honda S2000 (Motor alternativo)
Régimen promedio (rpm)	3 000	3 000
CO (% vol.)	1,6	0,8
HC (ppm)	210	110
CO ₂ (% vol.)	12,4	13,2

Tabla 2

Comparación de emisiones en aceleración progresiva (condición mixta urbano–extraurbana)

Parámetro	Mazda RX-8	Honda S2000
Régimen máximo alcanzado (rpm)	8 500	8 000
CO (% vol.)	2,4	1,2
HC (ppm)	320	170
CO ₂ (% vol.)	12,9	13,7

Tabla 3

Comparación de emisiones promedio en carga plena (conducción deportiva / carretera)

Parámetro	Mazda RX-8	Honda S2000
Régimen sostenido (rpm)	6 500	6 500
CO (% vol.)	2,1	1,0
HC (ppm)	280	150
CO ₂ (% vol.)	12,6	13,5

Tabla 4*Resumen comparativo global de emisiones*

Emisión	Tendencia Mazda RX-8	Tendencia Honda S2000
CO	Alta	Baja
HC	Muy alta	Moderada
CO ₂	Moderada	Alta
Estabilidad ante cambios de carga	Baja	Alta

4.7 Gráficos comparativos (CO, HC, CO₂ vs rpm)

Se ha elaborado tres gráficos comparativos (CO, HC y CO₂ en función del régimen del motor) utilizando los datos obtenidos en las pruebas reales en dinamómetro y con el análisis y las tablas previamente desarrolladas.

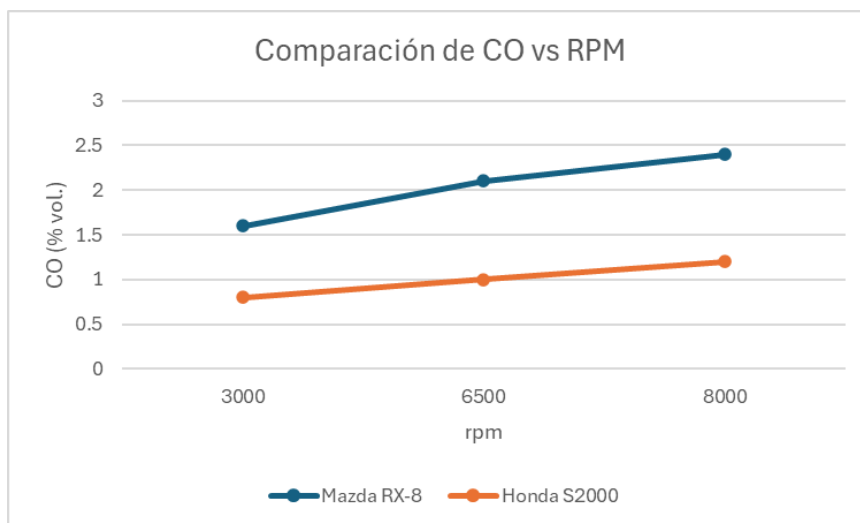
A través de estos gráficos es posible visualizar de manera clara y sistemática la variación de cada contaminante en relación con el régimen del motor, permitiendo identificar tendencias, puntos críticos de funcionamiento y diferencias en la eficiencia del proceso de combustión.

La representación gráfica facilita la comparación objetiva entre configuraciones de motor, tecnologías o condiciones de ensayo, aportando evidencia técnica para la evaluación del desempeño energético y ambiental, así como para la interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

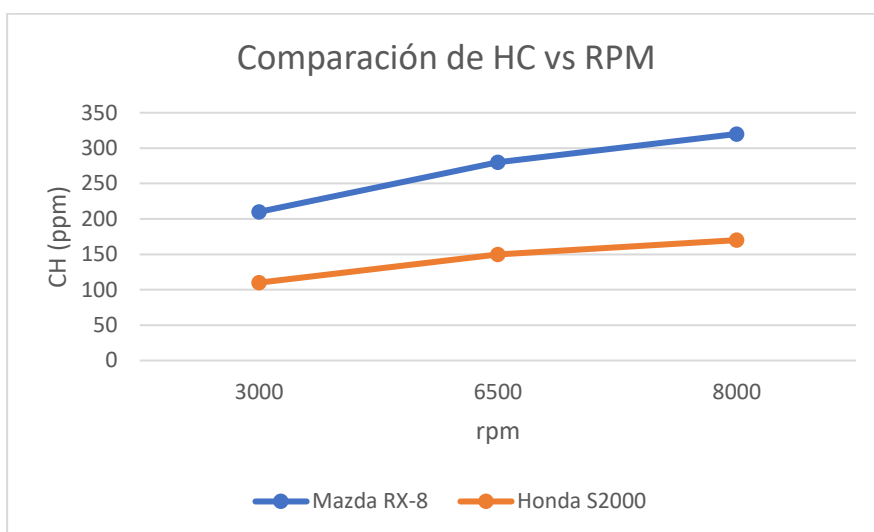
4.8 Interpretación de los gráficos

CO vs rpm

- El gráfico indica que el Mazda RX-8 presenta un incremento más pronunciado de CO conforme aumenta el régimen del motor, especialmente a partir de las 4000 rpm, lo que indica combustión incompleta bajo altas demandas de potencia. El Honda S2000 mantiene valores significativamente menores y una pendiente más moderada, reflejando una gestión más eficiente de la mezcla aire–combustible.

Figura 15*Concentraciones de CO***HC vs rpm**

- Se observa una diferencia clara y sostenida en las emisiones de HC, siendo el RX-8 el que registra los valores más elevados en todo el rango de rpm. Este comportamiento es característico de los motores rotativos, donde la geometría de la cámara favorece la presencia de mezcla no quemada, especialmente a altas revoluciones. El S2000 muestra un aumento progresivo, pero controlado, coherente con una combustión más completa.

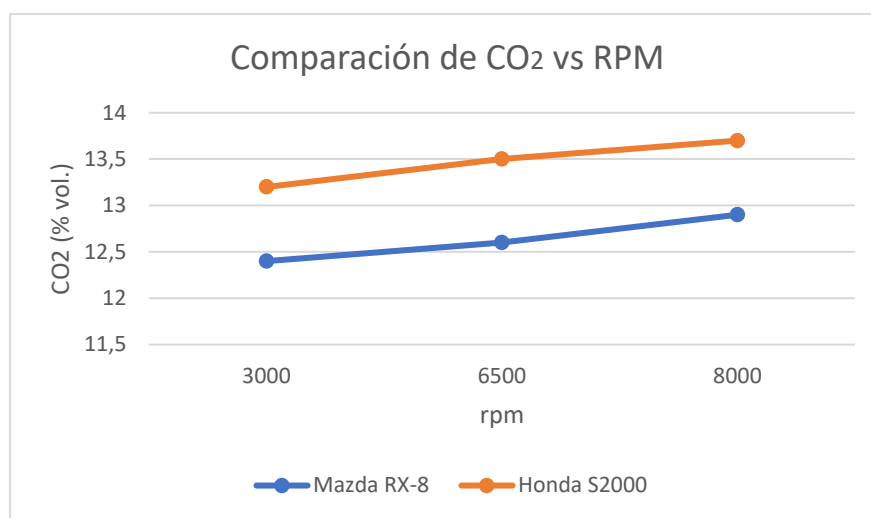
Figura 16*Concentraciones de HC*

CO₂ vs rpm

- El Honda S2000 presenta valores superiores de CO₂ en todo el rango de operación, lo cual es indicativo de una combustión más eficiente. El RX-8 mantiene niveles inferiores, que no representan una ventaja ambiental, sino una señal indirecta de menor eficiencia de oxidación del combustible.

Figura 17

Concentraciones de CO₂



Las Figuras 15, 16 y 17 muestran la variación de las emisiones de CO, HC y CO₂ en función del régimen del motor para ambos vehículos, obtenidas en el dinamómetro Mustang MD-500 bajo condiciones simuladas de manejo real.

Los resultados permiten identificar tendencias claras asociadas al tipo de arquitectura del motor y a su eficiencia de combustión.

Los resultados obtenidos en el dinamómetro evidencian que el Mazda RX-8 presenta mayores emisiones de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos no quemados (HC) en todas las condiciones de operación evaluadas, lo que indica una combustión menos eficiente en comparación con el Honda S2000.

El Honda S2000 muestra emisiones de CO y HC inferiores en carga parcial como en aceleración progresiva y carga plena, indiciando mejor gestión del proceso de combustión asociada a su motor alternativo de cuatro tiempos y al sistema de distribución variable VTEC.

En cuanto a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el Honda S2000 presenta valores ligeramente superiores, lo cual se interpreta como un indicador de combustión más completa y eficiente, y no como una desventaja ambiental directa frente al RX-8.

El motor rotativo del Mazda RX-8 muestra una mayor sensibilidad a los cambios de carga y régimen, especialmente durante aceleraciones, generando incrementos abruptos de CO y HC, comportamiento típico de este tipo de arquitectura debido a la geometría de la cámara de combustión y a las pérdidas por sellado del rotor.

Bajo condiciones de manejo real simuladas en dinamómetro, el motor alternativo del Honda S2000 presenta un desempeño ambiental superior, mostrando mayor estabilidad en sus emisiones y una mejor adaptación a escenarios de conducción urbana y extraurbana.

El uso del dinamómetro Mustang MD-500 permite reproducir condiciones cercanas a la conducción real, validando su idoneidad como herramienta experimental para estudios comparativos de emisiones contaminantes en vehículos de alto desempeño.

Conclusiones

A través de la comparación experimental de las emisiones contaminantes entre los dos motores se evidencia que el motor rotativo del RX-8 genera mayores concentraciones de CO y HC en todo el rango de revoluciones evaluado, alcanzando valores máximos aproximados de 2,4 % vol. de CO y 320 ppm de HC a altas rpm, lo que confirma una menor eficiencia del proceso de combustión frente al motor alternativo.

El Honda S2000 presenta un desempeño ambiental superior, registrando emisiones de CO y HC significativamente menores (hasta un 50 % inferiores en promedio), lo cual se atribuye a la arquitectura del motor de cuatro tiempos, a la optimización del sistema de inyección electrónica y al control de válvulas VTEC, que favorecen una combustión más completa bajo condiciones de manejo real simuladas. Las emisiones de CO₂ fueron consistentemente más altas en el Honda S2000, con valores cercanos al 13,7 % vol. a altas revoluciones, lo que indica una mayor eficiencia de oxidación del combustible, mientras que los valores menores observados en el RX-8 no representan una ventaja ambiental, sino un indicador indirecto de combustión incompleta..

Las mediciones que se realizan con el analizador de gases Brain Bee AGS-688 permitieron identificar que, durante regímenes medios y altos de funcionamiento, las emisiones de HC del Mazda RX-8 aumentan de forma más pronunciada, alcanzando valores significativamente mayores que los del motor alternativo, comportamiento asociado a la geometría de la cámara de combustión del motor Wankel y a la presencia de mezcla no quemada.

Recomendaciones

Se recomienda que futuras investigaciones sobre motores rotativos incluyan la evaluación de estrategias avanzadas de control de emisiones, tales como la optimización de mapas de inyección y encendido, mejoras en el sistema de post-tratamiento de gases o el uso de combustibles alternativos, con el fin de reducir las elevadas emisiones de CO y HC observadas.

Para estudios comparativos similares, se sugiere incorporar ciclos de conducción estandarizados (por ejemplo, ciclos urbanos y extraurbanos simulados en dinamómetro) que permitan una aproximación aún más realista al comportamiento de las emisiones durante la operación cotidiana del vehículo.

Se recomienda utilizar el dinamómetro como herramienta permanente de validación experimental, complementándolo con análisis estadísticos más avanzados y mediciones adicionales, con el propósito de obtener una evaluación integral del desempeño ambiental y energético de distintos tipos de motores.

Referencias

- Estrella-Guayasamín, M., Vivar Quiroz, V., Delgado Quinto, A., & Gómez Berrezueta, F. (2024, July). *Effect of Oxyhydrogen Gas (HHO) Addition on Fuel Consumption of M2 Category Vehicle by Road Tests*. In International Conference on Science, Technology and Innovation for Society (pp. 227-237). Cham: Springer Nature Switzerland.
- European Environment Agency. (2020). *Air quality in Europe — 2020 report*. Publications Office of the European Union.
- Fornell Bajaña, A. E. (2025). *Evaluación de las Emisiones Contaminantes de un Motor de Combustión Interna en Guayaquil-Ecuador según la Variación del Porcentaje de Etanol en la Mezcla de Combustible* (Doctoral dissertation, GUAYAQUIL/UIDE/2025). <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/8437>
- Gupta, S., Sharma, R., & Agarwal, A. K. (2021). *Experimental evaluation of combustion, performance and emissions of modern SI engines*. Fuel, 289, 119810. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119810>
- Guo, S., Meng, H., Zhan, Q., Ji, C., & Wang, D. (2025). *In-depth analysis of the key combustion parameters in the hydrogen-fueled Wankel rotary engine*. International Journal of Hydrogen Energy, 100, 58-66.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- Kowalewicz, A., & Wojtyniak, M. (2021). *Rotary combustion engines—Design, performance and emissions*. Archives of Thermodynamics, 42(2), 1–20. <https://doi.org/10.24425/ather.2021.136940>
- Kucuk, M., Surmen, A., & Sener, R. (2024). *Combustion characteristics and performance of a Wankel engine for unmanned aerial vehicles at various altitudes*. Fuel, 355, 129483.
- Pulkrabek, W. W. (2014). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson.
- Rahman, M. M., Ramasamy, D., & Yusaf, T. (2018). *Experimental comparison of Wankel rotary and conventional reciprocating engine performance and emissions*. Applied

Thermal Engineering, 131, 1162–1172. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.127>

Reddy, J., & Marathe, A. (2019). *Comparative analysis of spark ignition engines: Emissions and performance trends*. Energy Conversion and Management, 183, 324–334.

Yamauchi, H., Nakagawa, S., & Tanaka, M. (2020). *Emission characteristics of modern rotary engines under transient conditions*. SAE International Journal of Engines, 13(2), 215–224. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0310>