



**Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero  
Automotriz**

# **INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**Autor:** Andrés Salvador Heredia Díaz

**Tutor:** Ing. Fernando Gómez Berrezueta, M.Sc.

**Estimación de Emisiones Contaminantes en Condiciones  
Dinámicas de un Vehículo M1 con Instalación de un Sistema  
HHO Dry Electrolyzer**



**Certificado de Autoría**

Yo, Andrés Salvador Heredia Díaz, 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 la Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

---

Andrés Salvador Heredia Díaz

C.I: 0932605827

### **Aprobación del Tutor**

Yo, Fernando Gómez Berrezueta certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

---

Ing. Fernando Gómez Berrezueta, MSc.

C.I: 0103441846

Director de Proyecto

## **Dedicatoria**

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo permanente y por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis profesores, por enseñarme día a día a superar los retos de la vida.

A mis mejores amigos, por apoyarme en cada momento de mi vida y llenarla de grandes momentos memorables.

Y, finalmente, a todas aquellas personas que conocí en el camino, gracias a esas personas que aportaron en ver desde otro punto de vista las cosas.

*Andrés Heredia*

## **Agradecimiento**

Agradezco, en primer lugar, a Dios por brindarme la salud, sabiduría y paciencia para  
finalizar este trabajo.

Agradezco a mi tutor, el Ing. Fernando Gómez Berrezueta, por su guía durante todo  
este proyecto.

Agradezco a Natalia, por su apoyo incondicional desde el primer día que nos  
conocimos.

Agradezco a la Lcda. Mariuxi Muñoz, por enseñarme a perseverar durante todo el  
camino.

Agradezco a mis mejores amigos, Israel, Doménica y Justin, que gracias a ellos es  
posible este proyecto.

***Andrés Heredia***

## Índice General

Certificado de Autoría.....	iii
Aprobación del Tutor.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tablas.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
Capítulo I.....	1
Antecedentes.....	1
1.1.Tema de Investigación.....	1
1.2.Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema.....	1
1.2.1.Planteamiento del Problema.....	2
1.2.2.Formulación del Problema.....	3
1.2.3.Sistematización del Problema.....	3
1.3.Objetivos de la Investigación.....	3
1.3.1.Objetivo General.....	3
1.3.2.Objetivos Específicos.....	3
1.4.Justificación y Delimitación de la Investigación.....	4
1.4.1.Justificación Teórica.....	5
1.4.2.Justificación Metodológica.....	5

1.4.3. <i>Justificación Práctica</i> .....	5
1.4.4. <i>Delimitación Temporal</i> .....	6
1.4.5. <i>Delimitación Geográfica</i> .....	6
1.4.6. <i>Delimitación del Contenido</i> .....	6
Capítulo II.....	7
Marco Referencial.....	7
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	7
2.2. Marco Teórico.....	8
2.2.1. <i>Efecto Dinámico en las Emisiones</i> .....	8
2.2.2. <i>Principales Contaminantes Emitidos por Motores de Combustión Interna</i> .....	10
2.2.3. <i>Catalizadores de Tres Vías</i> .....	13
2.2.4. <i>Clasificación y Comportamiento de las Emisiones Vehiculares</i> .....	13
2.2.5. <i>Normativa Sobre Emisiones Vehiculares</i> .....	16
2.2.6. <i>Sistema HHO Dry Electrolyzer</i> .....	23
2.2.7. <i>Coeficiente Lambda</i> .....	25
2.3. Marco Conceptual.....	26
Capítulo III.....	31
Diseño Experimental para Evaluar Emisiones Dinámicas con Sistema HHO.....	31
3.1. Datos Técnicos del Vehículo M1.....	32
3.2. Descripción del Dispositivo HHO Dry Electrolyzer.....	33
3.3. Verificación Preoperacional e Instalación del Sistema HHO Dry Electrolyzer.....	34
3.4. Instalación y Operación del Analizador de Gases.....	36
3.5. Configuración de Escáner OBD2 MX900 y GPS para Adquisición de Datos.....	38

3.6.Pruebas Dinámicas y Proceso de Recolección de Datos en Ruta .....	39
Capítulo IV.....	40
Impacto del Sistema HHO en Desempeño y Emisiones Vehiculares.....	40
4.1.Análisis de Emisión y Combustión.....	41
4.1.1. <i>Selección de Variables Relevantes para el Análisis</i> .....	41
4.1.2. <i>Análisis de Resultados: Impacto del Sistema HHO en las Emisiones Vehiculares</i> .....	42
4.1.3. <i>Análisis e Interpretación de Resultados Promedio de Gases de Escape</i> .....	44
Conclusiones .....	47
Recomendaciones .....	48
Bibliografía .....	49

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Gases Contaminantes</i> .....	12
Figura 2 <i>Esquema del Generador HHO</i> .....	24
Figura 3 <i>Vehículo de Prueba</i> .....	32
Figura 4 <i>Dispositivo HHO</i> .....	33
Figura 5 <i>Prueba de Burbujeo del Sistema HHO</i> .....	34
Figura 6 <i>Instalación del Sistema HHO Dry Electrolyzer en el Vehículo de Prueba</i> .....	35
Figura 7 <i>Instalación Operativa del Analizador de Gases en el Vehículo de Prueba</i> .....	37
Figura 8 <i>Instalación de la Sonda del Analizador de Gases en el Tubo de Escape</i> .....	37
Figura 9 <i>Conexión del Escáner MX900 y GPS Logger</i> .....	38
Figura 10 <i>Ruta 1 Recorrido Urbano</i> .....	39

**Índice de Tablas**

Tabla 1 <i>Comparación de Parámetros de Emisión con y sin Sistema HHO</i> .....	43
---	----

## Resumen

El objetivo de este estudio es averiguar qué tipo de daño causaría un sistema de electrólisis seca HHO al medio ambiente si se instalara en un coche M1 y se condujera por ciudades concurridas. Este estudio investiga la necesidad de explorar tecnologías adicionales que puedan ayudar a reducir la cantidad de contaminantes liberados por los motores de combustión interna, especialmente cuando están en uso real, cuando los cambios en la carga y la velocidad tienen un gran efecto en el funcionamiento del motor. El enfoque principal del estudio es la necesidad de investigar estas tecnologías. Para alcanzar este objetivo, se realizaron pruebas dinámicas una y otra vez utilizando herramientas de diagnóstico de vehículos, analizadores de gases y geolocalización. Estas pruebas se realizaron tanto con el sistema HHO como sin él. Los resultados muestran que los niveles de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos no quemados (HC) disminuyeron considerablemente. Esto demuestra que el HHO podría ser una buena manera de reducir los efectos negativos que el transporte tiene en el medio ambiente. Esta investigación proporciona pruebas experimentales de que se pueden crear soluciones que sean tanto de bajo costo como duraderas, y que pueden ser utilizadas en países que aún no están muy desarrollados.

**Palabras Clave:** combustión interna, HHO, sistema de electrólisis en seco, situaciones dinámicas y contaminación ambiental.

### **Abstract**

The goal of this study is to find out what kind of damage an HHO Dry Electrolyzer system would do to the environment if it were put in an M1 car and driven about in busy cities. This study looks into the need to look into additional technologies that can help lower the amount of pollutants released by internal combustion engines, especially when they are really being used, when changes in load and speed have a big effect on how the engine works. The study's main focus is on the need to look into these technologies. To reach this goal, dynamic testing were done over and over again with the use of vehicle diagnostic tools, gas analyzers, and geolocation. These tests were done both with and without the HHO system. The results show that the levels of carbon monoxide (CO) and unburned hydrocarbons (HC) went down a lot. This proves that HHO could be a good way to lessen the bad effects that transportation has on the environment. This research gives experimental proof that solutions can be made that are both low-cost and long-lasting, and that can be used in countries that aren't very developed yet.

**Keywords:** Internal combustion, HHO, dry electrolyzer system, dynamic situations, and environmental contamination.

## Capítulo I

### Antecedentes

#### 1.1. Tema de Investigación

Estimación de emisiones contaminantes en condiciones dinámicas de un vehículo M1 con instalación de un sistema HHO Dry Electrolyzer.

#### 1.2. Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

El transporte terrestre basado en motores de combustión interna es uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental urbana. La quema de combustibles fósiles en vehículos genera gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>) y contaminantes nocivos como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos de hidrocarburos no quemados (HC), los cuales impactan negativamente el clima global y la salud pública. (Mousa et al., 2024; Rimkus et al., 2023)

Existe un interés creciente en tecnologías complementarias que permiten reducir las emisiones de los vehículos de gasolina, mejorando al mismo tiempo la eficiencia de combustible. Entre estas alternativas, el uso de gas oxihidrógeno (conocido como *HHO* por sus siglas en inglés) generado a bordo del vehículo se presenta como una solución potencial. El HHO es una mezcla de hidrógeno y oxígeno producida mediante electrólisis del agua; al introducirse en la admisión del motor en pequeñas proporciones, actúa como combustible complementario sin contenido de carbono, promoviendo una combustión más completa y limpia (Mousa et al., 2024).

Diversas investigaciones indican que la incorporación controlada de HHO en el aire de entrada del motor puede optimizar la eficiencia térmica, disminuir el consumo específico de combustible y reducir las emisiones de dióxido de carbono e hidrógeno (Rimkus et al., 2023; Almassri et al., 2023). No obstante, la mayoría de estos estudios fueron realizados bajo

condiciones de laboratorio, con cargas y velocidades reguladas, lo que restringe la extrapolación de sus hallazgos al uso auténtico del vehículo.

En consecuencia, aún no se ha explorado en profundidad el tema en la literatura referente al rendimiento del sistema HHO bajo condiciones dinámicas de condición, en las que la carga del motor, la aceleración y el frenado experimentan variaciones constantes. Esta investigación tiene como objetivo abordar dicha disparidad, proponiendo un análisis del comportamiento del vehículo en escenarios real de manejo, con el fin de estimar el impacto ambiental del sistema HHO.

### ***1.2.1. Planteamiento del Problema***

Actualmente, el parque de vehículos automotores constituye una de las principales fuentes de contaminación atmosférica, particularmente en zonas urbanas (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021). Aunque los MCI han experimentado una evolución en cuanto a eficiencia, continúan produciendo emisiones perjudiciales que impactan negativamente en la salud humana y el medio ambiente. En respuesta a este desafío, han emergido soluciones tecnológicas complementarias, como el sistema HHO Dry Electrolyzer. Este sistema facilita la generación de oxihidrógeno a través de la electrólisis en seco y su inyección en el motor para optimizar el proceso de combustión (Boretti, 2013).

Investigaciones anteriores han evidenciado que la incorporación de HHO puede disminuir considerablemente las emisiones de gases contaminantes en condiciones estacionarias (Yilmaz & Uludamar, 2017). No obstante, las condiciones dinámicas, tales como las fluctuaciones en la carga y la velocidad durante la conducción efectiva, inducen fluctuaciones en la eficiencia del motor y la combustión, lo cual podría modificar los beneficios del sistema. La ausencia de investigaciones que emulen condiciones auténticas de funcionamiento en pruebas dinámicas obstaculiza la evaluación precisa de la eficacia del sistema HHO en situaciones diarias de condición.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de examinar el comportamiento de un vehículo M1 equipado con un MCI y un sistema HHO Dry Electrolyzer bajo condiciones dinámicas, utilizando instrumentos para la estimación de emisiones contaminantes, con el objetivo de proporcionar información valiosa para la formulación de decisiones técnicas y ambientales.

### **1.2.2. Formulación del Problema**

¿En qué medida la instalación de un sistema HHO Dry Electrolyzer en un vehículo M1 reduce las emisiones contaminantes durante condiciones dinámicas de conducción?

### **1.2.3. Sistematización del Problema**

- ¿Qué efecto tiene en la reducción de CO y HC del vehículo con y sin el sistema HHO durante pruebas dinámicas?
- ¿Cómo influyen la velocidad y la carga del motor en la eficacia del sistema HHO para disminuir las emisiones?
- ¿Cuál es el potencial de aplicación de esta tecnología como medida de mitigación ambiental en vehículos particulares?

## **1.3. Objetivos de la Investigación**

### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar el impacto de un sistema HHO Dry Electrolyzer en las emisiones contaminantes de un vehículo M1 bajo condiciones dinámicas.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar las emisiones (CO y HC) de un vehículo M1 sin la instalación del sistema HHO Dry Electrolyzer.
- Realizar pruebas de funcionamiento del vehículo bajo diferentes condiciones de carga usando un sistema HHO Dry Electrolyzer.
- Comparar los resultados obtenidos con y sin el sistema HHO instalado, identificando variaciones significativas en las emisiones contaminantes.

#### **1.4. Justificación y Delimitación de la Investigación**

La contaminación medioambiental producida por vehículos propulsados por motores de combustión interna constituye uno de los retos ambientales más significativos del siglo XXI. Las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) desempeñan un papel significativo en la degradación de la calidad del aire, la alteración climática y la presencia de diversas enfermedades respiratorias en la población (World Health Organization [WHO], 2021).

En respuesta a este desafío, se han desarrollado diversas tecnologías con el objetivo de optimizar la eficiencia de la combustión y disminuir las emisiones, incluyendo los sistemas de electrólisis de agua para la generación de gas oxihidrógeno (HHO), denominados sistemas HHO. Los sistemas HHO han demostrado bajo condiciones controladas, la capacidad de optimizar el proceso de combustión interna mediante la introducción de una mezcla de hidrógeno y oxígeno. Esta intervención favorece una mayor eficiencia térmica del motor y contribuye a la reducción de emisiones contaminantes (Boretti, 2013).

No obstante, la mayoría de las investigaciones llevadas a cabo hasta la fecha se han centrado en condiciones estacionarias, lo que restringe la comprensión de su comportamiento bajo escenarios dinámicos, que son más representativos de la conducción efectiva. Por consiguiente, resulta fundamental investigar el desempeño de estos sistemas bajo condiciones dinámicas simuladas a través de dinamómetros de chasis o en rutas dinámicas. Estos instrumentos permiten examinar la fluctuación de las emisiones bajo diversas cargas y velocidades, emulando escenarios de conducción reales en un ambiente seguro y controlado (Silva et.al., 2019).

Esta investigación tiene como objetivo disminuir dicha brecha, aportando al desarrollo conceptual como a la aplicación práctica sobre las tecnologías auxiliares de combustión y su

implementación efectiva para la mitigación del impacto ambiental derivado del tránsito vehicular.

#### ***1.4.1. Justificación Teórica***

El presente estudio contribuye al entendimiento del empleo de aditivos gaseosos en la optimización de la combustión en motores de gasolina. El hidrógeno se caracteriza por su elevada velocidad de llama, su alta difusividad y su ausencia de carbono, factores que propician una combustión más acelerada y completa (Rimus et al., 2023).

Investigaciones como la realizada por Rimkus et al. (2023) y El-Kassaby et al. (2016) evidencian que la incorporación de pequeñas cantidades de HHO puede disminuir de manera significativa las emisiones de CO y HC, además de optimizar la eficiencia térmica del motor.

Este estudio tiene como objetivo fomentar el entendimiento sobre la influencia del HHO no solo en contextos de laboratorio, sino también en contextos reales, consolidando de esta manera el fundamento conceptual para estudios subsecuentes o implementaciones tecnológicas.

#### ***1.4.2. Justificación Metodológica***

La recolección de datos se lleva a cabo mediante rutas dinámicas auténticas, implementadas en un contexto urbano regulado. Se establecen trayectos repetitivos, efectuados tanto con y sin la implementación del sistema HHO, bajo condiciones análogas de carga motor. La determinación de emisiones se lleva a cabo mediante la utilización de un escáner automotriz, el cual facilita el seguimiento de parámetros operativos vinculados con la combustión, la combinación de aire-combustible y otros indicadores indirectos asociados con la emisión de contaminantes.

#### ***1.4.3. Justificación Práctica***

La investigación posee potencial para aportar beneficios a los propietarios de vehículos, técnicos en el sector automotriz y formuladores de políticas ambientales. Evidenciando que el

sistema HHO disminuye las emisiones y optimiza la eficiencia, se implementa como una estrategia alternativa de bajo costo para la mitigación de la contaminación vehicular, particularmente en países en vías de desarrollo (Almassri et al., 2023).

Adicionalmente, mediante la implementación de tecnologías accesibles y replicables, se posibilita la escalada de su implementación sin la necesidad de recurrir a sistemas híbridos o eléctricos de mayor costo. De este modo, se favorece la transición hacia una movilidad más sostenible sin la necesidad de reemplazar completamente los motores de combustión interna.

#### ***1.4.4. Delimitación Temporal***

El proceso de investigación se realizó entre abril – julio del 2025. Durante este tiempo se obtuvieron los datos por medio del escáner y analizados de gases para estimar los niveles de gases contaminantes producidos por MCI.

#### ***1.4.5. Delimitación Geográfica***

La investigación se llevó a cabo en un tramo de la ciudadela Villa Bonita de la Ciudad de Guayaquil, tomando esta como ruta para la obtención de datos recopilados por medio del escáner y analizador de gases.

#### ***1.4.6. Delimitación del Contenido***

Con el objetivo de preservar la factibilidad metodológica y asegurar la profundidad del análisis en el enfoque seleccionado, el estudio prescinde deliberadamente de otros temas y variables que, aunque son pertinentes en el estudio global de las emisiones vehiculares o de la tecnología HHO, superan los objetivos específicos de esta investigación.

## Capítulo II

### Marco Referencial

#### 2.1. Antecedentes de la Investigación

Uno de los principales objetivos de los fabricantes de automóviles y camiones en las últimas décadas ha sido descubrir cuántos gases contaminante emiten estos vehículos al aire. Esto se debe a que tiene un impacto en el cambio climático, la salud pública y el cumplimiento de las normas ambientales. Una problemática principal de las emisiones es saber cuánto afectan los motores de combustión interna al medio ambiente y esto se puede obtener al observar más de cerca los contaminantes como el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos no quemados (HC), y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Por otro lado, Ramírez, Bravo y Carvajal (2017) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de determinar los cambios en las emisiones producidas por un motor de gasolina cuando operaba a diversas altitudes y con diferentes tipos de combustible. La cantidad de monóxido de carbono e hidrocarburos que se produjeron a lo largo del experimento se vio muy afectada por varios factores, como la estequiometría de la mezcla y la presión del aire alrededor del experimento. Los resultados del experimento mostraron que esto era cierto. Los resultados de este tipo de investigación dejan muy claro lo crucial que es investigar las emisiones en ciertas áreas, como Ecuador, donde la tierra es significativamente diferente de otros lugares.

Diferentes autores han investigado la idea de añadir el sistema HHO a los motores de combustión interna como una alternativa de modificación externa como solución para reducir la contaminación de las emisiones producidas por la combustión de los vehículos. En el caso de González Gil et al. (2018), construyeron un sistema de celda seca para producir HHO. Descubrieron que mezclar este gas con combustible regular redujo considerablemente la cantidad de monóxido de carbono e hidrocarburos.

Estudios más recientes, como el de Estrella-Guayasamín et al. (2025), han encontrado resultados similares. Los investigadores llevaron a cabo pruebas dinámicas en un coche de la categoría M2 como parte de su investigación. Descubrieron que añadir HHO redujo el consumo de combustible en un promedio del 6% y mejoró el rendimiento térmico general.

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Efecto Dinámico en las Emisiones.**

Cuando se conduce un vehículo diariamente, sus emisiones no permanecen invariables; cambian mucho en función de cómo lo conduzcas. Esto incluye el hecho de que se puede acelerar, frenar, cambiar de velocidad, tener mucho peso, arrancar en frío, etcétera.

Cuando las cosas están en movimiento, tienden a tener picos de emisiones transitorias más altos que cuando están estáticas o estables. Por ejemplo, cuando un motor de gasolina acelera rápidamente, la mezcla suele enriquecerse. Se trata de un proceso de bucle abierto que mantiene la seguridad del motor y evita la explosión. Esto hace que las emisiones de CO y HC aumenten durante un breve periodo de tiempo debido a la combustión rica. Cuando se acelera rápidamente un motor diésel, se puede ver una gran cantidad de humo negro, también llamado partículas.

Esto se debe a que hay demasiado combustible durante un breve periodo de tiempo hasta que la compresión del turbo y la entrega de aire están sincronizadas. Pero algunos motores dejan de suministrar gasolina al vehículo cuando este desacelera y el conductor retira el pie del acelerador. Esto reduce en gran medida la cantidad de monóxido de carbono e hidrocarburos que se liberan. En determinadas situaciones, incluso evita que se liberen en el tubo de escape (Emissions Analytics, 2018).

El arranque en frío es una de las situaciones más críticas, ya que se produce cuando el motor está frío, la combustión no es tan buena y el catalizador aún no ha alcanzado su temperatura de funcionamiento. Esta situación deja escapar muchos hidrocarburos y monóxido

de carbono en los primeros minutos, lo que es mucho peor que cuando el motor está caliente. Mucha gente piensa que gran parte de la contaminación que se produce al conducir en ciudad ocurre cuando el motor se está calentando. Este efecto es peor en lugares muy concurridos donde el tráfico se detiene y arranca a menudo, ya que el motor puede enfriarse un poco cuando no está en movimiento.

Los ensayos de homologación también muestran la diferencia entre las cosas que cambian y las que se mantienen. En el pasado, algunas normas permitían realizar ensayos en condiciones prácticamente inmóviles. Por ejemplo, los motores diésel para vehículos pesados Euro III se homologaban tanto con un ciclo estacionario de 13 modos (ECE R-49) como con un ciclo transitorio opcional (ETC). En la actualidad, tanto los motores para vehículos pesados (Euro VI) como los turismos ligeros (Euro 6d) deben evaluarse en ciclos transitorios dinámicos que son similares a lo que ocurre cuando las personas conducen.

Esto se debe a que se descubrió que observar las emisiones justo después de que se hubieran calmado puede hacer que parezca que había mucha menos contaminación de la que realmente había. Por ejemplo, los coches diésel Euro 5 y 6 emitían cantidades diferentes de  $\text{NO}_x$  cuando circulaban por carretera que cuando se probaban en un laboratorio. En el ciclo estacionario NEDC, varios coches pudieron cumplir el límite de emisiones de  $\text{NO}_x$  de 80 mg/km.

Sin embargo, en la vida real emitían entre tres y cinco veces más (Transport & Environment, 2016). Esta diferencia llevó a la introducción de las pruebas de emisiones en conducción real (RDE). Cuando se llevan a cabo pruebas RDE, se conduce un coche con sistemas portátiles de monitorización de emisiones (PEMS) en vías públicas a velocidades aleatorias dentro de rangos específicos. El objetivo de estas pruebas es asegurarse de que las emisiones no superan los límites legales en más de un factor de cumplimiento específico. Por

ejemplo, al principio era 2,1 veces el límite y, posteriormente, 1,5 veces el límite de NO<sub>x</sub> en Euro 6d (Comisión Europea, 2017).

Por lo antes expuesto, se puede concluir que los coches contaminan más y es más difícil controlarlos cuando están en movimiento que cuando están estacionados. Los transitorios de carga y velocidad se utilizan para averiguar si los sistemas de control y postratamiento del motor pueden mantener bajas las emisiones. Entonces, para minimizar el efecto que los coches tienen en el medio ambiente mientras están en movimiento, necesitamos entender cómo funcionan las emisiones transitorias y encontrar formas efectivas de reducir estas emisiones.

Algunas de las estrategias en este grupo incluyen calibrar el motor para reducir la cantidad de enriquecimiento de la mezcla, optimizar el sistema de encendido y añadir tecnologías de postratamiento de vanguardia que puedan almacenar y liberar óxidos de manera controlada durante las fases de aceleración y frenado.

### ***2.2.2. Principales Contaminantes Emitidos por Motores de Combustión Interna***

Cuando los combustibles hidro carburados se queman en motores de combustión interna (MCI), liberan una serie de gases, así como dióxido de carbono y vapor de agua. También emiten gases nocivos. Flores et al. (2014) dicen que los principales contaminantes que se permiten a los motores de gasolina y diésel son:

Monóxido de carbono (CO); cuando algo se quema de manera incompleta, libera monóxido de carbono (CO), que es un gas venenoso. Cuando no hay suficiente oxígeno en la mezcla, se produce esto. Cuando los motores de gasolina aceleran rápidamente o reciben más combustible (como cuando el motor arranca en frío), la presión suele ser alta. El monóxido de carbono se adhiere a la hemoglobina en la sangre, lo que dificulta que el oxígeno llegue a las células.

Hidrocarburos no Quemados (HC); son combustibles o moléculas que no se queman completamente cuando se queman. Muchos de ellos son venenosos o causan cáncer, y ayudan

a formar ozono troposférico, que también se llama smog fotoquímico. Los ciclos de hidrógeno (HC) aparecen cuando las zonas de mezcla son demasiado pobres o ricas, o cuando la refrigeración es demasiado fuerte (pérdidas hacia la pared del cilindro), lo que impide que ocurra una oxidación completa.

Material Particulado (PM); está compuesto por pequeñas partículas sólidas o líquidas que existen en el aire. Estas partículas suelen ser hollín de carbono mezclado con gasolina y aceites que han quedado atrás. Los motores diésel producen una gran cantidad de material particulado porque queman combustible pesado de manera desigual, especialmente cuando aceleran. Esto hace que las áreas locales ricas crezcan. Las partículas finas, que son PM<sub>2.5</sub> y más pequeñas, pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar serios problemas tanto en el corazón como en los pulmones.

Los motores de gasolina de inyección indirecta tienen niveles muy bajos de material particulado (PM), sin embargo, los motores de inyección directa pueden generar más partículas cuando se les somete a cargas específicas.

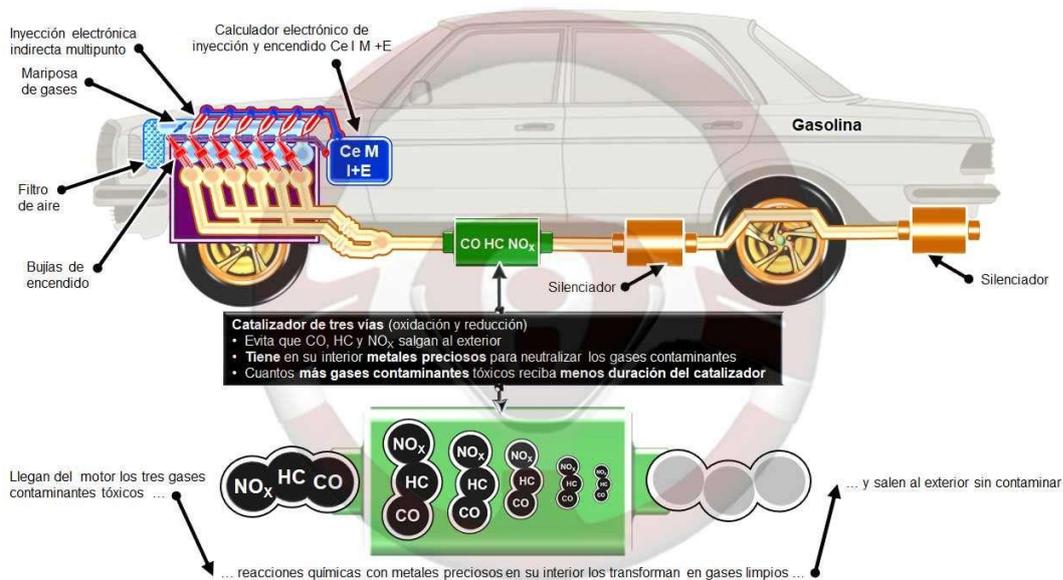
Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>); el azufre que se encuentra en los combustibles fósiles es la fuente SO<sub>2</sub>. A pesar de que los combustibles automotrices modernos contienen una cantidad negligible de azufre (como lo exige la ley), los motores a diésel más antiguos pueden haber incluido una cantidad significativa de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que luego se transformaría en sulfatos, responsables de la formación de partículas. El SO<sub>2</sub> es responsable de la lluvia ácida y de los problemas respiratorios.

Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>); es el gas de efecto invernadero más significativo que se produce cuando se quema carbono en combustible. A bajas concentraciones, no representa ningún riesgo para la salud. Como medida de cuán bien funciona el motor en general, la cantidad de dióxido de carbono que se libera es directamente proporcional a la cantidad de gasolina que se consume. Como resultado de su impacto en el cambio climático, las

regulaciones modernas también limitan las emisiones de CO<sub>2</sub> de manera indirecta al imponer límites en el consumo o la eficiencia.

**Figura 1**

*Gases Contaminantes*



Fuente: Tecnología Automóvil (s.f). *Sensores de contaminación en automóviles*

La figura 1 muestra los principales sensores responsables del monitoreo de gases contaminantes como CO, CO<sub>2</sub>, HC y O<sub>2</sub>, fundamentales en el análisis de emisiones. Estos sensores permiten controlar la relación aire-combustible y verificar la eficiencia del proceso de combustión en tiempo real.

El dióxido de carbono, el monóxido de carbono y los hidrocarburos son los contaminantes más comunes detectados en los motores de gasolina que utilizan encendido por chispa. Flores et al. (2014) dicen que esto se debe a que estos motores generalmente funcionan con mezclas que están muy cerca de la estequiométrica o un poco pobres, y el sistema de inyección se encarga de gestionar su mezcla.

De la misma manera, el dióxido de carbono es el gas más importante que liberan los motores diésel. Estos motores son conocidos por su baja mezcla y encendido por compresión.

Los óxidos de nitrógeno y las partículas son las emisiones más dañinas de la combustión del diésel porque utiliza demasiado aire.

El monóxido de carbono y los hidrocarburos son menos dañinos. Este tipo de emisiones tiene un gran efecto tanto en la salud de las personas como en el medio ambiente. (Flores et al., 2014): Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación del aire urbano mata a 1.3 millones de personas cada año, y los automóviles son una gran parte del problema. Uno de los principales objetivos de la ingeniería automotriz moderna es reducir los niveles de contaminantes nocivos.

### ***2.2.3. Catalizadores de Tres Vías***

Los catalizadores de tres vías, que eliminan el monóxido de carbono, los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno de los motores de gasolina; la recirculación de gases de escape (EGR), que reduce los NO<sub>x</sub>; los filtros de partículas diésel (DPF), que atrapan el hollín; la inyección electrónica precisa, que mejora la mezcla; y los sistemas de tratamiento de NO<sub>x</sub> en diésel (reducción catalítica selectiva SCR con urea, trampas de NO<sub>x</sub> y otras tecnologías similares) son todos ejemplos de tecnologías de control de emisiones que están integradas en los motores modernos.

Incluso con estas nuevas tecnologías, las emisiones pueden variar mucho dependiendo de cómo esté funcionando el motor, lo cual discutiremos con más detalle en los siguientes párrafos.

### ***2.2.4. Clasificación y Comportamiento de las Emisiones Vehiculares***

Cuando conducimos en condiciones cambiantes, podemos agrupar las emisiones de los vehículos en función de una serie de factores distintos. Dado que la forma de conducir un carro afecta a ambas formas de emisiones, una manera de distinguirlas es observar la diferencia entre las emisiones de escape y las emisiones evaporativas o fugitivas.

Emisiones de Escape Gaseosa y Particulada; cuando algo arde, libera una serie de sustancias nocivas, como monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, partículas y otros gases. Cuando un automóvil acelera, por ejemplo, los niveles de monóxido de carbono e hidrocarburos aumentan durante un breve periodo de tiempo. Este aumento temporal se produce al añadir más combustible a los motores de gasolina. También puede deberse a las partículas de los motores diésel cuando la mezcla es brevemente rica. Después de ese pico, las emisiones tienden a mantenerse más bajas mientras la velocidad sea la misma (hasta que se inicia el siguiente cambio de carga).

Para obtener estas emisiones efímeras, las personas suelen utilizar equipos que toman muestras a alta frecuencia para medir estos pulsos cambiantes. Para hacer buenos planes de gestión, es necesario saber cómo cambian las emisiones con el tiempo. Esto se debe a que la legislación se fija en la cantidad global de emisiones que se produce a lo largo de un ciclo completo (la integral de la masa que se emite).

Por ejemplo, en los ciclos de conducción urbana con tráfico de parada y arranque, gran parte de la masa global de contaminantes puede proceder de un breve periodo de aceleración rápida seguido de un arranque en frío. En cambio, mientras el coche va despacio por la autopista, las emisiones por kilómetro son mucho menores que cuando está casi parado.

Emisiones Evaporativas; se componen principalmente de vapores de gasolina, que son moléculas orgánicas volátiles. Estas emisiones no proceden de la combustión de la gasolina, sino de la evaporación del combustible y el aceite en el sistema de almacenamiento y suministro (depósito, bidón, conductos). Cuando los objetos se mueven y se calientan, existe la posibilidad de que las emisiones por evaporación aumenten. Por ejemplo, el calor sobrante en un automóvil aparcado puede hacer que el combustible del depósito se evapore. Esto se llama «efecto de remojo en caliente del gasóleo».

Cuando el sistema de control de evaporación (bidón de carbón activado) está lleno, se dejan salir los vapores procedentes de este proceso. El control del bidón deja salir los vapores a propósito en la admisión mientras conduces. Entonces, el motor los quema. En recorridos dinámicos muy cortos, como conducir por la ciudad durante unos minutos, puede que no haya suficiente purga, lo que podría dejar salir vapores al aire.

Para determinar si existen o no emisiones de evaporación, las normas de emisiones estipulan el tipo de pruebas que deben realizarse. Tanto la prueba de pérdida de calor diaria como la prueba de ralentí de 48 horas son ejemplos de pruebas que pueden utilizarse para medir los hidrocarburos (HC) en gramos o gramos. Las dos pruebas mencionadas se realizan con regularidad. Debe saber que estas dos pruebas no pueden utilizarse en lugar de la otra. La Comisión Europea (2017) afirma que estas pruebas se realizan junto con el uso de un dinamómetro para obtener una imagen precisa de las emisiones de escape.

Emisiones en Condiciones Especiales; cuando el filtro o el convertidor se están regenerando, o cuando algo se está desgastando, las emisiones son más perceptibles. En los coches diésel modernos, el filtro de partículas (DPF) se limpia y restaura periódicamente. Para ello, se eleva la temperatura del tubo de escape para que el hollín pueda quemarse. El filtro de partículas (DPF) de los coches diésel actuales se somete periódicamente a un proceso denominado regeneración. Para ello, se eleva la temperatura de los gases de escape para que el hollín pueda quemarse. No es demasiado raro que ocurra algo así cuando conduces por la autopista.

Si el proceso de combustión no ha terminado, es probable que se produzcan subidas a corto plazo de CO. Esto se debe a que el combustible se inyecta después de la combustión para generar calor, así como la descarga de partículas que se han acumulado a lo largo de esta dinámica. Esto se debe a que el combustible se añade después de que el fuego se haya consumido para crear calor.

Algunos ejemplos de emisiones por desgaste son el polvo de los frenos, el desgaste de los neumáticos y el desgaste del embrague. «Emisiones contaminantes» es otro nombre que se utiliza a veces para hablar de estas emisiones. Acelerar y frenar demasiado también empeora estas emisiones contaminantes, lo que agrava el problema. Aunque ahora mismo no están obligados a cumplir ninguna norma, los expertos creen que representan una amplia parte de las partículas que predominan en los lugares con mucha gente.

Un enfoque adicional de pensar en los muchos tipos de emisiones dinámicas es dividir las en dos categorías: emisiones instantáneas y emisiones acumulativas. La cantidad de emisiones que se producen en un momento específico, como gramos por segundo o partes por millón en el gas de escape cada segundo del ciclo, se denominan emisiones instantáneas.

Se obtienen las emisiones totales a lo largo de un ciclo cuando se suman estos índices en un periodo de tiempo o distancia específicos. Hay dos tipos de emisiones: emisiones totales y emisiones acumuladas. Puedes controlar estas emisiones en gramos por cada kilómetro o prueba. La tasa inmediata podría alterarse rápidamente si los objetos están en movimiento, pero las directrices se basan en la cantidad total que se da en una carrera típica. (Zaccardi et al., 2015)

### ***2.2.5. Normativa Sobre Emisiones Vehiculares***

En Ecuador y otras partes del mundo, hay reglas que limitan la cantidad de contaminación que pueden generar los coches y camiones. Ecuador ahora tiene leyes sobre la contaminación que producen los coches y camiones de gasolina.

Las principales normas que rigen cómo los coches de gasolina en Ecuador controlan sus emisiones son el "Control de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres" de la Regulación Técnica Ecuatoriana RTE INEN 017 y las normas técnicas que la acompañan. La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204 se encarga de establecer los niveles máximos permitidos (LMP) de emisiones para automóviles y camiones de gasolina. Esta norma ha estado

en vigor desde 2002 (INEN, 2002), y aunque ha sido modificada (la segunda revisión se realizó en 2016), las ideas principales detrás de ella no han cambiado mucho, quedando desactualizada en comparación con los estándares modernos.

Contaminantes regulados; la normativa ecuatoriana fija LMP para los principales contaminantes locales emitidos por motores de ciclo Otto (gasolina): monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC). Históricamente, para motores a gasolina no se establecieron límites de material particulado (PM). Dado que, en condiciones estequiométricas, los vehículos a gasolina tradicionalmente emitían muy poca masa de partículas.

El control de PM y número de partículas se introduce en estándares internacionales solo a partir de motores de inyección directa de gasolina, Euro 5/6. Tampoco se impone un límite directo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la normativa ecuatoriana de emisiones vehiculares, ya que CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero regulado usualmente mediante estándares de eficiencia o metas de reducción separadas (p. ej., normas de eficiencia energética o etiquetado) y no como “emisión contaminante” local [europarl.europa.eu](http://europarl.europa.eu). No obstante, CO<sub>2</sub> se mide en ensayos de homologación y su reducción es un objetivo global por su contribución al cambio climático [europarl.europa.eu](http://europarl.europa.eu).

Límites en Revisión Técnica Vehicular (vehículos en circulación); para los vehículos a gasolina en uso, la autoridad nacional (Agencia Nacional de Tránsito, ANT) exige que durante la revisión técnica vehicular anual se verifique que las emisiones no sobrepasen los límites de NTE INEN 2204. La prueba aplicable es estática (ralentí o marcha mínima, a motor caliente). Los valores límite de CO y HC en ralentí dependen del año de fabricación del vehículo y de la altitud de la localidad de la prueba, según lo establecido en la NTE INEN 2204.

En general, los vehículos más nuevos tienen límites más estrictos ya que, para modelos año 2000 en adelante se permite hasta 1,0 % en volumen de CO y 200 ppm de HC (hidrocarburos) al ralentí. En cambio, vehículos más antiguos tienen umbrales mayores, un

vehículo de los años 1990 puede emitir hasta 3,5–4,5 % CO y 650–750 ppm HC, y uno previo a 1990 hasta 5,5–6,5 % CO y 1000–1200 ppm HC, con el límite más alto aplicable a zonas de menor altitud debido a la menor eficiencia de combustión en altura. Estos valores reflejan la tecnología de control de emisiones disponible en cada época (introducción de catalizadores de tres vías desde los 90, etc.).

Límites para Homologación (vehículos nuevos a gasolina); Ecuador adoptó a partir del año 2000 exigencias para vehículos nuevos equivalentes a estándares internacionales de finales de los 90. La NTE INEN 2204 (y el RTE INEN 017) requieren que toda fuente móvil con motor a gasolina que ingrese al país (importación o ensamblaje local) cumpla con límites máximos en pruebas dinámicas estandarizadas [pudeleco.com](http://pudeleco.com). En la práctica, se aceptan dos metodologías de ensayo de homologación: el ciclo FTP-75 (Federal Test Procedure) de EE.UU. o el ciclo ECE 15 + EUDC europeo (NEDC – Nuevo Ciclo de Conducción Europeo), realizados a nivel del mar.

No se establecen límites de PM para motores a gasolina en estas pruebas, ya que Euro 3 no los contemplaba (los motores a gasolina carburados o inyección indirecta prácticamente no emitían material particulado apreciable). Asimismo, se controla las emisiones evaporativas en el ensayo SHED (pérdidas de hidrocarburos por evaporación de combustible), con un límite de 2,0 g/test para vehículos ligeros según la norma [ecuadorianapudeleco.com](http://ecuadorianapudeleco.com).

El marco legal vigente en Ecuador en materia de emisiones de vehículos a gasolina está delineado por la NTE INEN 2204:2002 (respaldada por el RTE INEN 017), que impone límites para CO y HC acordes a estándares internacionales de hace un par de décadas. Estudios técnicos locales han señalado que estos límites son obsoletos en comparación con las normativas modernas y permiten niveles de contaminación equivalentes a los vehículos europeos de hace 20 años.

Esto evidencia la necesidad de actualizar el marco normativo nacional, tanto para incorporar estándares más estrictos (por ejemplo, Euro 5 o Euro 6) como para considerar las condiciones específicas del país (calidad de combustibles, altitud, parque automotor envejecido, etc.). Cabe destacar que el Código Orgánico del Ambiente (2017) faculta al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) como Autoridad Ambiental para emitir normas y mecanismos de control de la contaminación atmosférica, en coordinación con las entidades competentes sectoriales.

Sin embargo, hasta la fecha no se han dispuesto nuevos límites más rigurosos para emisiones vehiculares; el país continúa operando bajo la norma INEN 2204 (equivalente a Euro 3), complementada por la inspección técnica vehicular anual para control de emisiones estáticas.

Para poner en perspectiva las regulaciones de Ecuador, es esencial discutir los estándares de emisiones de automóviles más conocidos a nivel mundial, que han sido utilizados como referencias técnicas en varios países. Las normas de la EPA son aquellas establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, mientras que las normas Euro son las establecidas por la Unión Europea.

A pesar de que ambos conjuntos de regulaciones gestionan contaminantes como el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y las partículas (este último que se acaba de añadir para los motores de gasolina), lo hacen de diferentes maneras y con distintos grados de rigurosidad. Para los vehículos ligeros de gasolina, a continuación, se presenta una descripción técnica de las etapas Euro 1 a Euro 6, así como de los estándares equivalentes en EE. UU. (Tier 1 a Tier 3 de la EPA), con un énfasis particular en las restricciones de emisiones que impone cada etapa.

A fin de contextualizar la normativa ecuatoriana, es importante resumir los estándares internacionales de emisiones vehiculares más reconocidos, que han servido de referencia

técnica en diferentes países. Las normas Euro de la Unión Europea y las normas EPA de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Ambos conjuntos regulan contaminantes como CO, HC, y PM (este último introducido más recientemente para motores de gasolina), aunque difieren en sus enfoques de implementación y severidad. Se presenta un resumen técnico de las etapas Euro 1 a Euro 6 para vehículos ligeros a gasolina, y de las normas equivalentes en EE. UU. (Tier 1 a Tier 3 de la EPA), enfatizando sus límites de emisión.

Las normas Euro representan un avance en la cantidad máxima de contaminación que los coches en la Unión Europea pueden emitir. Cuando estas regulaciones se implementen, tendrán un gran impacto tanto en la tecnología de los automóviles como en la salud del medio ambiente. Estas normas siempre han tenido como objetivo reducir las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), material particulado (PM) y, más recientemente, el número de partículas (PN), especialmente en motores de gasolina que utilizan inyección directa. Comenzaron en 1992 con la introducción del Euro 1.

En 1992, Euro 1 fue el primero en imponer límites a los automóviles de pasajeros con motor de gasolina. Una de las restricciones era que los motores solo podían funcionar con combustible que no contuviera plomo, y otra era que se debían usar convertidores catalíticos de tres vías. Aunque los límites se mantuvieron muy altos (hasta 2.72 g/km de CO y 0.97 g/km de HC+NO<sub>x</sub>), pudieron establecer el marco para el control.

- Euro 2 (1996) hizo estas normas un poco más estrictas al exigir 2.2 g/km de monóxido de carbono y 0.5 g/km de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Esto llevó al uso de inyección electrónica y catalizadores más efectivos, pero no hizo una distinción entre NO<sub>x</sub> y otros contaminantes.
- Euro 3 (2000) fue un gran avance en la tecnología ya que estableció límites para los hidrocarburos (HC) ( $\leq 0.20$  g/km). Esta separación necesitó mejoras en la gestión

del motor, diagnósticos a bordo (OBD) y control de encendido. Este nivel es casi el mismo que el que ya está en vigor en Ecuador.

- Euro 4 (2005), los límites se redujeron aún más a  $CO < 1.0 \text{ g/km}$ ,  $HC \leq 0.10 \text{ g/km}$ . Esto significaba que se tenían que usar mejores catalizadores y mejorar los procedimientos de combustión. Todavía no era práctico restringir el PM para el gas.
- Euro 5 (2009/2010) estableció por primera vez un límite de 0.005 gramos de material particulado (PM) por kilómetro. Después de eso, los motores de inyección directa de gasolina solo podían tener  $6.0 \times 10^{11}$  partículas (PN) por kilómetro. Este límite requería el uso de filtros de partículas (GPF) o ajustes en la mezcla para reducir la cantidad de hollín creado.
- Euro 6 (2014–presente) mantiene los mismos límites de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno que Euro 5, pero hace la exigencia más estricta al añadir reglas adicionales de pruebas.
- El Procedimiento de Prueba de Vehículos Ligeros Mundialmente Armonizado (WLTP) y las Emisiones de Conducción Real (RDE) son dos de estos protocolos que aseguran que los resultados sean correctos al conducir en el mundo real. Además, los límites de PM y PN se han alineado con los de diésel. Esto se debe a que los motores GDI podrían emitir contaminantes si no se gestionan adecuadamente.

Aunque los estándares Euro se centran en contaminantes locales, la Unión Europea también impone metas de emisiones de  $CO_2$  a nivel de flota (por ejemplo, 95 g/km desde 2021 y 55 g/km proyectados para 2030), como parte de su estrategia climática

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos ha establecido un sistema de niveles de reglas de contaminación para los automóviles que se volverá más estricto con el tiempo. Estas

restricciones se aplican a los coches que funcionan con combustible ligero. Estas reglas no solo establecen estándares para la calidad del combustible, sino que también buscan reducir la liberación de sustancias nocivas como el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos no metánicos (NMOG) y las partículas (PM).

El primer requisito federal completo que entró en vigor cuando se aprobó la Ley de Aire Limpio en 1990 se llamó Nivel 1. Estuvo en vigor desde 1994 hasta 2003. Estableció limitaciones basadas en el peso para los vehículos de pasajeros durante el ciclo FTP-75. Estas restricciones se implementaron.

La norma de nivel 2 (2004–2014) fue un gran avance porque eliminó la segmentación basada en el peso y utilizó "bins" (categorías de certificación) para agrupar las cosas en su lugar. También tenía un límite promedio de flota para NMOG + NO<sub>x</sub> de 0.07 g/mi, que es alrededor de 0.043 g/km. La mayoría de los coches que pasaron el Bin 5 tenían niveles de NO<sub>x</sub> por debajo de 0.03 g/km, niveles de CO por debajo de 2.11 g/km y niveles de PM por debajo de 0.0093 g/km.

Durante esta fase, el nivel de azufre de la gasolina tuvo que reducirse a entre 30 partes por millón (ppm) y 30 partes por millón (ppm). Esto era necesario para mantener el sistema catalítico funcionando bien. Con esta extensión, el sistema de control de emisiones tenía que durar 193,000 kilómetros más que antes.

Actualmente, el Nivel 3 (2017–presente) es el más difícil de todos los requisitos. El límite de PM es menos de 3 mg/mi (aproximadamente 1.9 mg/km), lo cual es más estricto que el estándar Euro 6. El promedio de la flota de NMOG + NO<sub>x</sub> debe ser más de 0.030 g/mi (aproximadamente 0.018 g/km). También utiliza un combustible que tiene un promedio de 10 partes por millón de azufre, lo que le permite durar 241,000 kilómetros, o 15 años. También tiene pruebas de emisiones evaporativas y un sistema OBD completo, que son similares a las normas en Europa.

Aunque el Nivel 3 adopta un enfoque diferente, se considera que es al menos tan estricto como el Euro 6 en lo que respecta a PM. El Nivel 3 se basa en promedios de flota y clasificación por "bins", mientras que el Euro 6 tiene límites específicos para cada vehículo. Ambos sistemas coinciden en que se necesitan combustibles de ultra-bajo contenido de azufre para asegurar que el control de emisiones funcione correctamente.

Los cambios en las reglas de la EPA han llevado a la creación de tecnologías que son tanto más limpias como más duraderas. Esto ha reducido enormemente el impacto ambiental de los automóviles de gasolina. Muchos países, especialmente los de América Latina, están utilizando su implementación gradual como modelo mientras trabajan para avanzar hacia normas más modernas y mejores para el medio ambiente.

#### **2.2.6. Sistema HHO Dry Electrolyzer**

El sistema HHO (Brown's Gas) descompone el agua en oxihidrógeno, que es una mezcla de hidrógeno y oxígeno. Después, esta mezcla se introduce en la admisión de un motor de combustión interna para ayudar a que el combustible principal, que puede ser gasolina o gasóleo, se queme mejor.

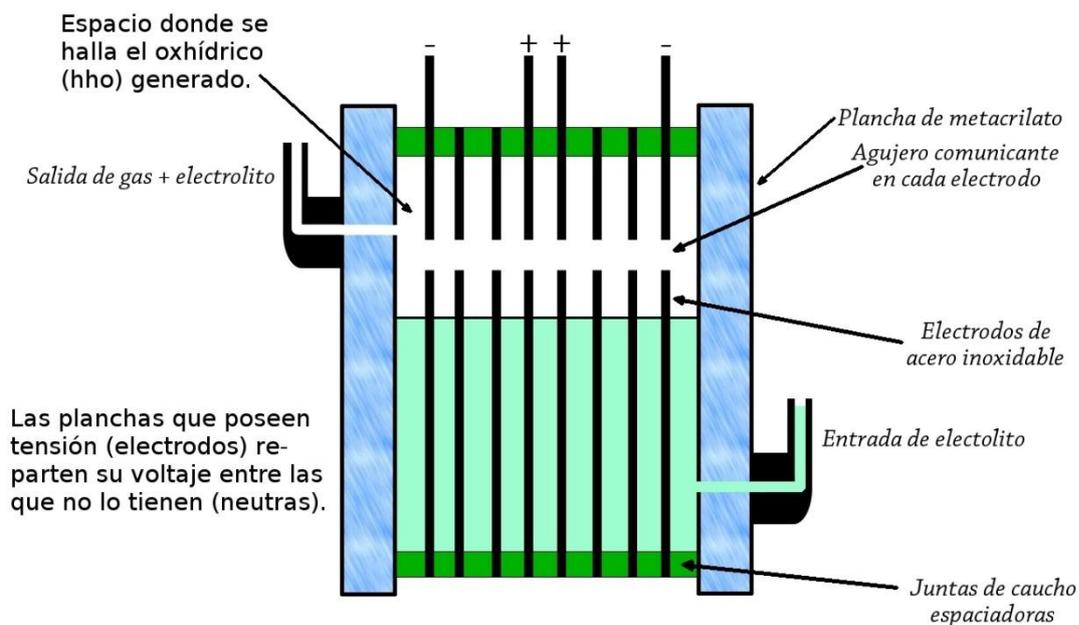
Un electrolizador HHO de «pila seca» es diferente de otros tipos porque las placas de electrólisis, que suelen ser de acero inoxidable, no están totalmente sumergidas en el agua dentro del dispositivo. En su lugar, unas juntas las mantienen separadas dentro de un pequeño módulo. El agua fluye por los espacios entre las placas, lo que reduce la cantidad de electrolito libre y las pérdidas que se producen cuando el agua se filtra o evapora. La pila seca es más pequeña que la pila húmeda estándar, ya que las placas sólo están sumergidas en un depósito de agua. También es menos probable que se produzcan fugas de agua.

Un sistema HHO suele tener una célula electrolítica con varias placas, un depósito de agua con electrolito (como hidróxido de potasio como catalizador), un burbujeador que recoge el arrastre de electrolito y conexiones al sistema eléctrico de 12 V del vehículo a través de un

relé o controlador que activa la electrólisis cuando el motor está en marcha. Cuando se electróliza el agua ( $H_2O$ ), ésta se descompone en  $H_2$  y  $O_2$ . La mezcla que sale se llama gas oxihidrógeno, o HHO. La mayoría de las veces, este gas entra por la admisión y se mezcla con el aire que se utiliza para la combustión.

**Figura 2**

*Esquema del Generador HHO*



Fuente: Hidrógeno como Solución. (s.f.). [Imagen]

El generador HHO representado en la figura 2, corresponde a un diseño de celda seca, ya que mantiene el electrolito confinado en los espacios de las placas en lugar de sumergir todo el conjunto en la solución líquida, mejorando la eficiencia del sistema al controlar mejor el flujo de corriente y reducir fugas o cortocircuitos.

La idea de añadir HHO al motor es que el hidrógeno que produce puede utilizarse como una fuente de combustible adicional que se quema rápidamente y no necesita mucha energía para empezar a arder. Musmar y Al-Rousan (2011) afirman que este método podría acelerar y terminar la combustión de la gasolina o el gasóleo en los cilindros. Debería producir menos contaminantes (como CO y HC que no se queman) y hacer que el motor funcione mejor (Al-

Rousan, 2010). Además, el oxígeno extra en el HHO podría proporcionar a la mezcla de aire y combustible un poco más de oxidante, lo que ayuda a que los hidrocarburos se quemen por completo.

Un proyecto de prueba con autobuses de pasajeros mostró que el uso de sistemas de HHO ahorró 907 galones de combustible diésel en una distancia de 9.000 km. También redujo las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 16%, las de CO en un 12%, y las de SO<sub>2</sub> en un 37%, en comparación con autobuses de diseño similar que no incluían HHO (Universidad Galileo, 2025).

El balance energético neto es crucial porque el sistema HHO obtiene su energía del alternador y las baterías del vehículo. El alternador debería consumir más electricidad, pero las mejoras en la eficacia de la combustión y las pérdidas deberían compensarlo. La investigación muestra que los efectos de la carga del motor son muy pequeños.

Por ejemplo, Díaz et al. (2018) demostraron que el HHO hacía que el motor fuera menos eficiente mecánicamente en un 1%, ya que la célula necesitaba más potencia. El consumo particular de combustible fue un 7,3% mayor que anteriormente, sin embargo, esto se debió a que el proceso de combustión fue más eficiente. Un buen sistema de Célula Seca de HHO contiene un circuito de electrólisis que mantiene el HHO fluyendo, no importa lo grande que sea el motor o el peso que lleve.

Hay características adicionales de seguridad como fusibles y válvulas antirretorno, para evitar que la corriente suba demasiado o prevenir la propagación de llamas hacia el sistema. Para conseguir una combustión mejorada, es vital dar al coche una cantidad controlada de oxihidrógeno sin hacer que sea menos fiable.

### **2.2.7. Coeficiente Lambda**

De acuerdo con Warguła, el coeficiente lambda es un parámetro crítico para evaluar la relación entre el aire y el combustible en los motores de combustión interna, especialmente cuando se analiza la eficiencia del proceso de combustión. Su valor se calcula dividiendo la

relación aire combustible real entre la relación estequiométrica ideal (14.7:1 para gasolina). Un valor de  $\lambda=1$  indica una mezcla estequiométrica, mientras que  $\lambda<1$  implica una mezcla más rica (más combustible del necesario) y  $\lambda>1$  indica una mezcla pobre (exceso de aire) (Warguła et al., 2024).

Según Warguła et al. (2024), el monitoreo del coeficiente lambda permite no solo optimizar el consumo de combustible, sino también reducir de manera significativa las emisiones contaminantes, en especial el CO y HC. En sus investigaciones sobre motores de encendido por chispa, los autores demostraron que pequeñas desviaciones en el valor lambda puede afectar notablemente el rendimiento del motor, la temperatura de combustión y la durabilidad de los componentes internos.

Además resalta que una mezcla pobre ( $\lambda>1$ ) puede mejorar la eficiencia térmica y reducir el consumo específico de combustible, pero también puede generar combustión incompleta sino se controla adecuadamente.

### **2.3. Marco Conceptual**

Emisiones Contaminantes Vehiculares; cuando los combustibles fósiles (como la gasolina) se queman en los motores Otto, liberan contaminantes al aire. Los principales productos químicos nocivos que salen del escape son el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no quemados (HC). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) también es un gas de efecto invernadero que se libera al aire.

Cuando la mezcla de aire y combustible no se quema completamente o no se gestiona adecuadamente, se crea más monóxido de carbono e hidrocarburos (una mezcla densa) o óxidos de nitrógeno (a altas temperaturas). Esto lleva a más emisiones. La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204:2002 establece los niveles máximos de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos que pueden encontrarse en los automóviles a gasolina. La mayoría de los coches actuales deberían poder cumplir con estos estándares con sus configuraciones de

fábrica. Las emisiones de los vehículos empeoran el aire en ciudades como Quito y Guayaquil, lo cual es perjudicial tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas (OMS, 2005).

Condiciones Dinámicas de Conducción; las condiciones de conducción dinámica incluyen cambios en la velocidad, aceleraciones y paradas constantes, el peso del vehículo, el terreno y el clima (temperatura y altitud). Estas condiciones constituyen los patrones reales de conducción, teniendo un efecto directo en la cantidad de contaminación que produce el coche.

Por ejemplo, las aceleraciones fuertes o las cargas pesadas hacen que el motor funcione con una mezcla rica, lo que significa que quema el combustible de manera menos eficiente y produce más monóxido de carbono e hidrocarburos. Las altas temperaturas y las cargas más grandes en el motor, por otro lado, hacen que los óxidos de nitrógeno se formen más rápidamente.

Ciudades como Quito en Ecuador están a una mayor altitud, lo que significa que el aire es menos denso. Esto hace que la combustión sea más difícil, lo que a su vez empeora las emisiones. Los ciclos de conducción dinámica se utilizan para medir emisiones representativas porque las condiciones cambian todo el tiempo. En la vida real, las emisiones medidas mientras se conduce (conducción dinámica) son a menudo más altas que las reportadas durante las pruebas estáticas.

Vehículo Categoría M1; son los vehículos automotores de uso particular para pasajeros con no más de ocho plazas excluyendo el conductor. Esto incluye la mayoría de los automóviles tipo sedán, hatchback y SUV livianos. Según la Agencia Nacional de Tránsito, los autos M1 deben cumplir con inspecciones periódicas (por ejemplo, la inspección técnica vehicular EI No.10) que verifican componentes de seguridad y emisiones, incluyendo sistemas OBD a partir de modelos recientes.

En general, los M1 incluyen autos familiares y compactos (peso bruto vehicular típicamente hasta 3 500 kg) usados en ciudad y carretera. En Ecuador, estos vehículos están obligados a respetar la normativa ambiental (NTE INEN 2204) y normas de tránsito; asimismo, requieren el certificado de homologación de la ANT que certifica el cumplimiento de las disposiciones técnicas nacionales.

Sistema HHO; es un equipo que se añade al sistema de admisión del vehículo desde el exterior. Funciona introduciendo una mezcla de hidrógeno y oxígeno que proviene de la descomposición del agua mediante electrólisis. Un electrólito produce esta mezcla, que también se llama gas de Brown u oxihidrógeno. Esta máquina transforma el agua en hidrógeno y oxígeno, que luego se recombinan durante la combustión. Esta máquina descompone el agua en hidrógeno y oxígeno, que luego se vuelven a unir cuando arden.

González Gil et al. (2018) señalan que el HHO “permite la disminución de gases tóxicos al ambiente y el ahorro de combustibles hidrocarbonados en motores de combustión interna” debido a sus propiedades moleculares [revistas.uis.edu.co](http://revistas.uis.edu.co). En la práctica, se afirma que la adición de HHO mejora la llama de combustión, optimiza la mezcla aire-combustible y potencialmente reduce emisiones de CO y HC, aumentando la eficiencia térmica del motor. No obstante, la efectividad real de estos sistemas es discutida en la bibliografía, pero su concepto técnico consiste en generar hidrógeno-oxígeno in situ para suplementar la combustible gasolina.

Dry Electrolyzer; hay dos tipos principales de electrolizadores utilizados en sistemas HHO: electrolizadores de celda húmeda y electrolizadores de celda seca. Los electrolizadores que están sumergidos en entornos líquidos funcionan de manera diferente a los electrolizadores de celda seca, que utilizan placas que han absorbido electrolito. En otras palabras, el electrolito llena los espacios entre las placas, lo que permite que la electrólisis ocurra sin necesidad de mucha agua libre.

Gad et al. (2025) dicen que el gas HHO se genera cuando el agua se electrifica en un medio de celda seca que actúa como electrolito. Un gel o membrana llena los espacios entre los electrodos. Esto también ayuda a mantener el electrolito en su lugar. Esto significa que el electrolito no se mueve en ninguna dirección. Las baterías secas son menos propensas a dañarse por el calor que las baterías húmedas, y cuando se exponen a una corriente alta, su temperatura no aumenta tanto.

El "electrolizador seco" es un generador de HHO de celda seca que ha sido modificado para que pueda ser utilizado en automóviles. El objetivo es producir más gas mientras se reducen los riesgos de sobrecalentamiento y el aumento de la demanda eléctrica.

Ciclo de Conducción; es una forma planificada de mostrar cómo funciona un coche mientras se conduce. El crecimiento de esta calidad se muestra como un aumento constante a lo largo del tiempo. Yilmaz y Uludamar (2017) dicen que el objetivo principal es asegurarse de que las condiciones bajo las cuales se realizan las pruebas sean las mismas para todos. Esto se hace para asegurarse de que cosas como el uso de combustible, las emisiones de contaminantes y el rendimiento energético se puedan medir de la misma manera cada vez.

El Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC) es la base del enfoque del estudio, sin embargo, ha sido modificado para hacerlo más útil en la vida real. Entonces, esto significa que está ocurriendo en las calles de la ciudad a lo largo de un recorrido que ha sido cuidadosamente planificado para coincidir con sus muchas etapas.

El ciclo NEDC fue creado para imitar la conducción en Europa, incluyendo tanto áreas urbanas como rurales. Cuando va más lento, funciona en una fase urbana llamada ECE-15. Cuando va más rápido, pasa a una fase extraurbana. El ciclo NEDC fue creado debido a este tipo de conducción. Se puede crear rutas que incluyan límites de velocidad, tiempos de parada y longitudes, lo que imitará cómo los vehículos aceleran, desaceleran y viajan por la carretera,

siendo muy útil para simulaciones en naciones que no tienen un dinamómetro certificado (Rocha et al., 2018).

Sensor de Oxígeno ( $\text{HO}_2\text{S}$ ); el sensor de oxígeno, también llamado sensor de  $\text{H}_2\text{S}$ , es una parte importante del sistema eléctrico para motores de gasolina que utilizan sistemas de inyección. Debido a la ubicación de este dispositivo en relación con el catalizador en el colector de escape, puede verificar los niveles de oxígeno residual en los gases y ver si son correctos. Esta sonda está compuesta de dióxido de circonio y emite una señal de voltaje que está directamente relacionada con la diferencia en los niveles de oxígeno entre el aire que se está emitiendo y el aire circundante.

La fuerza de la señal cambia mucho, pasando de alrededor de 0.1 V, lo que significa que hay demasiado aire en la mezcla, a aproximadamente 0.9 V, lo que significa que no hay suficiente aire en la mezcla. El  $\text{HO}_2\text{S}$  ayuda a la unidad de control (ECU) a mantener la mezcla aire-combustible en la relación estequiométrica correcta de aproximadamente 14.7:1. La unidad de control electrónico (ECU) recibe información en tiempo real del sensor que está colocado río arriba. Esta información se utiliza para decidir si hacer la mezcla de combustible más espesa o delgada para ayudar a que se quemara mejor.

El sensor de salida, que se encuentra después del convertidor catalítico, mide las cantidades de oxígeno antes y después del catalizador. Esto se hace para ver qué tan bien funciona el catalizador. Los sensores  $\text{HO}_2\text{S}$  trabajan juntos para ayudar a reducir la contaminación asegurándose de que el combustible se use en su máximo potencial. Si la combinación no está bien mezclada, también utilizan códigos OBD para averiguar qué está mal.

### Capítulo III

#### **Diseño Experimental para Evaluar Emisiones Dinámicas con Sistema HHO**

El propósito de este capítulo es proporcionar una explicación completa de la prueba que se llevó a cabo para determinar la cantidad de contaminación que produce un vehículo M1 mientras estaba en funcionamiento. Para determinar su eficacia, lo sometimos a una serie de pruebas tanto con cómo sin un sistema de Electrólisis Seco que utiliza HHO (Gas Hidróxido). Para que el estudio cumpla con sus objetivos, esta fase es de suma importancia.

Se emplea un enfoque sistemático para la recopilación, evaluación y comparación datos significativos de emisiones, como CO y HC, cuando los motores operan de diversas maneras. Una forma que se nos ocurrió para probar el producto es el ciclo NEDC, (New European Driving Cycle) o en español, Nuevo Ciclo de Conducción Europeo. Este plan consiste en emplear rutas cortas, reguladas y repetidas para mostrar cómo los consumidores utilizan el producto todos los días.

El método experimental utiliza herramientas de diagnóstico automotor para leer parámetros en tiempo real. Además, se utilizan enfoques estadísticos básicos para dar sentido a la información. El objetivo de este estudio es determinar si el sistema HHO tiene un gran efecto en las emisiones o no.

Varios estudios recientes han demostrado que la forma en que las personas conducen puede tener una influencia significativa en la cantidad de contaminación que producen los automóviles. Hay una variedad de factores que podrían ser responsables de este cambio, incluyendo variaciones en la carga, la velocidad, la temperatura del motor y otros procesos que ocurren cuando los automóviles están en movimiento.

Demostrando que puede ser utilizado como un componente adicional en los MCI y que sí tiene un efecto en el medioambiente desde un punto de vista tecnológico.

Por último se indican las características del vehículo de prueba, el equipo que se utilizó y el protocolo que se siguió durante el experimento. También se menciona la ruta que se eligió, el número de muestras que se tomaron, las variables que se estudiaron y los criterios que se utilizaron para asegurarse de que los resultados fueran precisos y confiables.

### **3.1. Datos Técnicos del Vehículo M1**

El vehículo de prueba es un Mazda 3 de 2008, que es un vehículo tipo M1 para el transporte de pasajeros. El motor de este modelo es un motor de gasolina de cuatro cilindros en línea con distribución DOHC y 16 válvulas. Tiene una cilindrada de aproximadamente 2.0 litros y un sistema de inyección multipunto.

También cuenta con un estándar de diagnóstico OBD-II (Mazda Motor Corporation, 2008). Este modelo cumple con las regulaciones de emisiones que son similares a Euro 2 o Euro 3 en Ecuador, dependiendo de qué tan bien se mantenga (Moreta, 2017). Tiene un sistema de gestión electrónica del motor, sensores de oxígeno y un convertidor catalítico de tres vías, ver Figura 3.

#### **Figura 3**

*Vehículo de Prueba*



### 3.2. Descripción del Dispositivo HHO Dry Electrolyzer

El sistema de hidrógeno del vehículo es un electrolizador seco HHO de Hidro Energy. Está compuesto de acero inoxidable y mide aproximadamente 30 cm de largo y 2 pulgadas de ancho (Hidro Energy, 2021a). El sistema funciona descomponiendo el agua en hidrógeno y oxígeno (gas HHO), que luego se añade al sistema de admisión para mezclarse con el aire y el combustible. Esto hace que la combustión sea más eficiente.

El fabricante dice que este sistema puede reducir las emisiones de contaminantes hasta en un 80%, aumentar la potencia hasta en un 25% y ahorrar alrededor del 40% en combustible (Hidro Energy, 2021a). El paquete incluye un reactor, una manguera de poliuretano, conectores, un conector en T para la entrada, cables eléctricos preinstalados, abrazaderas e instrucciones (Hidro Energy, 2021b), véase figura 4

**Figura 4**

*Dispositivo HHO*



Las partes necesarias para instalar el sistema se muestran a la izquierda. Estos son el electrolito (que es una mezcla de agua destilada con bicarbonato), las mangueras, las abrazaderas, el embudo, la fuente de alimentación y el generador de HHO. Esta imagen muestra el momento en que el embudo vierte la solución electrolítica en el sistema. Esto prepara el generador para ser encendido, como se ve en el lado derecho de la imagen.

### 3.3. Verificación Preoperacional e Instalación del Sistema HHO Dry Electrolyzer

Antes de poner el sistema en uso, se realiza una evaluación de la generación de hidrógeno. Para finalizar este proceso, se necesita conectar el dispositivo a una fuente de alimentación de 12 voltios y luego insertar la manguera de salida en un recipiente con agua y jabón. Demostrando que se han formado burbujas. Energy (2021b).

Este procedimiento se utiliza como parte del proceso de verificación antes de ensamblar las piezas. Durante este paso, se revisan las piezas para asegurarse de que no haya fugas, que el flujo del electrolito sea correcto y que todo esté funcionando. Esto asegura que el sistema funcionará de manera segura y eficiente cuando sea realmente probado.

#### Figura 5

##### *Prueba de Burbujeo del Sistema HHO*



La prueba de burbujeo de hidrógeno en la figura 5 es una parte importante para asegurarse de que el sistema de electrólisis seca HHO esté funcionando bien. El generador de HHO está conectado a la batería del Mazda. Este enlace permite que la solución electrolítica pase por el proceso de electrólisis. Durante la prueba de funcionamiento, se acerca un recipiente con agua jabonosa a la salida del generador de gas HHO para verificar visualmente la producción de gas.

La formación continua de burbujas en el líquido indica que el proceso de electrólisis está ocurriendo correctamente y que el sistema está generando oxihidrógeno (HHO) de manera efectiva. Esta prueba constituye un método práctico y confiable para confirmar el correcto funcionamiento del sistema antes de su instalación definitiva y las pruebas dinámicas en el vehículo.

### Figura 6

*Instalación del Sistema HHO Dry Electrolyzer en el Vehículo de Prueba*



Instalar el sistema de electrólisis seca HHO en el compartimento del motor de un vehículo Mazda implica una serie de pasos, que se muestran en la figura compuesta 6. Este sistema se instaló para averiguar cuánto afecta la cantidad de contaminantes que se liberan al aire cuando cambian las condiciones.

La figura 6 en la parte superior izquierda muestra cómo el generador de HHO está conectado a una superficie metálica en el compartimento del motor. El generador de HHO está posicionado en posición vertical para ayudar a que se formen las burbujas y evitar que los líquidos regresen al electrolito.

La manguera de salida de gas HHO está conectada al colector de admisión en la esquina superior derecha de la imagen. Pasa por una rama en "T" que está conectada a un conducto de vacío. Esta configuración facilita que el gas se mezcle bien con el aire que se está tomando. La figura en la esquina inferior izquierda muestra que la conexión eléctrica negativa del sistema está conectada al chasis del coche. Este enlace asegura que la conexión a tierra sea lo suficientemente fuerte.

Por último, la imagen en la esquina inferior derecha muestra cómo el contacto eléctrico positivo del generador se conecta al cable de la bobina para completar el circuito de energía para el proceso de electrólisis.

Este conjunto de imágenes muestra que la instalación se realizó de acuerdo con las normas de seguridad, funcionalidad y accesibilidad. Esto se hizo para asegurarse de que el sistema funcionara correctamente durante las pruebas.

### **3.4. Instalación y Operación del Analizador de Gases**

La figura 7 muestra cómo instalar y configurar el analizador de gases AGS-688. Este analizador se utiliza para verificar las emisiones de contaminantes del vehículo de prueba cuando el sistema de electrólisis seca HHO está encendido y cuando no lo está.

Las figuras superiores ilustran cómo encender el equipo y configurar los parámetros básicos. Estos ajustes permiten ver los niveles de contaminantes como el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, los hidrocarburos y otros indicadores importantes. El equipo también se configuró correctamente antes de tomar las fotos.

El sensor de muestra está conectado a la máquina que debe recoger los gases directamente del tubo de escape indicado en la imagen de la esquina central izquierda. Uno de los pasos que se muestra en la figura a la derecha del centro apuntando la sonda de muestreo hacia la salida del sistema de escape del vehículo, se realiza para asegurarse de que la sonda esté colocada de la manera correcta para que no haya fugas ni lecturas incorrectas, además de que la Sonda no se caiga en la ruta dinámica.

La figura 8 muestra la sonda siendo introducida en el tubo de escape. Esto permite al equipo registrar las emisiones del motor en tiempo real, ya sea que el motor esté funcionando o no, y ya sea que las condiciones de la prueba estén cambiando o no.

Este método es necesario para obtener datos precisos y confiables sobre las emisiones, que luego se utilizarán para ver cómo el sistema HHO afecta la calidad de los gases que produce el motor. Esta comparación se realizará de acuerdo con los objetivos exploratorios del proyecto.

### **Figura 7**

*Instalación Operativa del Analizador de Gases en el Vehículo de Prueba*



### **Figura 8**

*Instalación de la Sonda del Analizador de Gases en el Tubo de Escape*



### 3.5. Configuración de Escáner OBD2 MX900 y GPS para Adquisición de Datos.

La figura 9 muestra cómo funcionan los instrumentos eléctricos del coche de prueba. Esto implica utilizar dos métodos cruciales para obtener información durante las pruebas dinámicas.

El escáner de automóviles OBD2 Autel MX900 está a la izquierda, lo cual permite leer y registrar una serie de parámetros del motor en tiempo real utilizando este dispositivo. Facilitando registrar los ajustes de combustible a corto y largo plazo, el tiempo de encendido y el funcionamiento de la bomba de combustible, por nombrar algunos. Teniendo en cuenta esta información sobre el rendimiento del motor antes y después de instalar el sistema HHO.

El lado derecho de la aplicación móvil GPS Logger ofrece una interfaz de usuario. La aplicación combinado con Google Earth, nos permite sacar las rutas realizadas con más parámetros adicionales, ya que en el panel muestra la latitud y longitud exactas, la velocidad actual, el número de satélites que están conectados y la altitud. Todas estas cosas son importantes para asegurarse de que las rutas elegidas para las pruebas puedan usarse una y otra vez.

#### Figura 9

*Conexión del Escáner MX900 y GPS Logger*



### 3.6. Pruebas Dinámicas y Proceso de Recolección de Datos en Ruta

Se realizaron doce rutas urbanas similares para ver observar el sistema de electrólisis seca HHO cambia el rendimiento del motor y la contaminación que genera, decidiendo encender y apagar el sistema HHO de manera regular. Cada una de estas rutas tomó aproximadamente cuatro minutos en recorrerse. Las rutas se realizaron en entornos controlados que eran idénticos en términos de la cantidad de tráfico, la altura, la temperatura del lugar y la velocidad media.

Se utilizaron dos herramientas clave, el escáner OBD2 (Xtool MX900) tomó 39 datos del tren motriz. Algunos de estos son revoluciones por minuto (RPM), carga del motor, ajustes de combustible a corto y largo plazo, tiempo de encendido, voltaje del sensor de oxígeno y presión absoluta del colector (MAP)

#### Figura 10

##### *Ruta 1 Recorrido Urbano*



Fuente: (Google, 2025)

Además se usó la aplicación GPS Logger para averiguar la latitud, longitud, altitud, velocidad y precisión de los satélites. Esto se hizo para dar a los segmentos una referencia geográfica, véase figura 10.

## Capítulo IV

### Impacto del Sistema HHO en Desempeño y Emisiones Vehiculares

Las personas están cada vez más preocupadas por el medio ambiente a medida que utilizan más energía. Debido a esto, las personas han ideado y utilizado tecnología para intentar hacer que los motores de combustión interna funcionen mejor y contaminen menos. Cada vez más personas están utilizando sistemas de producción de hidrógeno tipo HHO para ayudar a que los coches funcionen mejor y tengan un menor impacto en el medio ambiente. Estos sistemas dividen el agua en sus elementos para producir hidrógeno y oxígeno.

El sistema HHO controla la cantidad de gas oxihidrógeno que entra en la cámara de combustión del motor. Esto hace que la quema de combustibles fósiles sea más eficiente. Esta es la idea principal que subyace en el funcionamiento del sistema HHO.

Varios estudios han demostrado que este plan podría ayudar a ahorrar gasolina y reducir los productos químicos nocivos que se liberan al aire, como los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el monóxido de carbono. El sistema HHO, por otro lado, tiene diferentes efectos dependiendo de cómo lo uses. Cuánto peso tiene que manejar el motor mientras está en funcionamiento es una de las consideraciones más significativas.

El próximo capítulo profundiza en cómo el sistema HHO cambia el funcionamiento del automóvil y la contaminación que genera mientras transporta diferentes cargas. Realizamos estudios controlados para descubrir información importante como cuánta gasolina utiliza el motor, qué tan bien funciona y cuánta contaminación genera.

El sistema HHO se encendió y apagó durante estas pruebas. Los resultados nos ayudaron a entender mejor cuán técnicamente posible es el sistema y para qué podría ser utilizado en el transporte terrestre.

## 4.1. Análisis de Emisión y Combustión

### 4.1.1. Selección de Variables Relevantes para el Análisis

Se seleccionaron diez aspectos significativos que están directamente relacionados con el proceso de combustión, la eficiencia del motor y la generación de emisiones contaminantes a lo largo del proceso de selección. Estos aspectos fueron seleccionados porque son tan cruciales.

Cuando se trata de realizar un análisis exhaustivo del rendimiento del motor en una amplia gama de diferentes conjuntos de condiciones de operación, los siguientes factores son los que lo hacen posible:

- La medición de la cantidad de combustible que se inyecta se denomina pulso de combustible (ms), y está directamente relacionada con el tiempo que el inyector está abierto.
- El ángulo de la ignición antes del punto muerto superior se conoce como avance de la ignición, y se mide en grados. Este ángulo tiene un impacto en la eficiencia del proceso de combustión.
- El término ajuste de combustible a corto plazo (%) se utiliza para describir la función de la unidad de control electrónico (ECU), que es responsable de hacer un ajuste rápido a la mezcla de aire y combustible.
- Los ajustes que se realizan a la mezcla aire-combustible durante un período prolongado de tiempo, reflejando las condiciones de operación a largo plazo, se tienen en cuenta al calcular el porcentaje de ajuste de combustible a largo plazo.
- Se conoce como el flujo másico de aire (g/s), y se utiliza en el cálculo de la mezcla estequiométrica. La cantidad de aire que entra en el motor se denomina flujo másico de aire.

- Uno de los factores más importantes que determina la técnica de inyección e ignición es la cantidad de trabajo que se requiere que realice el motor. La carga en el motor se indica como un porcentaje (%).
- Se conoce como la relación aire-combustible (AFR), y es una medida clave de la efectividad del proceso de combustión. La relación aire-combustible es el porcentaje de aire en la mezcla.
- Una señal que es generada por el sensor de oxígeno y utilizada por la unidad de control electrónico (ECU) para establecer la mezcla se denomina voltaje del sensor de oxígeno (V).
- RPM es una abreviatura que significa revoluciones por minuto, la cual especifica la tasa a la que gira el motor. En cualquier análisis de un motor dinámico, este es un parámetro absolutamente necesario.
- Cuando la temperatura del aire que se está tomando se mide en grados Celsius, tiene un efecto en la densidad del aire, lo que a su vez afecta la mezcla y el rendimiento.

#### ***4.1.2. Análisis de Resultados: Impacto del Sistema HHO en las Emisiones Vehiculares***

La tabla 1 muestra una comparación de las emisiones que se registraron con y sin el sistema HHO. Muestra los cambios en porcentajes que ocurrieron en los principales gases de escape y el valor lambda.

Los resultados muestran que la composición de los gases de escape cambia mucho, por lo tanto, añadir el gas oxihidrógeno (HHO) al sistema podría hacer que el proceso de combustión funcione mejor.

La principal señal de que esta mejora en la combustión ha ocurrido es la disminución del monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no quemados (HC), lo que muestra que el combustible se ha oxidado más completamente. Además, el valor lambda se acerca cada vez más a uno, lo que significa que la mezcla aire-combustible está más equilibrada. Los resultados

apoyan la idea de que el HHO actúa como un potenciador de la llama, lo que acelera el proceso de combustión y hace que el motor sea más eficiente térmicamente al hacerlo más eficiente.

**Tabla 1**

*Comparación de Parámetros de Emisión con y sin Sistema HHO*

Parámetro	Sin HHO	Con HHO	Diferencia (%)
CO	1.28	0.79	-38%
CO <sub>2</sub>	12.69	13.02	+2.6 %
HC	201.31	181.61	-9.8%
O <sub>2</sub>	1.969	2.33	+18.3%
Lambda	1.06	1.10	+3.8 %

A primera vista, se puede observar que la disminución del monóxido de carbono CO es bastante importante, lo que significa que el proceso de combustión funciona mucho mejor. El monóxido de carbono es un resultado común de la combustión que no se completa del todo. El menor nivel de CO muestra que el sistema HHO hace que los combustibles fósiles se quemen de manera más completa al hacer más oxígeno disponible y acelerar la reacción.

Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>); el gran aumento en CO<sub>2</sub> se encontró en línea con la caída en CO. Dado que el monóxido de carbono es un subproducto de la combustión completa, este aumento es consistente con una mejor eficiencia térmica. Aunque el monóxido de carbono es un gas de impacto que ocurre todo el invierno, su presencia en este caso es una buena señal de lo bien que se está quemando el combustible.

Hidrocarburos No Quemados (HC); el número de hidrocarburos ha bajado un poco, lo que podría significar que la mezcla aún no está totalmente optimizada o que el sistema HHO no tiene un gran efecto en la evaporación o combustión de los hidrocarburos sobrantes. Al hacer cambios más precisos en el sistema de inyección o control de la mezcla aire-combustible, este valor podría mejorarse.

Oxígeno ( $O_2$ ); debido a que los gases de escape ahora tienen mucho menos oxígeno, el oxígeno que está disponible durante la combustión se está utilizando más. Esto sugiere que se ha utilizado más oxígeno para oxidar el combustible, lo que apoya la idea de que el HHO hace que la combustión sea más completa.

El valor de Lambda es +3.8%; después de alcanzar un máximo de 1, el valor de lambda sube un poco, lo que significa que la combinación está más cerca de la estequiometría ideal ( $\lambda = 1.00$ ) o incluso un poco menos que perfecta. Esto muestra que el proceso de combustión es ahora más eficiente ya que la relación aire-combustible es mejor. Esto podría deberse a que hay una molécula extra de oxígeno en el gas HHO.

#### ***4.1.3. Análisis e Interpretación de Resultados Promedio de Gases de Escape***

Los datos promedio que se recopilaron como resultado del funcionamiento del motor sin el sistema HHO tanto en condiciones estáticas como dinámicas son los siguientes:

CO (1.28%); este número es bastante alto, lo que significa que el combustible no se quemó completamente, lo que significa que el monóxido de carbono estaba presente, lo cual es un resultado normal de la oxidación parcial.

Dióxido de carbono (12.69%); el nivel moderado de dióxido de carbono muestra que el proceso de convertir el carbono del combustible en dióxido de carbono es limitado, lo que indica que el proceso de combustión no está funcionando tan bien como podría.

HC (201.31 ppm); una gran cantidad de hidrocarburos no quemados significa que el combustible no quemado está saliendo por el escape. Esto es un signo de una mezcla rica o de una combustión incompleta.

El hecho de que haya mucho oxígeno en los gases de escape está en línea con los resultados anteriores de CO y HC. Esto significa que parte del oxígeno disponible no se utilizó durante el proceso de combustión. Hay un 1.969 por ciento de oxígeno en los gases de escape.

Lambda (1.06); este número está ligeramente encima de 1, lo que significa que el motor está funcionando con una mezcla pobre (más aire que combustible). En ausencia del sistema HHO, este valor indica que no hay enriquecimiento significativo de la mezcla y no hay un apoyo adicional en la oxidación de los gases residuales.

Resultados Promedio con Sistema HHO: Hubo grandes cambios en las emisiones mientras el sistema HHO estaba en funcionamiento:

Ha habido una gran caída del 38% en CO, lo que demuestra que la combustión ahora es mucho más eficiente. El HHO permite que el carbono se oxide a un ritmo más rápido al proporcionarle oxígeno adicional en forma de gas oxihidrógeno.

CO<sub>2</sub> (0.79%): El número de CO<sub>2</sub> se reduce en un 38%, lo cual es una buena señal de lo bien que funciona el proceso de combustión. Esto se debe a que muestra que el mismo combustible está produciendo más CO<sub>2</sub>, lo que significa que la conversión es mejor.

Hydrocarbons no Quemados (HC), se observa una reducción de 9.8% de la concentración de hidrocarburos, lo cual indica una mejor combustión de la mezcla aire-combustible al emplear el sistema HHO. Aunque la disminución no es drástica, sí sugiere que el aporte de hidrógeno ha favorecido una mayor eficiencia en la ignición de los residuos de combustible.

Sin embargo, el hecho de que los HC solo disminuyan un 9.8% también sugiere que el sistema HHO por sí solo no optimiza completamente la combustión de todos los residuos. Para mejorar aún más este parámetro, sería necesario realizar ajustes adicionales en el sistema de inyección, sincronización del encendido o la relación aire-combustible. En las condiciones actuales el efecto es moderado pero positivo.

El aumento del oxígeno en los gases de escape en un 18.3% con el sistema HHO indica que una mayor proporción del aire no está siendo consumida completamente en la combustión. Este comportamiento es coherente con el valor Lambda de 1.10 lo que confirma

que el motor está operando con una mezcla pobre (exceso de aire). El sistema HHO, al aportar hidrógeno como elemento de ignición rápida, mejora la eficiencia del quemado sin necesidad de enriquecer la mezcla con más combustible, lo que explica la presencia de más oxígeno sin comprometer la estabilidad de la combustión.

El aumento del  $O_2$  se interpreta como una condición controlada de combustión limpia, donde el exceso de aire ayuda a reducir emisiones de CO y HC. Esta tendencia también es respaldada por la reducción paralela de las emisiones contaminantes.

## Conclusiones

Las emisiones base del vehículo M1 se las logró caracterizar en condiciones dinámicas sin el sistema HHO, observándose niveles promedio de CO del 1.28% y HC de 201.31ppm. Estos valores reflejan un proceso de combustión moderadamente incompleto, con presencia de residuos de carbono y mezcla ligeramente pobre ( $\lambda=1.06$ ), lo que es típico para vehículos con sistemas de inyección sin calibración óptima para condiciones urbanas variables. Estos datos sirvieron como línea base para el análisis comparativo posterior.

Las pruebas dinámicas con el sistema HHO instalado mostraron una reducción general en los niveles de CO y HC, con valores promedio de 0.79% de CO y 181.61 ppm de HC, lo que indica una mejora en la eficiencia de combustión. El valor de lambda de 1.10 confirmó una mezcla más pobre y controlada, atribuible a la rápida ignición provocada por el hidrógeno. Esto demuestra que el sistema HHO puede operar de manera funcional en condiciones reales de conducción, optimizando el proceso de combustión sin requerir modificaciones adicionales al sistema de inyección original.

La comparación directa entre las rutas con y sin HHO evidenció una reducción del 38% en CO y del 9.8% en HC, validando el impacto positivo del sistema HHO en la combustión. Además, se observó un ligero aumento en el porcentaje de oxígeno y del valor de lambda, lo que respalda la hipótesis de una mezcla aire-combustible más eficiente. Estos dos cambios, aunque no drásticos, son significativos bajo condiciones de prueba urbana, y demuestran que el sistema HHO contribuye a disminuir los contaminantes sin comprometer el funcionamiento del motor.

### **Recomendaciones**

Se recomienda realizar ajustes al sistema de inyección del vehículo sin HHO a fin de mejorar la eficiencia de la combustión y reducir los niveles de CO y HC, observados durante las pruebas. Esto puede incluir limpieza de inyectores, revisión de sensores de oxígeno y filtros de aire.

Dado que el sistema HHO demostró capacidad para mejorar la combustión, se recomienda perfeccionar el diseño del sistema instalado, garantizando un sellado hermético y una generación estable de gas. La integración debe contemplar válvulas antirretorno, sensores de flujo y conexiones seguras, para asegurar un funcionamiento continuo, seguro y adaptado a las condiciones reales de carga del motor.

En vista de los resultados positivos en la reducción de emisiones, se recomienda implementar el sistema HHO como tecnología de apoyo en estrategias de reducción de contaminantes para vehículos M1 con motor de gasolina, especialmente aquellos que no cuentan con sistemas avanzados de postratamiento. Para ello es indispensable realizar un análisis técnico previo de compatibilidad.

### Bibliografía

- Al-Dawody, M. F., Al-Farhany, K. A., Allami, S., & Al-Chlahawi, K. K. I. (2023). *Using oxy-hydrogen gas to enhance efficacy and reduce emissions of diesel engine. Ain Shams Engineering Journal.*
- Estrella-Guayasamín, M., Vivar Quiroz, V., Delgado Quinto, A., & Gomez Berrezueta, F. (2025). *Effect of oxyhydrogen gas (HHO) addition on fuel consumption of M2 category vehicle by road tests.* In E. M. Inga Ortega et al. (Eds.), *Systems, Smart Technologies, and Innovation for Society – Proceedings of CITIS 2024* (pp. 227–237). Lecture Notes in Networks and Systems, 1331.
- Fundación Mapfre – CESVIMAP. (2016). *Control de emisiones contaminantes en Europa y Estados Unidos. Revista CESVIMAP, (94), 52–54.*
- Gad, M. S., El Soly, A. K., Singh, S., Sharma, K., Dixit, S., & Siddiqui, M. H. (2025). *Examining oxyhydrogen gas generation experimentally using dry and wet cells. PLOS ONE, 20(6), e0324921.*
- Gebisa, A., Gebresenbet, G., Gopal, R., & Nallamotheu, R. B. (2021). *Driving cycles for estimating vehicle emission levels and energy consumption. Future Transportation, 1(3), 615–638.*
- Gómez Toapanta, J. (2024). *Estudio de emisiones contaminantes por la Facultad de Mecánica Automotriz, UIDE, Quito* [Tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador].
- González Gil, J. E., Díaz Rey, Á. O., & González-Estrada, O. A. (2018). *Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. Revista UIS Ingenierías, 17(1), 143–154.*
- Google Earth. (2025). *Captura satelital del recorrido urbano-Ruta 1* [Imagen]. Google
- Hella GmbH & Co. KGaA. (s.f.). *Tabla de valores límite de emisiones contaminantes de turismos (Euro 1–6).*
- Hidrógeno como Solución. (s.f.). *El generador* [Imagen]

- ICCT (The International Council on Clean Transportation). (2014). *Comparison of US and EU programs to control light-duty vehicle emissions*. Washington, D.C.: ICCT.
- INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). (2002). *NTE INEN 2204: Gestión ambiental – Aire – Vehículos automotores – Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que utilizan gasolina*. Quito, Ecuador: INEN.
- INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). (2016). *Proyecto de segunda revisión NTE INEN 2204:2016*. Quito, Ecuador: INEN.
- Márquez, F., Yilmaz, A. C., & Uludamar, E. (2017). *Determination of driving cycles for emission modelling in urban areas: A case study*. *Transactions on the Built Environment*, 95, 254–264.
- Moreno Chacón, B. I. (2021). *Proyecto para la reforma a la normativa NTE INEN 2204* [Tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador].
- Ramírez, J., Bravo, W., & Carvajal, G. (2017). *Emisiones contaminantes de un motor de gasolina funcionando a dos cotas con combustibles de dos calidades*. *Información Tecnológica*, 28(1), 9–18.
- Rivera, N., Chica, J., Zambrano, I., & García, C. (2017). *Study of the behavior of an Otto engine of electronic injection in relation to the stoichiometry of the mixture and ignition advance for Cuenca City*. *Revista Politécnica*.
- Tecnología Automóvil. (s.f.). *Sensores de contaminación en automóviles* [Imagen]
- UIDE (Universidad Internacional del Ecuador). (2020, 15 octubre). *Normativa que rige: límites permitidos de emisiones contaminantes es obsoleta*. *Noticias UIDE*.
- Warguła, Ł., Kaczmarzyk, P., Wiczorek, B., Gierz, Ł., Małozieć, D., Góral, T., ... & Stambolov, G. (2024). Identification of the Problem in Controlling the Air–Fuel Mixture Ratio (Lambda Coefficient  $\lambda$ ) in Small Spark-Ignition Engines for Positive Pressure Ventilators. *Energies*, 17(17), 4241.
- WHO (World Health Organization). (2021). *Ambient air pollution: Health impacts*. Ginebra: OMS.

Yilmaz, A. C., & Uludamar, E. (2010). *Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11366–11372.

