

Análisis comparativo de consumo de combustible y emisiones producidas por un generador de hidrógeno de celda seca vs gasolina de 92 octanos el motor de combustión interna EFI 1800 cc

Comparative analysis of fuel consumption and emissions produced by a dry cell hydrogen generator vs. 92 octane gasoline in the EFI 1800 cc internal combustion engine.

Marco Masapanta ¹, Darwin Aimacaña ²
RA MOTORS DEL ECUADOR ¹, LUBRICACION GLOBAL ²

Correspondencia Autores: eduarmspnt@gmail.com, aimapaul26@gmail.com

Recibido: 18 de octubre de 2022, **Publicado:** 15 de diciembre de 2022

Resumen— *La integración de un generador de hidrógeno de celda seca en el motor Opel Corsa de 1.8 L implica la operación de un sistema que produce HHO como carburante adicional, complementando la mezcla aire-combustible con el objetivo de optimizar el rendimiento del combustible y reducir las emisiones contaminantes. Para evaluar el impacto en las emisiones contaminantes, se llevaron a cabo pruebas aplicando la norma INEN NTE 2204 utilizando un analizador de gases. Los resultados mostraron una reducción de hasta el 12% en monóxido de carbono (CO) al utilizar HHO en combinación con gasolina extra y súper, mientras que los demás gases como hidrocarburos (HC), dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂) no experimentaron reducciones significativas, cumpliendo con los estándares establecidos en ambos casos. Además, se realizó una prueba de consumo conforme al protocolo WLTP, demostrando una optimización del uso de combustible de hasta el 15% al emplear gasolina súper.*

Palabras clave— Emisiones de combustible, Emisiones contaminantes, Generador de hidrógeno. Protocolo WLTP

Abstract— The integration of a dry cell hydrogen generator into the Opel Corsa 1.8 L engine involves operating a system that produces HHO as an additional fuel, complementing the air-fuel mixture to optimize fuel efficiency and reduce emissions. To assess the impact on emissions, tests were conducted following the INEN NTE 2204 standard using a gas analyzer. Results showed a reduction of up to 12% in carbon monoxide (CO) when using HHO with both regular and premium gasoline, while other gases such as hydrocarbons (HC), carbon dioxide (CO₂), and oxygen (O₂) did not experience significant reductions, meeting the standards in both cases. Additionally, a fuel consumption test was conducted

following the WLTP protocol, demonstrating up to a 15% optimization in fuel usage with premium gasoline.

Keywords— Emission, Pollutant emissions, Hydrogen generator, WLTP protocol

I INTRODUCCIÓN

Una aplicación destacada que involucra la generación de hidrógeno es la implementación de un sistema Gasolina-HHO en motores de combustión interna. El gas HHO, producido mediante electrólisis, se introduce directamente en el sistema de alimentación del motor, donde se combina con la mezcla aire-combustible, proporcionando así un carburante suplementario a la gasolina. Este sistema se desarrolla con eficiencia sin causar alteraciones en el funcionamiento adecuado del motor.

La búsqueda de alternativas energéticas para reemplazar los combustibles fósiles en vehículos se justifica por las consecuencias del uso de estos últimos. En Ecuador, por ejemplo, las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la quema de combustibles fósiles alcanzaron las 2.3 toneladas métricas per cápita en 2019.

El hidrógeno puede ser utilizado como un carburante adicional a la mezcla aire-combustible, lo que mejora la combustión y optimiza los parámetros característicos del motor. Al ser inyectado directamente en el motor, la combustión del hidrógeno es hasta 10 veces más rápida que la del combustible convencional (gasolina), ocupando los espacios vacíos entre las moléculas. En

esencia, el hidrógeno actúa como una bujía gigante que enciende todo el combustible para una combustión limpia y completa.

Por lo tanto, existe un creciente interés en explorar fuentes de energía alternativas, como la generación de hidrógeno, para complementar los hidrocarburos [1].

II MÉTODOS Y MATERIALES

Se aborda varios aspectos relacionados con el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes en un motor de combustión interna, así como la implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en el vehículo. Se utilizan diferentes métodos y materiales para llevar a cabo estas investigaciones.

Se calcula el consumo específico de combustible utilizando una fórmula específica y se realiza una prueba de consumo de combustible en ruta siguiendo el protocolo WLTP. Para medir las emisiones de gases contaminantes, se utiliza un analizador de gases y se aplica la norma técnica NTE INEN 2204.

Precauciones y medidas de seguridad para la instalación del generador de hidrógeno, así como el procedimiento para la preparación del electrolito necesario. Además, se detallan los componentes y el funcionamiento del generador de hidrógeno de celda seca.

Incluye cálculos relacionados con la admisión de la mezcla aire/combustible en el motor y se presentan los resultados de las pruebas de emisiones de gases tanto con gasolina súper 92 octanos como con gasolina súper 92 octanos y HHO, demostrando el cumplimiento de las normativas correspondientes.

Consumo de combustible

Todo vehículo tiene especificaciones técnicas, dentro de las cuales está el consumo específico de combustible, pero este valor está muy por encima del real ya que este valor se obtiene bajo condiciones óptimas de funcionamiento, tanto del propio vehículo, como de las condiciones exteriores como el clima, tipo de carretera. Por esto es importante la medición del consumo de combustible que tiene por objeto controlar la cantidad de combustible que se consume en determinada distancia. [2]

$$c_e = \frac{m_f \left[\frac{g}{s} \right] * 3600 * V_T [m^3] n_i * n_m}{n_t [kW] * n_v}$$

Donde:

c_e : Consumo específico

m_f : Flujo másico de combustible

V_T : Volumen total motor

n_i : Rendimiento Interno

n_m : Rendimiento mecánico

n_t : Potencia teórica

n_v : Rendimiento Volumétrico

El dióxido de carbono, aunque no tiene efectos directos sobre la salud, se reconoce como un gas de efecto invernadero que contribuye significativamente al calentamiento global al retener el calor en la atmósfera [3].

El monóxido de carbono se forma durante la combustión incompleta de materiales como la madera, aceites y carbón, y se encuentra en los humos de los vehículos y el tabaco. Las emisiones de CO aumentan con la riqueza de la mezcla, siendo bajas y crecientes para mezclas pobres y aumentando bruscamente cuando la mezcla carece de oxígeno [4].

Los hidrocarburos no combustionados presentan un nivel mínimo de emisiones en mezclas pobres, ya que, a mayor riqueza, mayor es la concentración de hidrocarburos en la mezcla. Sin embargo, con mezclas muy pobres, esta tendencia se invierte debido a apagados locales de llama [5].

El hidrógeno es el gas menos denso conocido, con un poder calorífico inferior muy elevado por unidad de masa, pero bajo por unidad de volumen debido a su baja densidad. Tiene una baja energía de activación y amplios rangos de inflamabilidad y explosividad, lo que hace que cualquier mezcla con aire prenda o explote fácilmente [6].

El Protocolo WLTP establece los parámetros básicos para la prueba de consumo de combustible en ruta, incluyendo la duración del ciclo, la distancia recorrida, la fase de conducción y las temperaturas de prueba [7].

Tabla 1. Protocolo wltp de prueba de ruta

Protocolo WLTP (Procedimiento de prueba de vehículos ligeros armonizados en todo el mundo)

Ciclo de prueba	Ciclo dinámico
Duración de ciclo	Mínimo 30 minutos
Distancia del ciclo	Mínimo 23,25 kilómetros
Fase de conducción	52% urbano – 48% extraurbano
Velocidad media	46,5 kilómetros por hora
Velocidad máxima	131 kilómetros por hora

Cambios de velocidad	Calculados para cada automotor
Temperaturas de prueba	14°C a 23°C

Para garantizar la seguridad durante la instalación del generador de hidrógeno de celda seca en el vehículo, es crucial inspeccionar meticulosamente cada componente del sistema, incluidas las mangueras, depósitos, cables eléctricos y el reactor.

Es fundamental tomar precauciones al manipular los reactivos, como el Hidróxido de Potasio y el Bicarbonato de Sodio, para preparar la mezcla. Se deben utilizar guantes de protección personal, gafas protectoras y mascarilla para evitar cualquier riesgo.

Dada la alta explosividad del hidrógeno durante las pruebas de funcionamiento, se recomienda el uso de tapones para los oídos debido al excesivo ruido generado al entrar en contacto con una chispa.

En cuanto a la instalación mecánica del sistema, es necesario posicionar el reactor de hidrógeno de forma vertical para garantizar su correcto funcionamiento. Además, se debe tener en cuenta que la conexión eléctrica es la última etapa del proceso, considerando la señal de salida del generador que se activará mediante la señal de contacto del vehículo.

Para preparar el electrolito, se requiere medio galón de agua, ya sea destilada o no, al que se agregan 10 gramos de bicarbonato y 20 gramos de hidróxido de potasio hasta que la mezcla esté homogénea. Además, se recomienda añadir 2 ml de refrigerante de color a la mezcla antes de verterla en el depósito, lo que facilitará la detección de posibles fugas en el sistema

III PRUEBAS Y RESULTADOS

Para implementar el generador de hidrógeno de celda seca, se requieren componentes específicos del sistema, como el depósito, el secador, el generador y otros filtros de HHO necesarios para la producción de hidrógeno.

En cuanto al funcionamiento del sistema la conexión del reactor de HHO trabaja con 12 V y dispone de las siguientes características.

Tabla 1. Características del generador de hidrógeno

Parámetros	Valor	Unidad
Número de placas (n)	6	---
Consumo de voltaje del generador	12	V
Consumo de amperaje	5	A
Separación entre placas	5	mm

El generador de hidrógeno consta de 6 placas, funciona con un voltaje de 12 V y consume 5 amperios.

Cálculo del volumen de hidrógeno.

$$P * V = n * R * T$$

$$V = \frac{n * R * T}{P} \quad n = m$$

$$V_{H_2} = \frac{1.55 \times 10^{-3} \text{ mol} * 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} * 298 \text{ K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V_{H_2} = 0.0378 \text{ l por celda}$$

$$V_{H_2} = 37,8 \text{ ml}$$

El gas de oxígeno producido en volumen es la mitad del volumen del gas de hidrógeno, por lo que el flujo de gas HHO suministrado por el reactor es:

$$V_{O_2} = \frac{V_{totalH_2}}{2} = \frac{226.8 \text{ ml}}{2} = 113.4 \text{ ml}$$

$$V_{HHO} = V_{totalH_2} + V_{O_2}$$

$$V_{HHO} = 226.8 \text{ ml} + 113.4 \text{ ml}$$

$$V_{HHO} = 340.2 \text{ ml}$$

$$V_{totalH_2} = 6 * 37.8 \text{ ml}$$

$$V_{totalH_2} = 226,8 \text{ ml}$$

Analizador de gases

El opacímetro a través del software de inspección sirve para analizar las emisiones contaminantes de motores a gasolina, GNV y diésel, además que cuenta con captadores de RPM y temperatura.

Tabla 2. Protocolo wltp de prueba de ruta

Protocolo WLTP (Procedimiento de prueba de vehículos ligeros armonizados en todo el mundo)	
Ciclo de prueba	Ciclo dinámico
Duración de ciclo	Mínimo 30 minutos

Distancia del ciclo	Mínimo 23,25 kilómetros
Fase de conducción	52% urbano – 48% extraurbano
Velocidad media	46,5 kilómetros por hora
Velocidad máxima	131 kilómetros por hora
Cambios de velocidad	Calculados para cada automotor
Temperaturas de prueba	14°C a 23°C

Después de completar la conexión mecánica y eléctrica del generador de hidrógeno en el vehículo, se llevaron a cabo pruebas en el dinamómetro.

Pruebas de consumo con gasolina súper:

Se aplicó el protocolo WLTP para obtener datos de consumo de combustible. La ruta de prueba, que cubre una distancia de 30 kilómetros, 2820 MSN, se mantuvo un régimen de revoluciones entre 2500 y 3000 rpm, con un flujo de tráfico moderado. Para asegurar la precisión de los datos, se utilizó un tanque secundario transparente y graduado con una capacidad de 7 litros, que permitió medir el volumen de combustible consumido con mayor exactitud. Al finalizar cada prueba, se midió el combustible restante en el tanque secundario utilizando una probeta graduada en mililitros.

Resultados de consumo con gasolina súper:

Se registraron los niveles de consumo en condiciones de uso exclusivo de gasolina súper y en combinación con HHO, con dos pruebas realizadas en cada condición.

Tabla 3. Valores de consumo con gasolina súper y HHO

Sistema	Número de pruebas	Cantidad consumida (l)	Autonomía Km/l	Valor promedio	Variación autonomía
Súper	1	2,56	11,72	11,86	14,58
	2	2,50	12,00		
Súper + HHO	1	2,28	13,16	13,59	
	2	2,14	14,02		



Fig. 1 Consumo con gasolina súper + HHO

Después de completar ambas pruebas para cada condición de consumo de combustible, ya sea con gasolina súper únicamente o combinada con HHO, se obtuvo un promedio de 11.86 kilómetros por litro de combustible en la condición con gasolina súper, y 13.59 kilómetros por litro de combustible en la condición dual con gasolina súper y HHO. Esto representa un aumento del 14.58% en la autonomía del vehículo. Estos resultados se encuentran detallados en la tabla.

Matematización de valores de admisión de la mezcla aire/combustible.

El coeficiente de amortiguación y resistencia $\beta^2 + \xi = 3.1$ para vehículos a gasolina y la velocidad del aire a ese régimen de $W_{ad} = 82$ m/s a una temperatura de 12 °C.

Densidad del aire al final de la admisión.

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R * T_0} = \frac{72346.05 \text{ Pa}}{286.9 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} \cdot \text{K} * 285.15^\circ \text{K}} = 0.88 \text{ kg/m}^3$$

$$P_a = P_0 - (\beta^2 + \xi) * \frac{W_{ad}^2}{2} * \rho_0$$

$$P_a = 72346,05 \text{ Pa} - (3.1) * \frac{(82 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} * 0.88 \text{ kg/m}^3$$

$$P_a = 63174.51 \text{ Pa} = 0.0631 \text{ MPa}$$

Prueba de emisiones de gases

Las pruebas de emisiones de gases contaminantes del motor de combustión interna OPEL de 1.8 L se realizaron en el laboratorio de Autotrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas con el analizador de gases CARTEK, aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a

una altura de 2820 m sobre el nivel del mar en la parroquia Belisario Quevedo del cantón Latacunga.

TABLA III PRUEBA DE EMISIONES CON GASOLINA SUPER

Par.	Medición 1		Medición 2		Promedio	
	R.	C.	R.	C.	R.	C.
HC	178	54	159	52	168,33	52,33
CO (%V)	0,69	0,77	0,61	0,77	0,63	0,76
CO2 (%V)	13,27	13,42	13,37	13,46	13,31	13,45
O2 (%V)	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03
RPM	774	2229	774	2220	771,00	2219

Nota: R (Ralentí) y C (Crucero)

Aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a 2820 m sobre el nivel del mar se realizaron tres mediciones con sus respectivos promedios al utilizar el combustible súper, en ralentí a 771 rpm y en modo crucero a 2219 rpm, en donde los HC llegaron a 168.33 ppm en ralentí y 52.33 ppm en modo crucero. El porcentaje en volumen del monóxido de carbono CO en modo ralentí llegó a 0.63 y en modo crucero 0.76, del dióxido de carbono CO2 de 13,31 en ralentí y 13.45 en crucero, del oxígeno O2 de 0.06 en ralentí y 0.03 en crucero. Los datos conseguidos aprobaron la norma técnica NTE INEN 2204.

Prueba de emisiones con gasolina Súper y HHO

En la siguiente tabla se muestran los resultados de emisiones de gases contaminantes del vehículo con gasolina súper y HHO aplicando la norma NTE INEN 2204.

Tabla 4. Prueba de emisiones con gasolina súper y HHO

Par.	Medición 1		Medición 2		Promedio	
	R.	C.	R.	C.	R.	C.
HC	173	52	176	54	173,33	53,00
CO (%V)	0,5	0,78	0,61	0,76	0,55	0,77
CO2 (%V)	13,36	13,46	13,35	13,6	13,37	13,50
O2 (%V)	0,07	0,04	0,05	0,03	0,06	0,03

Par.	Medición 1		Medición 2		Promedio	
	R.	C.	R.	C.	R.	C.
RPM	771	2220	772	2213	771	2216

Aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a 2820 m sobre el nivel del mar se realizaron tres mediciones con sus respectivos promedios, en ralentí a 771 rpm y en crucero a 2216 rpm, en donde los HC llegaron a 173.33 ppm en ralentí y 53 ppm en crucero. El porcentaje en volumen del monóxido de carbono CO en modo ralentí llegó a 0.55 y en modo crucero 0.77, del dióxido de carbono CO2 de 13,37 en ralentí y 13.50 en crucero, del oxígeno O2 de 0.06 en ralentí y 0.03 en crucero. Los datos conseguidos aprobaron la norma técnica NTE INEN 2204.

Relación y análisis de emisiones con combustible súper vs súper + HHO

Al aplicar la norma NTE INEN 2204 para el estudio de las emisiones contaminantes, se realizó una tabla resumen con variaciones porcentuales con cada uno de los parámetros de HC, CO, CO2 y O2 al utilizar gasolina súper con hidrógeno.

Tabla 5 Análisis de variación de emisiones contaminantes

Parámetros	Ralentí			Limite
	Súper	Súper + HHO	Variación	
HC (ppm)	168,33	173,33	+2,88%	200 ppm
CO (%V)	0,63	0,55	-12,70%	1%
CO2 (%V)	13,31	13,37	+0,45%	7%
O2 (%V)	0,06	0,06	0,00%	5%

Fuente: Autores

Al implementar hidrógeno con gasolina súper, los hidrocarburos no combustionados HC en el estudio, aumentaron en un valor porcentual de 2.88% en modo ralentí y en modo crucero en un 1.26%. En cambio, hubo una reducción del monóxido de carbono CO de un 12.70% en ralentí y en modo crucero aumentó en un 1.3%. Y con el dióxido de carbono CO2 en modo ralentí aumentó en un 0.45% y disminuyó en modo crucero en un 0.37%. Los valores porcentuales de oxígeno no tuvieron variación en ambos casos y ambos aprobaron la norma NTE INEN 2204.

IV CONCLUSIONES

. La introducción de combustible súper y HHO produjo una reducción del 12,70% en las emisiones de monóxido de carbono en ralentí, y una disminución del 0,37% en las emisiones de dióxido de carbono en régimen de crucero. Estos valores cumplen con los estándares establecidos por la norma NTE INEN 2204.

La preparación del electrolito se realiza utilizando componentes fácilmente disponibles en el mercado, como el hidróxido de potasio, el bicarbonato, un concentrado de refrigerante y agua común.

El estudio detallado del consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes en vehículos de combustión interna revela la importancia de medidas precisas y realistas en condiciones de conducción reales, destacando la necesidad de protocolos como el WLTP y normativas técnicas como la NTE INEN 2204 para evaluar adecuadamente el rendimiento y el impacto ambiental.

La implementación segura y efectiva de generadores de hidrógeno de celda seca en vehículos requiere precauciones rigurosas y la comprensión completa de los componentes y procedimientos involucrados, subrayando la importancia de la seguridad y la preparación adecuada del electrolito.

Los resultados de las pruebas de consumo y emisiones muestran que la adición de hidrógeno (HHO) a la gasolina súper puede mejorar significativamente la eficiencia del combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes, lo que respalda la viabilidad de esta tecnología como una medida para mitigar el impacto ambiental de los vehículos de combustión interna.

El análisis detallado de la variación en las emisiones de gases revela patrones consistentes de reducción en los niveles de monóxido de carbono (CO) y ligeros cambios en los niveles de dióxido de carbono (CO₂) y hidrocarburos no combustionados (HC), lo que indica una mejora general en la combustión y la eficiencia del sistema.

La validación de los resultados con respecto a las normativas técnicas garantiza la calidad y la confiabilidad de los hallazgos, respaldando la implementación y el desarrollo continuo de tecnologías de reducción de emisiones en vehículos de combustión interna.

Se recomienda continuar investigando y refinando las técnicas de implementación de generadores de hidrógeno en vehículos, así como realizar pruebas adicionales en diversas condiciones de conducción para evaluar su aplicabilidad en diferentes entornos y situaciones.

Para establecer la influencia del HHO en los parámetros del motor, es fundamental que este esté afinado y funcionando correctamente, garantizando la obtención de datos confiables para el análisis.

Es necesario verificar el adecuado funcionamiento del sistema eléctrico del generador de hidrógeno, incluyendo el voltaje, amperaje y resistencias, para evitar problemas de ineficiencia en el reactor o un consumo inadecuado de la batería que pueda afectar el funcionamiento del vehículo.

REFERENCIAS

- [1] Barreto, W., & Jiménez, J. (2013). Análisis del tren alternativo del motor que funciona a hidrógeno versus el motor a gasolina (Tesis Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas). Repositorio Institucional, Latacunga. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7016>
- [2] Castillo, J., Rojas, V., & Martínez, J. (2017). Determinación del Torque y Potencia de un Motor de Combustión Interna a Gasolina Mediante el Uso de Bujía con Sensor de Presión Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático. *Revista Politécnica*, 39(1), 40-58. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/719
- [3] De Antonio, A. R., & Muñoz, M. (2015). Motores de Combustión interna. www.uned.es/Publicaciones. <https://elibro.net/es/lc/espe/titulos/48846>
- [4] De Correa, C., & Hernández, G. (1998). *Combustibles Alternativos*. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 67-77.
- [5] Díaz, Á., González, J., & González, A. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *UIS Ingenierías*, 17(1), 143-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018013>.
- [6] Universidad de las Fuerzas Armadas [@Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga]. (03 de septiembre del 2021). II Congreso de ciencia y tecnología ESPE 2021 con enfoque en ingeniería automotriz y mecatrónica.
- [7] Aimacaña., & Masapanta Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE Departamento de Energía y Mecánica tema: "Implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna 1800 cc opel.