

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL
DEL KIT HHO EN VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INTERNA: ANÁLISIS DE
BARRERAS Y COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS EN EL
CONTEXTO CHILENO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERIA CIVIL

INDUSTRIAL

AUTOR

RICARDO QUIROZ HURTADO

PROFESOR GUÍA

FELIPE ESCUDERO BARROS

VIÑA DEL MAR DE CHILE, 20 DE JULIO DE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: EVALUACIÓN DEL IMPACTO ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL KIT HHO EN VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INTERNA: ANÁLISIS DE BARRERAS Y COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS EN EL CONTEXTO CHILENO

Nombre del candidato(a): RICARDO QUIROZ HURTADO

Carrera / Grado: INGENIERIA CIVIL INDUSTRIAL

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, FELIPE ESCUDERO BARROS, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 08/09/2025 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08/08/2025 ; Firma: 



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Contenido

1	Resumen Ejecutivo.....	3
2	Problema de investigación	5
3	Objetivos	11
3.1	Objetivo General	11
3.2	Objetivos Específicos.....	11
4	Marco Teórico.....	12
4.1	Escenario mundial.....	12
4.2	Escenario Chileno	18
4.2.1	Incremento constante del precio del combustible	20
4.2.2	Contaminación del aire en Chile.....	21
4.2.3	Proyectos y Políticas	22
4.3	Kit generador HHO	22
4.3.1	Componentes del Sistema HHO.....	23
4.3.2	Proceso de Funcionamiento del Kit Generador HHO.....	32
4.3.3	Proceso en el Motor (Ciclo Otto).....	36
4.3.4	Análisis de balance energético global de un vehículo.....	37
4.3.5	Análisis de balance energético global de un vehículo más kit HHO	39
4.3.6	Análisis termodinámico teórico (simulación con Cantera).....	41
4.4	Beneficios del Kit de HHO	48
4.4.1	Reducción del consumo de combustible	48
4.4.2	Reducción de emisiones contaminantes.....	52
4.4.3	Mayor potencia en el motor	56
4.4.4	Limpieza del motor	58
5	Impacto de la Implementación del Sistema HHO en Chile.	59
5.1	Impacto energético en Chile.....	61
5.2	Impacto económico en los habitantes de Chile.....	65
5.3	Impacto ambiental en Chile	70
6	Comparación con otros tipos de transportes sostenibles.....	80
6.1	Comparación de la eficiencia energética:.....	86
6.2	Comparación de impacto ambiental:.....	89
6.3	Comparación económica:.....	93
6.4	Análisis de comparación integrado:.....	95
7	Conclusión.....	97
8	Referencias.....	98

1 Resumen Ejecutivo

La presente investigación evalúa de forma integral el impacto energético, económico y ambiental de la implementación del sistema generador de hidrógeno HHO en vehículos de combustión interna, considerando el contexto tecnológico, económico y medioambiental chileno. Se busca determinar si esta tecnología representa una alternativa de transición viable frente a otras soluciones de transporte sostenible como los vehículos eléctricos, híbridos, a gas o impulsados por hidrógeno puro.

El estudio parte de una problemática crítica: el transporte es responsable de cerca del 33 % de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético chileno, en un contexto de creciente precio de los combustibles, alta contaminación urbana y limitada adopción de tecnologías limpias. Bajo este escenario, el kit HHO basado en la generación de gas oxihidrógeno mediante electrólisis y su incorporación en el proceso de combustión se presenta como una tecnología de bajo costo y sencilla implementación que podría mejorar la eficiencia térmica del motor y reducir las emisiones sin requerir cambios estructurales en el parque vehicular existente.

Desde el punto de vista energético, simulaciones termodinámicas con Cantera y estudios experimentales indican que la incorporación de HHO permite aumentar la temperatura adiabática de combustión y reducir pérdidas energéticas, con ahorros de combustible entre un 10 % y 30 % por vehículo. A escala país, y según distintos escenarios de adopción, esto se traduce en una reducción de hasta 1.208 millones de litros de bencina por año.

En términos económicos, el sistema muestra una alta rentabilidad para el usuario promedio. Con un costo de inversión cercano a \$400.000 CLP y una vida útil de cinco años, el kit se amortiza entre el primer y segundo año, generando ahorros netos anuales superiores a los \$140.000 CLP incluso en escenarios conservadores. Esta característica lo convierte en una de las soluciones más accesibles y de más rápida adopción.

A nivel ambiental, los beneficios proyectados son significativos: reducciones anuales de hasta 8,9 millones de toneladas de CO₂, 903 mil toneladas de monóxido de carbono (CO), y mejoras en la calidad del aire urbano al disminuir también hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos impactos posicionan al kit HHO como una herramienta concreta de mitigación frente a los efectos del cambio climático y la contaminación local.

Finalmente, el estudio realiza una comparación técnica entre el sistema HHO y otras alternativas sostenibles. Aunque tecnologías como los vehículos eléctricos o los FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles) ofrecen mejores rendimientos en el largo plazo, su implementación en Chile enfrenta barreras de costo, infraestructura y disponibilidad. En este marco, el kit HHO destaca como una tecnología de transición eficaz, con impacto inmediato, costo contenido y alta escalabilidad, capaz de integrarse al parque automotor actual sin exigir reformas estructurales.

2 Problema de investigación

El uso de vehículos de combustión interna ha sido una constante en la sociedad moderna desde principios del siglo XX. Sin embargo, este tipo de vehículos es uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental, tanto a nivel global como local. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), el sector transporte es responsable del 24% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con el uso de energía [1]. En Chile, la situación no es distinta, Según datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (2018) [2], el sector energético en Chile fue responsable de aproximadamente el 77 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI), equivalentes a 86.954 kilotoneladas de CO₂ equivalente (kt CO₂ eq). Dentro de este sector, el transporte representa un 33 %, lo que implica emisiones cercanas a 28.614 kt CO₂ eq en dicho año, como lo señala la Tabla 1 y se estima que esta cifra ha seguido aumentando, según la tendencia del Gráfico 1, en línea con el crecimiento del parque vehicular y la creciente demanda de transporte a nivel nacional.

Tabla 1 Sector Energía: emisiones de GEI (kt CO₂ eq) por subcategoría

Subcategoría	1990	2000	2010	2013	2016	2017	2018
1.A.1. Industrias de la energía	9.377,0	15.192,4	25.845,9	32.932,9	35.449,7	35.152,5	33.746,1
1.A.2. Industrias manufactureras y de la construcción	8.612,8	12.492,5	12.305,0	15.092,7	15.945,0	15.619,9	15.678,4
1.A.3. Transporte	9.099,6	17.194,6	20.513,1	24.352,7	26.399,2	27.333,6	28.614,7
1.A.4. Otros sectores	3.976,2	5.244,1	6.658,6	6.226,8	7.313,3	7.746,6	7.902,0
1.A.5. No especificado	-	-	18,6	140,8	8,8	10,9	4,2
1.B.1. Combustibles sólidos	855,5	131,8	71,0	163,6	137,2	114,8	92,8
1.B.2. Petróleo y gas natural	1.685,0	1.456,7	1.164,7	955,7	915,5	891,9	887,3
Total	33.605,9	51.712,1	66.576,9	79.865,2	86.168,7	86.870,3	86.925,4

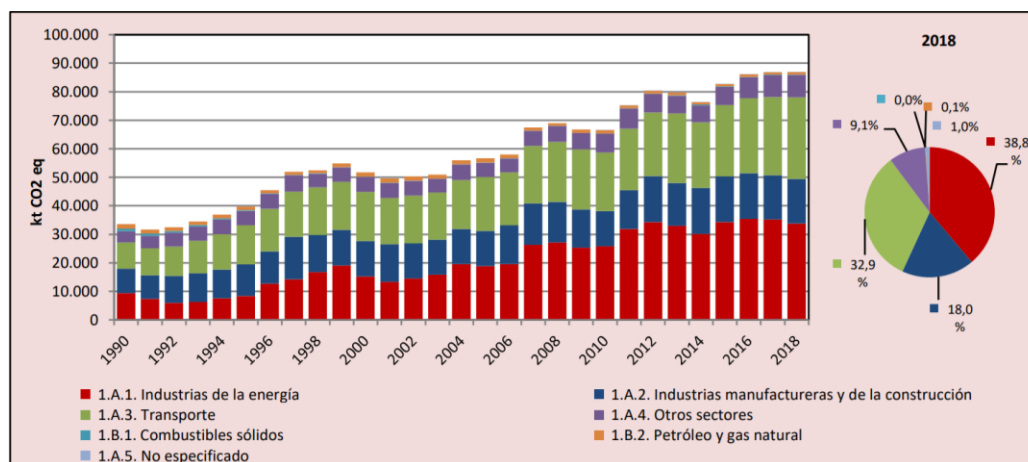


Gráfico 1 Sector Energía: emisiones de GEI (kt CO₂ eq) por subcategoría, 1990-2018

Además, destaca la Región Metropolitana de Santiago como el principal foco emisor, concentrando aproximadamente el 22 % de las emisiones nacionales, lo que la posiciona como la zona más crítica en términos de contaminación atmosférica vinculada al transporte [3]. Esta situación no solo tiene un impacto ambiental considerable, sino que también conlleva serias consecuencias para la salud pública, particularmente en áreas urbanas densamente pobladas. Según el informe "Estado del Aire Global 2024" la contaminación atmosférica causó 8,1 millones de muertes a nivel mundial en 2021, convirtiéndose en el segundo factor de riesgo de muerte, incluso en niños menores de cinco años [4]. En este contexto, de acuerdo con el último reporte de Lancet Countdown Sudamérica, Chile y Perú se posicionan como las naciones con mayor tasa de mortalidad prematura atribuible a la exposición sistemática a la contaminación del aire, siendo Chile quien encabeza este ranking, según se observa en la Figura 1, con alrededor de 200 muertes por millón de habitantes [5], lo que evidencia la gravedad y urgencia del problema, tanto desde una perspectiva sanitaria como social.

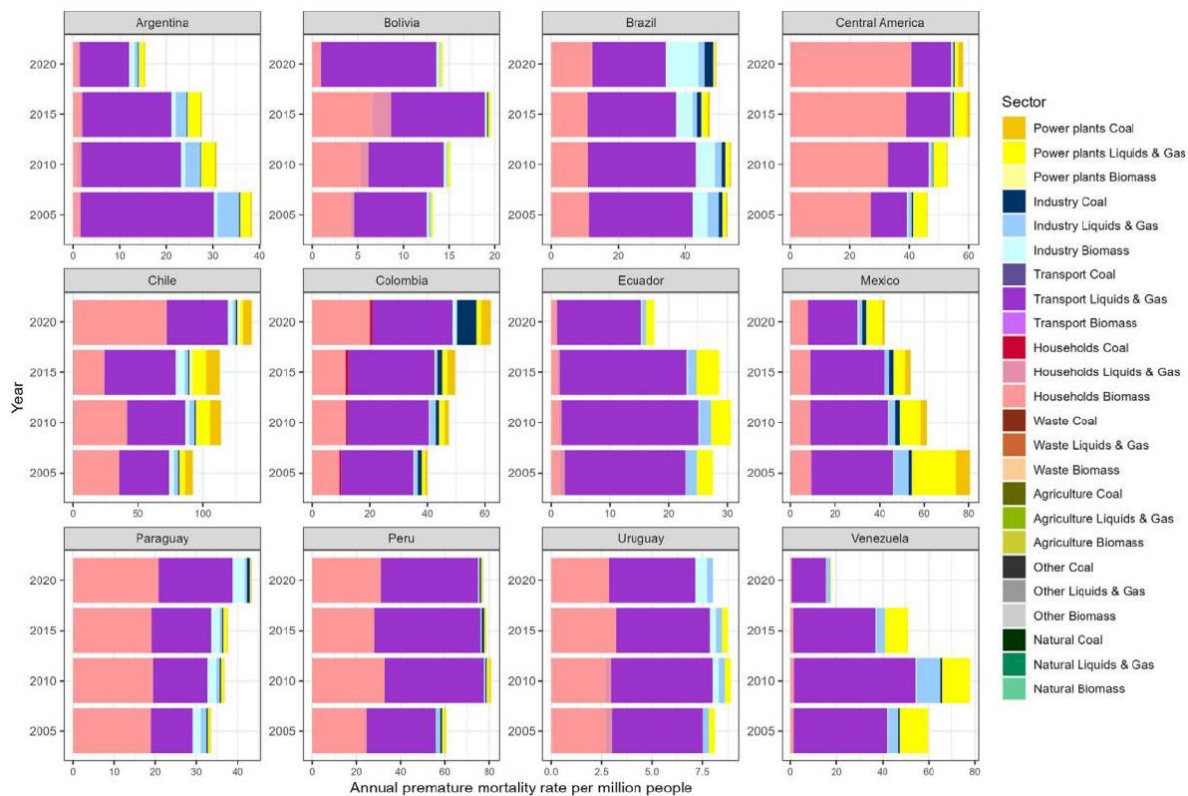


Figura 1 Estimación de mortalidad prematura atribuible a PM_{2.5} desde 2005 a 2020 en los países de latino América

En relación con lo anterior, y considerando que la industria del transporte es uno de los sectores que más contribuye a la contaminación ambiental, donde el 99,8 % de los vehículos utiliza combustibles fósiles (73,0 % exclusivamente bencina y 26,8 % diésel) [6], es relevante destacar que el motor de combustión interna presenta una baja eficiencia energética, convirtiendo solo el 25-30% del combustible en energía mecánica útil, la energía de combustión que no se convierte en trabajo mecánico se pierde en las etapas ilustradas en la Figura 2 [7]:

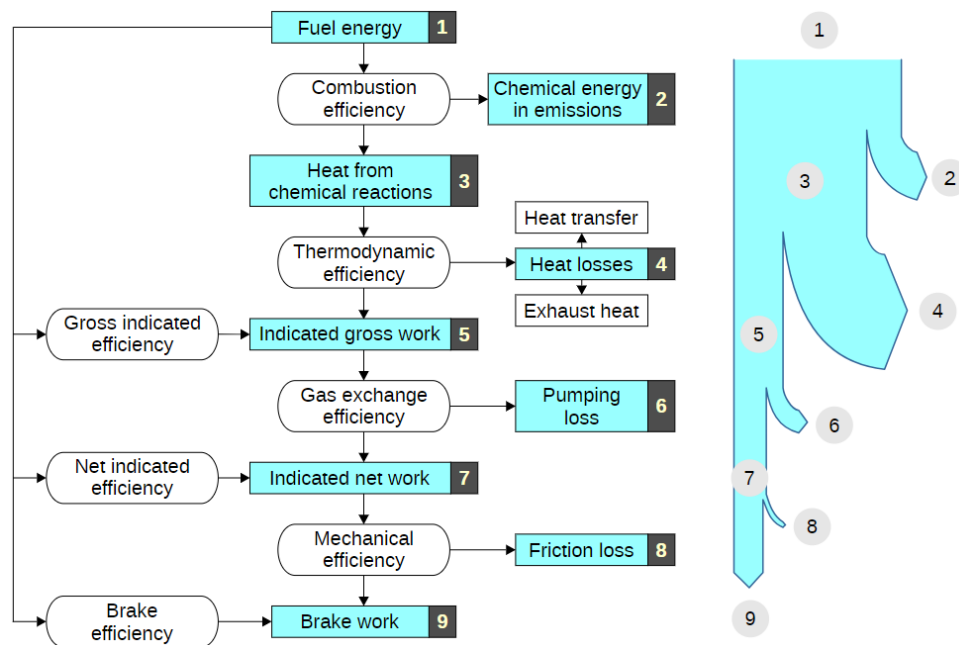


Figura 2 Resumen de las pérdidas de energía en un motor de combustión interna típico

- **Emisiones químicas (2):** Parte de la energía del combustible se libera en forma de compuestos no completamente quemados, reduciendo la eficiencia de combustión.
- **Transferencia de calor (4):** Una fracción importante se pierde como calor disipado al sistema de refrigeración y a los gases de escape, disminuyendo la eficiencia termodinámica.
- **Pérdidas de bombeo (6):** La energía se consume en el trabajo necesario para aspirar y expulsar los gases dentro del motor.
- **Pérdidas por fricción (8):** Otra parte se pierde superando la fricción interna entre componentes mecánicos, reduciendo la eficiencia mecánica.

Estas pérdidas no solo implican un desaprovechamiento energético, si no que en consecuencia afecta a la economía de las personas.

A nivel global, el hidrógeno se ha convertido en un elemento clave dentro de las energías limpias, siendo usado tanto en sectores industriales como en el transporte. En Chile, el hidrógeno ha ganado relevancia en los últimos años con la creación de varias plantas piloto de hidrógeno verde. Estas plantas, como la de Haru Oni en Magallanes, están alineadas con los esfuerzos del gobierno chileno para convertirse en uno de los principales exportadores de hidrógeno verde en el futuro, aprovechando sus recursos naturales favorables, como el viento y la radiación solar [8]. No obstante, la aplicación de esta tecnología en el transporte sigue siendo limitada, y en vehículos convencionales es prácticamente nula.

Una de las posibles soluciones para mitigar los problemas asociados a la contaminación y la baja eficiencia de los motores de combustión interna es la utilización de hidrógeno a través de sistemas como el “kit generador HHO”. Este sistema consiste en celdas electrolíticas que separan el agua en hidrógeno y oxígeno, incorporando posteriormente el hidrógeno en el proceso de combustión del motor. Diversos estudios que expondremos más adelante afirman que esta tecnología podría mejorar la eficiencia del motor entre un 15 % y 30 %, y reducir las emisiones contaminantes entre un 15 % y 40 %.

Este kit generador HHO que ha surgido en los últimos años se puede incorporar a los vehículos sin necesidad de realizar modificaciones extremas, sus componentes, tal como se observa en la Figura 3, tienen dimensiones menores a una batería convencional. Actualmente se comercializa en varios países a través de diferentes distribuidores y fabricantes. No existe una lista exhaustiva de todos los países donde se venden, pero su uso y venta están extendidos en muchos lugares donde existe interés en la tecnología de hidrógeno, como China, España, Estados Unidos, Alemania, Francia entre otros.



Figura 3 Ejemplo de Kit generador HHO, de Hydrox Systems

Sin embargo, a pesar de su disponibilidad, no existen estudios sobre los beneficios reales que podría tener este “kit generador HHO” al implementarse de forma masiva en Chile, lo que plantea una importante interrogante. Si este sistema es tan efectivo, ¿por qué no se utiliza masivamente en la actualidad?, para ello es crucial plantearse las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el impacto del “kit generador HHO” en la eficiencia energética de los motores de combustión interna?
2. ¿Qué barreras económicas y técnicas limitan la adopción masiva de estos sistemas en Chile?
3. ¿Qué niveles de reducción en emisiones contaminantes (CO_2 , NO_x , material particulado) se pueden alcanzar al implementar el “kit generador HHO” en vehículos de combustión interna?
4. ¿Cómo se comparan la implementación de este kit, en términos de eficiencia energética, emisiones y costos, con otras tecnologías sostenibles como vehículos eléctricos o impulsados por hidrógeno puro?

Las variables para estudiar en la implementación de sistemas de generación de hidrógeno en vehículos de combustión interna son fundamentales para evaluar su impacto y dar respuesta a las preguntas antes planteadas. En primer lugar, se analizará la eficiencia energética, considerando variables como el consumo específico de combustible (litros/100 km), el rendimiento térmico (%) y la potencia neta entregada por el motor (kW). En segundo lugar, se cuantificará la reducción de emisiones, mediante variables como la concentración de CO₂ (g/km), NO_x (g/km) y material particulado (mg/km) emitidos por los vehículos que utilizan estos sistemas. Asimismo, se realizará un análisis de costos, evaluando variables como costo de adquisición e instalación del sistema HHO (CLP), ahorro anual estimado en combustible (CLP), y costos de mantenimiento (CLP/año). Y, por último, para realizar una comparación objetiva entre el “kit generador HHO” y otras tecnologías se utilizarán variables como consumo energético (L/100 km, kWh/100 km, kg H₂/100 km), emisiones de CO₂ y otros contaminantes (g/km), costos de adquisición y operación (CLP), autonomía por carga o repostaje (km), y disponibilidad de infraestructura. Estas variables permiten establecer un análisis técnico y económico que ayude a determinar la viabilidad y potencial adopción de cada tecnología en el contexto chileno.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar el impacto energético, económico y ambiental de la implementación del kit generador HHO en motores de combustión interna, con el objetivo de determinar si puede representar una alternativa más económica, y a corto plazo para reducir tanto el consumo de combustible como las emisiones contaminantes, en comparación con otras tecnologías, en el contexto del transporte chileno.

3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la eficiencia energética de un motor de combustión interna que incorpora el kit generador de hidrógeno en comparación con uno tradicional, para determinar su viabilidad en términos de ahorro de combustible.
2. Evaluar la viabilidad financiera de implementar sistemas de generación de hidrógeno en motores de combustión interna, considerando los costos iniciales y los ahorros derivados de un menor consumo de combustible, con el fin de establecer su rentabilidad económica.
3. Cuantificar la reducción de emisiones contaminantes (CO_2 , NO_x , $\text{PM}_{2.5}$) asociadas a la implementación del sistema de generación de hidrógeno en vehículos de combustión interna, para evaluar su impacto ambiental.
4. Comparar la efectividad de los sistemas de generación de hidrógeno con tecnologías alternativas como motores de hidrógeno puro y vehículos eléctricos, para determinar cuál es la opción más viable y sostenible para el sector transporte en Chile.

4 Marco Teórico

4.1 Escenario mundial

En el contexto global de la transición energética, el hidrógeno ha surgido como una de las tecnologías más prometedoras para descarbonizar sectores intensivos en emisiones, incluido el transporte. Aunque su uso en la industria y en aplicaciones estacionarias ha avanzado, la adopción del hidrógeno en vehículos, especialmente mediante tecnologías como los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV), enfrenta desafíos técnicos, económicos y de infraestructura. A continuación, se presenta un panorama actual del mercado mundial de FCEV, sus principales actores y las tendencias recientes [9].

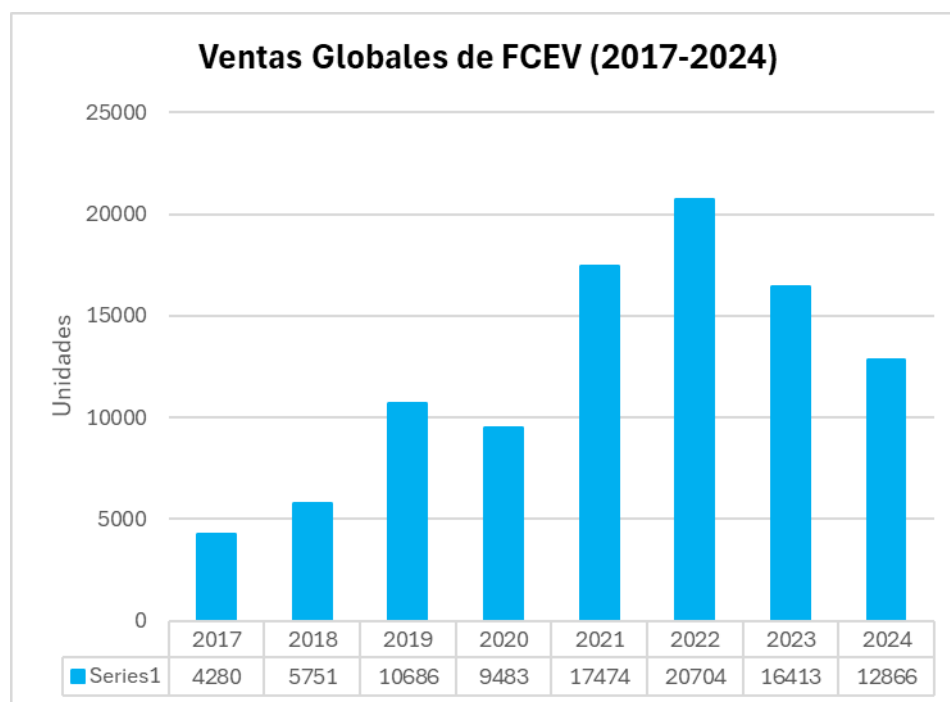


Gráfico 2 Seguimiento mensual global de vehículos de pila de combustible (FCEV) – enero de 2025, SNE Researc.

En 2024, el mercado mundial de vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) registró una caída interanual del 21,6 %, con 12.866 unidades vendidas a nivel global; esta tendencia se visualiza claramente en el Grafico 2.

Hyundai Motor Group mantuvo el liderazgo, vendiendo 3.836 unidades de sus modelos NEXO y ELEC CITY, aunque sufrió una caída del 23,5 %, principalmente por la disminución de ventas del NEXO en Corea. Toyota ocupó el segundo lugar con 1.917 unidades de Mirai y Crown, experimentando una fuerte baja del 50,1 % interanual. En contraste, fabricantes chinos mostraron ventas estables, especialmente en vehículos comerciales, como se resume en la Tabla 2 [9].

Tabla 2 Seguimiento mensual global de vehículos de pila de combustible (FCEV) – enero de 2025, SNE Research

Ventas Globales de FCEV (2023 y 2024)			
Vendedor	2023	2024	índice de Crecimiento
HYUNDAI	5,012	3,836	-23.5%
TOYOYA	3,839	1,917	-50.1%
YUTONG	1,193	1,137	-4.7%
Comercio China	6,369	5,976	-6.2%
Total	16,413	12,866	-21.6%

En referencia a los países, Corea concentró el 29,8 % del mercado, pero también vio una caída del 23,5 %. China avanzó como líder, impulsada por el crecimiento sostenido en vehículos comerciales de hidrógeno. Europa y EE. UU. también sufrieron bajas en ventas, mientras que Japón fue la única región que mostró crecimiento, con un aumento del 61,8 % gracias a la introducción de nuevos modelos como el Toyota Crown [9].

Los países líderes en la adopción de vehículos de hidrógeno incluyen a Corea del Sur, con 19,270 vehículos (2024), y Estados Unidos, con 12,283 vehículos (2024). Estos vehículos representan el 82% del total de vehículos de hidrógeno, seguidos por autobuses (9.2%) y camiones (8.7%) [10].

Desde su auge en 2022, el mercado de FCEV ha caído dos años consecutivos. Los principales desafíos que enfrenta esta tecnología incluyen la escasez de infraestructura de carga, los altos costos de producción y almacenamiento de hidrógeno, y la necesidad de mejorar la

viabilidad económica. Para revertir esta tendencia, se considera clave expandir la infraestructura, fomentar el mercado de vehículos comerciales y fortalecer la colaboración público-privada, lo que podría consolidar a los FCEV como una tecnología relevante en la transición hacia la neutralidad de carbono.

En este contexto, Japón ha establecido una meta ambiciosa de tener 800,000 vehículos de hidrógeno en circulación para 2030. Alemania, a través de su “Programa Nacional de Innovación en Tecnología del Hidrógeno y Pilas de Combustible”, ha financiado numerosos proyectos de investigación y desarrollo para fomentar la adopción de esta tecnología. En Estados Unidos, la iniciativa “H2@Scale” del Departamento de Energía busca integrar el hidrógeno en múltiples sectores económicos, incluyendo el transporte [11].

El hidrógeno tiene el potencial de contribuir significativamente a la transformación del sistema energético global, ya que durante su uso no produce emisiones directas de gases contaminantes ni de dióxido de carbono, lo que lo convierte en un vector energético atractivo para aplicaciones industriales, transporte y generación de energía [1]. Entre sus ventajas, destaca su alta densidad energética por unidad de masa (120-142 MJ/kg), lo que permite, en teoría, ofrecer una autonomía vehicular similar o superior a la de los combustibles fósiles (47.16 MJ/kg), así como tiempos de recarga más cortos en comparación con la carga de vehículos eléctricos. Además, En el caso del hidrógeno, el riesgo de una explosión es mucho menor que otros combustibles más habituales ya que se vuelve explosivo en concentraciones entre el 18,3% y el 59% En comparación, los vapores de gasolina pueden explotar en concentraciones de poco más del 1% [12]. A esto hay que añadir que, mientras el hidrógeno tiende a subir y dispersarse en el ambiente dado que es hidrógeno 14 veces más ligero que el aire (densidad relativa de 0.07 [13], otros gases más pesados como el propano o los vapores de la gasolina tienden a acumularse cerca del suelo, lo que aumenta el riesgo de una explosión, lo que en algunos contextos de seguridad puede reducir el riesgo de explosiones en espacios abiertos.

No obstante, también presenta desventajas importantes, ya que es un gas que tiene un rango de inflamabilidad muy amplio (entre el 4% y el 74% de concentración en el aire) y requiere muy poca energía (0.02 mJ) para iniciar la combustión [12], además requiere almacenamiento a altas presiones (hasta 700 bar) o en estado líquido a temperaturas extremadamente bajas ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), y sus sistemas de manejo y transporte implican costos adicionales y desafíos técnicos en materia de seguridad [14].



Figura 4 The Hindenburg Accident: A Tragic Catastrophe

A esto se suma la percepción de riesgo por parte de los usuarios, debido a antecedentes de accidentes históricos de alto impacto mediático, como el del dirigible Hindenburg, ver Figura 4 [15]. Esta percepción, aunque en parte desactualizada frente a los avances en materiales, sistemas de detección y protocolos de seguridad industrial, sigue siendo un factor limitante para su aceptación masiva en aplicaciones de transporte.

El hidrógeno se clasifica por colores en función de su proceso de producción y las emisiones asociadas como se resume en la Figura 5. Los tipos más comunes son el gris, producido a partir de gas natural sin captura de CO₂, lo que implica altas emisiones; el azul, que también proviene del gas natural, pero con tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, reduciendo parcialmente su impacto ambiental; y el verde, generado mediante electrólisis alimentada por energías renovables, considerado el más limpio ya que no produce emisiones directas, aunque actualmente es el más costoso. Esta clasificación permite diferenciar el hidrógeno según su viabilidad económica y su contribución a la descarbonización, aspectos clave para su uso en el sector transporte y otras aplicaciones industriales

El pantone del hidrógeno

Tipos según la tecnología empleada en su producción

Autor:
Álvaro Merino (2022)
*El hidrógeno amarillo también puede referirse a aquel que es generado con fuentes mixtas

	NEGRO	MARRÓN	GRIS	AZUL	TURQUESA	ROSA	VERDE	AMARILLO	BLANCO
Fuente de energía 	Carbón bituminoso	Lignito	Hidrocarb. (gas natural principalmente)	Hidrocarb. (gas natural)	Hidrocarb. (gas natural)	Energía nuclear	Renovables	Energía solar*	Presente de por sí en la naturaleza
Proceso más usado 	Gasificación de carbón	Gasificación de carbón	Extracción con vapor (reformado)	Extracción con vapor	Pirólisis (descomposición mediante calor)	Electrólisis (separación mediante electricidad)	Electrólisis	Electrólisis	En exploración
Emisiones asociadas 	Muy altas	Muy altas	Altas	Medias (incluye sistemas de captura de carbono)	Bajas (carbono sólido, sin CO ₂)	Bajas	Bajas o nulas	Bajas o nulas	Nulas
	Tipos que emplean combustibles fósiles		El hidrógeno gris y azul son los más producidos en la actualidad			El hidrógeno rosa, verde y amarillo son los más eficientes y factibles de desarrollar a medio plazo			

EOM
elordenmundial.com

Figura 5 Tipos de Hidrógeno según la tecnología empleada en su producción, El Orden Mundial 2022

El transporte es responsable de aproximadamente el 24% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂). Como se muestra en la Figura 6, el 74,5 % de las emisiones del sector transporte corresponden a vehículos terrestres, de estos, los automóviles y furgonetas representan alrededor del 12% de las emisiones totales de CO₂ [16]. Esto subraya la importancia de abordar las emisiones de los vehículos para combatir el cambio climático.

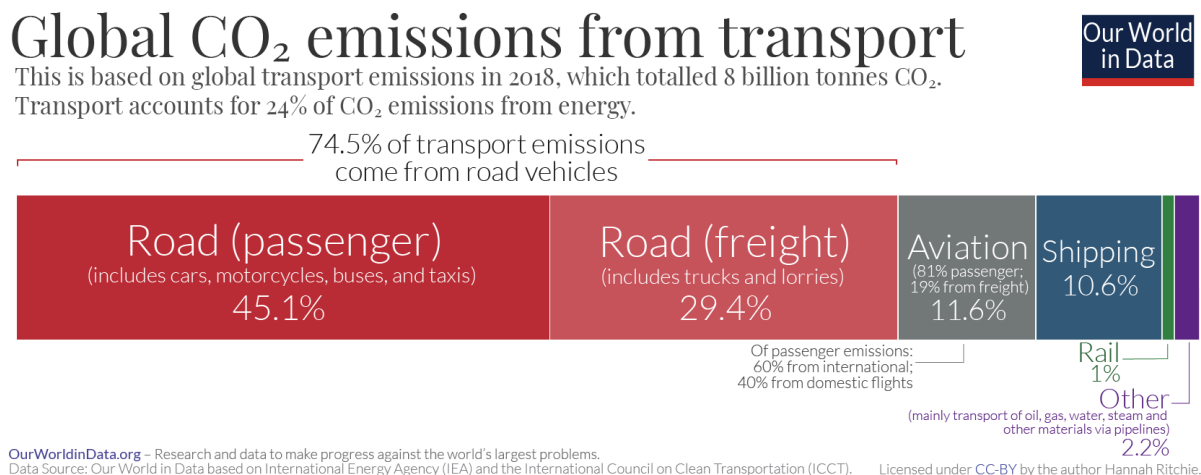


Figura 6 Global CO₂ emission from transport

A nivel mundial, el “kit generador HHO” se ha comercializado principalmente en países como Estados Unidos, Alemania, Italia y España, dirigido a usuarios de vehículos de combustión interna que buscan reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Estos kits producen gas oxihidrógeno (HHO), una mezcla de hidrógeno y oxígeno generada mediante electrólisis del agua, que se inyecta en el sistema de admisión del motor. El principio técnico que respalda esta tecnología es que el hidrógeno, por su alta velocidad de llama y bajo requerimiento de energía de ignición, puede mejorar la combustión del hidrocarburo, favoreciendo una combustión más completa [17] [18].

Si bien algunos estudios han reportado reducciones moderadas en el consumo de combustible y en emisiones contaminantes, la evidencia científica aún no es concluyente sobre su eficacia en condiciones reales de uso, especialmente considerando factores como el balance energético global del vehículo. Sin embargo, la falta de estudios específicos en diferentes

contextos geográficos, condiciones de operación y tipos de motores deja abierta la necesidad de evaluar esta tecnología en escenarios particulares, como el caso chileno, donde las condiciones del parque vehicular, los costos de combustible y las metas de reducción de emisiones podrían hacer viable explorar alternativas intermedias como el kit HHO.

4.2 Escenario Chileno

Chile se ha posicionado como un referente en el desarrollo del hidrógeno verde, gracias a sus excepcionales recursos de energía renovable, particularmente solar en el norte y eólica en el sur del país, como se muestra en la Figura 7. Estos sectores están madurando aceleradamente, y en solo seis años, el país ha quintuplicado su capacidad de generación eléctrica proveniente de estas fuentes [19]. Se proyecta que, hacia el año 2030, hasta un 70 % de la matriz eléctrica chilena sea renovable, respaldada por una creciente inversión en energías limpias, sistemas de almacenamiento e infraestructura de transmisión.

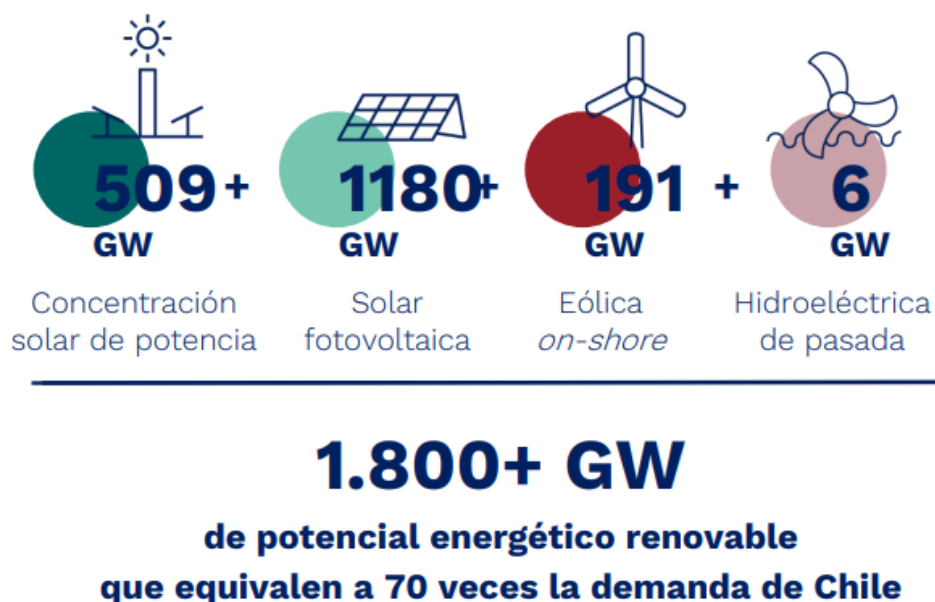


Figura 7 Potencial energético de Chile.

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, lanzada en noviembre de 2020, establece como objetivo posicionar a Chile como el productor de hidrógeno verde más competitivo del

mundo para 2030 y convertirlo en uno de los principales exportadores globales, con una producción proyectada de hasta 25 gigawatts (GW) de electrólisis instalada, como se muestra en la Figura 8 [19]. Esta estrategia contempla tres ejes principales: escalamiento de la producción y reducción de costos, desarrollo del mercado local incluyendo aplicaciones en transporte, minería e industria, y el impulso de la exportación de hidrógeno y sus derivados. Para lograr estos objetivos, el plan incluye la creación de plantas piloto, el desarrollo de infraestructura portuaria y logística, la formación de capital humano especializado, y la promoción de marcos regulatorios claros y estables.



Figura 8 Metas al año 2030, según la estrategia nacional de hidrógeno verde.

No obstante, Chile enfrenta desafíos relevantes, como la necesidad de inversión en infraestructura, la competencia global por liderazgo tecnológico, y las brechas regulatorias que aún persisten. A pesar de ello, el país identifica una gran oportunidad en el hidrógeno verde para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar su matriz energética y potenciar su economía a través de nuevos mercados de exportación, especialmente en sectores como el transporte pesado y la industria química. A continuación, se presentan tres aspectos clave que influyen en el escenario chileno: el incremento constante del precio de los combustibles fósiles, la contaminación del aire y las políticas y proyectos implementados para mitigar estos problemas.

4.2.1 Incremento constante del precio del combustible

En los últimos 10 años, el precio del combustible en Chile ha mostrado una tendencia al alza debido a diversos factores económicos y globales, como se observa en el Gráfico 3. En 2015, el precio promedio de la bencina de 95 octanos era de aproximadamente \$748 por litro. Para 2025, este precio ha superado los \$1,300 por litro en varias regiones del país. Este incremento se debe al aumento del precio del petróleo a nivel mundial, la depreciación del peso chileno frente al dólar y las políticas fiscales internas. Además, el Fondo de Estabilización de Precios del Petróleo (FEPP) y el Mecanismo de Estabilización de Precios de Combustibles (MEPCO) han mitigado las fluctuaciones extremas, aunque no han podido evitar completamente las alzas. En 2025, el precio promedio de la bencina de 95 octanos en la Región Metropolitana alcanzó los \$1,285 por litro, mientras que, en regiones como Aysén, los precios superaron los \$1,400 por litro [20]. Este aumento en el costo del combustible es evidente, y tiene un efecto directo en el gasto económico de los usuarios chilenos.



Gráfico 3 Precio de litro de gasolina en USD en los últimos 10 años- Comisión Nacional de Energía, Chile

4.2.2 Contaminación del aire en Chile

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la contaminación atmosférica es uno de los principales desafíos ambientales del país. Los automóviles, camiones y autobuses contribuyen significativamente a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}), dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono troposférico (O_3). Estos contaminantes son especialmente dañinos para la salud, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar enfermedades respiratorias y cardiovasculares [21]. En Santiago, es común observar una capa de nubosidad de contaminación, ver Figura 9, especialmente durante los meses de invierno, debido a la inversión térmica que atrapa los contaminantes cerca del suelo. Sin embargo, otras regiones del país, como Valparaíso y Concepción, también enfrentan problemas significativos de calidad del aire debido al tráfico vehicular y las actividades industriales. En 2024, se registraron 322 horas en episodios críticos por material particulado 2.5 ($\text{PM}_{2.5}$) en la Región Metropolitana, con 5 preemergencias y 19 alertas ambientales [22].



Figura 9 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (2023), Contaminación del aire por $\text{PM}_{2.5}$ mata a más de 4.000 personas al año en Chile

4.2.3 Proyectos y Políticas

El gobierno chileno ha implementado diversas iniciativas para fomentar el uso del hidrógeno en el sector del transporte. Estas iniciativas incluyen incentivos fiscales, subsidios para proyectos de investigación y desarrollo, y la creación de infraestructura necesaria para la producción y distribución de hidrógeno verde [19]. Además, se han establecido programas específicos para la renovación de flotas de transporte público y privado, promoviendo la adopción de vehículos más limpios y eficientes. Empresas de transporte de carga están explorando activamente el uso de camiones impulsados por hidrógeno verde, con el objetivo de reducir las emisiones en sus flotas y contribuir a la descarbonización del sector del transporte en Chile [23]. Estas medidas no solo buscan mejorar la calidad del aire y reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino también como se mencionó anteriormente, posicionar a Chile como un líder en la producción y uso de hidrógeno verde a nivel mundial.

En Chile, los “kits generadores HHO” aún no se comercializan. Es en este contexto donde se busca evaluar los impactos de estos sistemas en el país, considerando sus potenciales beneficios en términos de eficiencia del combustible y reducción de emisiones contaminantes.

4.3 Kit generador HHO

El sistema de hidrógeno HHO, también conocido como generador de hidrógeno HHO, es un dispositivo que utiliza el proceso de electrólisis para descomponer el agua en sus componentes básicos: hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). El gas resultante, conocido como gas HHO o gas Brown, se introduce en la admisión de aire de un motor de combustión interna, añadiéndolo a la mezcla habitual de aire y carburante.

4.3.1 Componentes del Sistema HHO

Celda de Electrólisis

Función: separar del agua en hidrógeno y oxígeno.

Descripción: este dispositivo está compuesto por múltiples placas de acero inoxidable dispuestas en paralelo, separadas entre sí mediante juntas de caucho que mantienen la distancia y aseguran la estanqueidad. Las placas están contenidas en una estructura fabricada normalmente de planchas de metacrilato, que proporcionan aislamiento eléctrico y resistencia mecánica. Cada placa posee agujeros comunicantes para permitir el flujo uniforme del electrolito a través de toda la celda. La Figura 10 muestra un esquema representativo del diseño típico de una celda generadora de HHO, donde se pueden identificar sus principales componentes y rutas de circulación del electrolito y del gas generado. La celda cuenta con una entrada de electrolito, que introduce la solución conductora (habitualmente agua con KOH o NaOH disuelto), y una salida de gas y electrolito, por donde se evacua el gas HHO generado. El número de placas puede variar significativamente, habitualmente entre 7 y más de 21, lo cual influye en la superficie activa para la electrólisis y, en consecuencia, en la cantidad de gas producido.

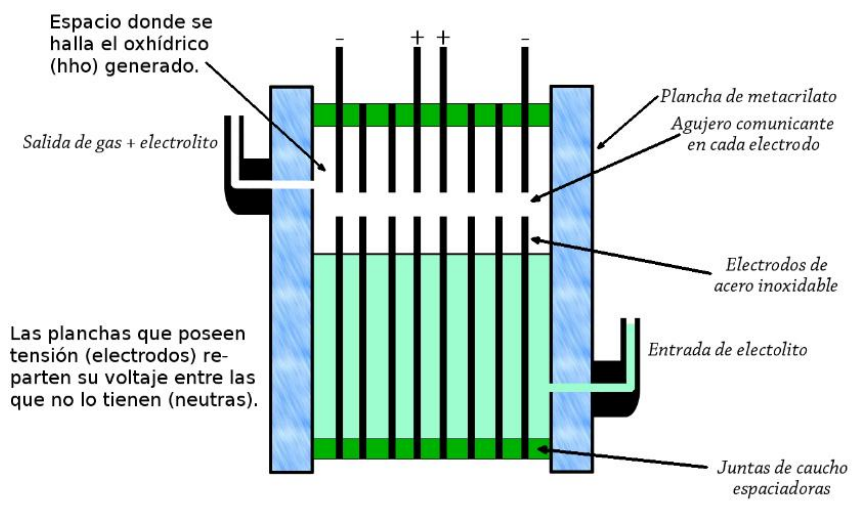
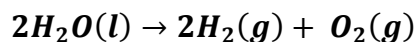


Figura 10 Generador de hidrógeno HHO. Fuente: *Hidrógeno como Solución*. (n.d.). El generador. Recuperado de <https://hidrogenocomosolucion.wordpress.com/el-generator/>

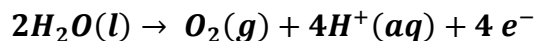
Funcionamiento: el principio de la celda seca generadora de HHO se basa en la electrólisis del agua, un proceso electroquímico en el cual se aplica corriente continua (DC) para disociar las moléculas de agua (H₂O) en sus elementos constituyentes: hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).

La reacción global es:



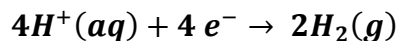
En una celda, las placas están dispuestas de forma paralela, separadas por juntas aislantes, y se dividen en tres tipos:

- 1. Placas conectadas al polo positivo (ánodo):** en estas placas, ocurre la reacción de oxidación:



Aquí se liberan electrones hacia el circuito externo, y se desprende oxígeno gaseoso.

- 2. Placas conectadas al polo negativo (cátodo):** en estas placas, ocurre la reacción de reducción:



Aquí, los protones se combinan con electrones que ingresan del circuito para formar hidrógeno gaseoso.

- 3. Placas neutras:** son láminas que, aunque no están conectadas directamente a los polos positivo o negativo, cumplen una función técnica fundamental: dividen el voltaje total aplicado en la celda en porciones menores y uniformes entre cada espacio interplaca. Esto permite que, en lugar de aplicar, por ejemplo, 12 V entre solo dos placas, el voltaje se distribuya de manera equitativa entre múltiples espacios [24], logrando valores interplaca cercanos al potencial óptimo de electrólisis (~1,8 a 2,2 V).

Aunque eléctricamente no están conectadas, las placas neutras se polarizan por inducción electrostática, generando diferencias de potencial entre cada par de placas adyacentes. Así, cada espacio entre placas funciona como una microcelda electrolítica independiente, en la que se producen reacciones simultáneas de oxidación en el lado positivo y reducción en el lado negativo. En este proceso:

- Los electrones circulan a través del circuito eléctrico externo y de las placas metálicas conectadas.
- Los iones (H^+ y OH^-) se desplazan a través del electrolito, liberando gas hidrógeno y oxígeno en múltiples puntos de la celda.

Este diseño permite que la celda trabaje con menor corriente total para producir la misma cantidad de gas, ya que se aumenta la superficie activa de electrólisis y se optimiza el uso de la energía eléctrica suministrada [24].

La producción de gas HHO mediante electrólisis se fundamenta en la Ley de Faraday, la cual establece que la cantidad de sustancia generada en un proceso electrolítico es proporcional a la carga eléctrica aplicada. Esta fórmula ha sido aplicada en estudios experimentales, como el de Rusdianasari et al. (2019), en el contexto de producción de gas HHO mediante electrólisis [25], demostrando su utilidad para estimar con precisión la cantidad de gas generado a partir de variables eléctricas básicas como la corriente y el tiempo de operación.

Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Q}{z \times F} = \frac{I \times t}{z \times F} \quad (1)$$

Donde:

- n = moles de gas generado.
- Q = carga eléctrica total (Coulombs).
- z = número de electrones transferidos ($z = 2$ para H_2).
- F = constante de Faraday ≈ 96.485 C/mol.
- I = corriente (A).
- t = tiempo (s).

A partir de esta relación, es posible estimar el volumen de gas producido considerando el volumen molar estándar (22,4 L/mol a 0 °C y 1 atm), mediante la siguiente expresión:

$$V_{gas} = \frac{I \times t \times 22.4}{2 \times F} \quad (2)$$

Es decir, la cantidad de gas producido es directamente proporcional a la corriente y al tiempo, e inversamente proporcional al número de electrones requeridos para la reacción. Esto significa que, cuantas más placas activas y más superficie expuesta al electrolito, mayor será la producción de HHO a igualdad de corriente.

La reacción de electrólisis presenta una entalpía estándar $\Delta H \approx 286$ kJ/mol, que es la energía mínima teórica necesaria para disociar agua [25]. Sin embargo, en condiciones reales, se requieren voltajes mayores a 1,23 V debido a:

- Sobrepotenciales en los electrodos.
- Resistencia eléctrica del electrolito y materiales.
- Generación de calor.

Esto eleva el consumo energético a rangos entre 1,8 y 2,2 V por espacio interplaca. La eficiencia global de la celda depende, por tanto, de:

- Diseño geométrico (número de placas neutras).
- Calidad del material de los electrodos.
- Conductividad del electrolito.
- Temperatura de operación.

En relación con lo expuesto, la celda (ver Figura 11) está diseñada para modular la tensión y distribuirla eficientemente, lo que permite generar gas HHO de forma más controlada y eficiente, aunque siempre con el desafío de equilibrar el consumo eléctrico adicional que representa para el sistema del vehículo.

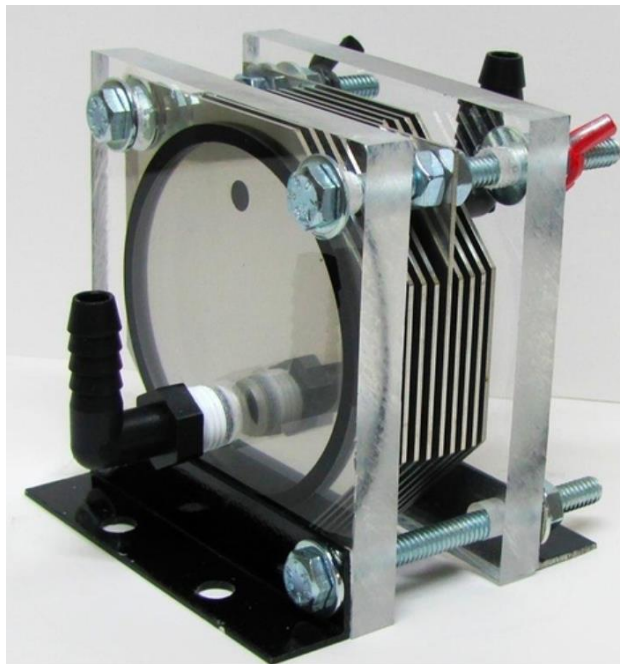


Figura 11 PakWheels. (n.d.). FS: HHO kit for cars to save fuel and increase efficiency. Recuperado de <https://www.pakwheels.com/forums/tfs-hho-kit-for-cars-to-save-fuel-and-increase-efficiency/550660/2>

Depósito de Agua

función: almacenar el electrolito, que es la solución acuosa (agua con KOH o NaOH) necesaria para el proceso de electrólisis en la celda. Además, actúa como un elemento auxiliar para gestionar el flujo de agua hacia la celda y separar el gas generado del líquido, asegurando la correcta alimentación y seguridad del sistema.



Figura 12 Ejemplo depósito de agua y electrolito

Descripción: el depósito está fabricado normalmente en polietileno de alta densidad (HDPE) u otros plásticos resistentes a la corrosión química de los álcalis presentes en el electrolito. Su diseño incluye los siguientes componentes:

- Tapa superior (boca de llenado): Hermética y roscada, permite rellenar el depósito con la solución electrolítica. Suele tener un diseño con sello para evitar fugas de gas.

- Salida superior de gas: Conectada generalmente a un conducto que lleva el gas HHO hacia el sistema de admisión del motor o hacia un burbujeador. Está ubicada en la parte superior del depósito para recoger únicamente el gas separado del líquido.
- Salida inferior de agua (alimentación a la celda): Situada en la parte baja del depósito, permite que el flujo de electrolito llegue por gravedad a la celda, asegurando un suministro constante y estable.
- Retorno de gas (función de burbujeo): Este conducto permite el retorno de parte del gas o del electrolito hacia el depósito.

Funcionamiento: durante la operación, el depósito mantiene el electrolito bajo presión atmosférica y lo suministra por gravedad hacia la celda seca, asegurando un flujo constante sin necesidad de bombeo activo. Simultáneamente, la línea de retorno permite el paso de gas HHO generado en la celda hacia el depósito, donde burbujea a través del líquido, actuando como un separador mecánico y lavador para eliminar gotas de electrolito y evitar su arrastre hacia el motor. El gas limpio se acumula en el espacio superior del depósito y se conduce hacia la admisión del motor o etapas de filtrado adicionales. Este diseño garantiza seguridad operacional, evita retrocesos de llama y mantiene la estabilidad hidráulica del sistema.

Controlador de Carga

Descripción: el controlador de carga es un dispositivo electrónico basado en modulación por ancho de pulso (PWM) que regula la corriente suministrada a la celda de electrólisis. Está compuesto por un microcontrolador, drivers de potencia (habitualmente MOSFET) y circuitos de protección contra sobrecorrientes y sobrecalentamientos.

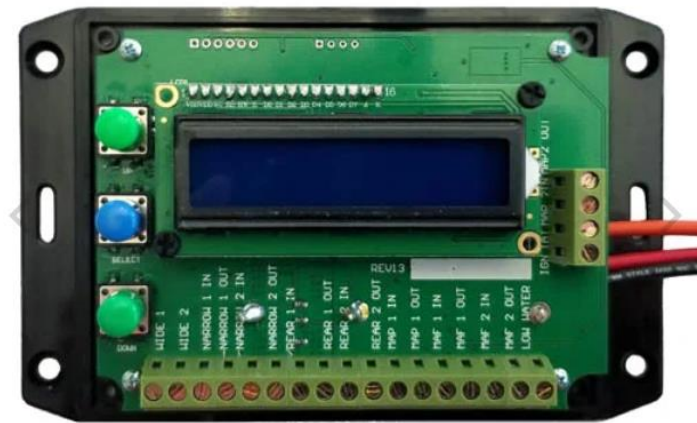


Figura 13 Controlador universal CCPWM

Funcionamiento: su función es ajustar dinámicamente la corriente hacia la celda en función de señales del motor como RPM, (TPS) o la señal lambda. Esto permite controlar la producción de hidrógeno para mantenerla dentro de límites que no alteren la relación estequiométrica aire-combustible ($\lambda \approx 1$), evitando fallos de lectura en la ECU y códigos de error. El ajuste se logra variando el duty cycle (D) de la señal PWM [26], definido como:

$$D = \frac{t_{activo}}{T_{total}} \quad (3)$$

Donde un duty cycle mayor aumenta la corriente media I y, por lo tanto, la tasa de producción de gas, según la Ley de Faraday:

Esto permite optimizar el consumo energético y adaptar la producción de gas a las condiciones reales de operación del motor, integrando el sistema de forma segura sin comprometer el balance energético ni el funcionamiento de la electrónica del vehículo.

Burbujeador

Función: es un componente de seguridad y acondicionamiento de gas en sistemas de electrólisis. Su función principal es filtrar y humidificar el gas HHO antes de su ingreso al motor, además de actuar como una trampa de llama que impide que eventuales retrocesos de combustión lleguen hasta la celda de electrólisis.



Figura 14 Ejemplo de burbujeador

Descripción: Está constituido por un recipiente hermético, habitualmente de material plástico resistente a sustancias alcalinas. Internamente, posee un conducto de entrada que se extiende hasta el fondo del líquido (agua destilada o solución electrolítica diluida) y una salida superior para el gas depurado. Incluye, generalmente:

- Tapas roscadas o herméticas para facilitar el llenado y mantenimiento.
- Conexiones estancas para entrada y salida de gas.
- Visor transparente para monitorear el nivel del líquido y la formación de burbujas.

Funcionamiento: El burbujeador fuerza al gas HHO a pasar a través de un líquido, generando burbujas que permiten separar gotas de electrolito, y actuar como barrera térmica contra retrocesos de llama, ya que el líquido disipa el calor y detiene la propagación de fuego, lo que mejora la pureza y seguridad del gas enviado al motor [17].

4.3.2 Proceso de Funcionamiento del Kit Generador HHO.

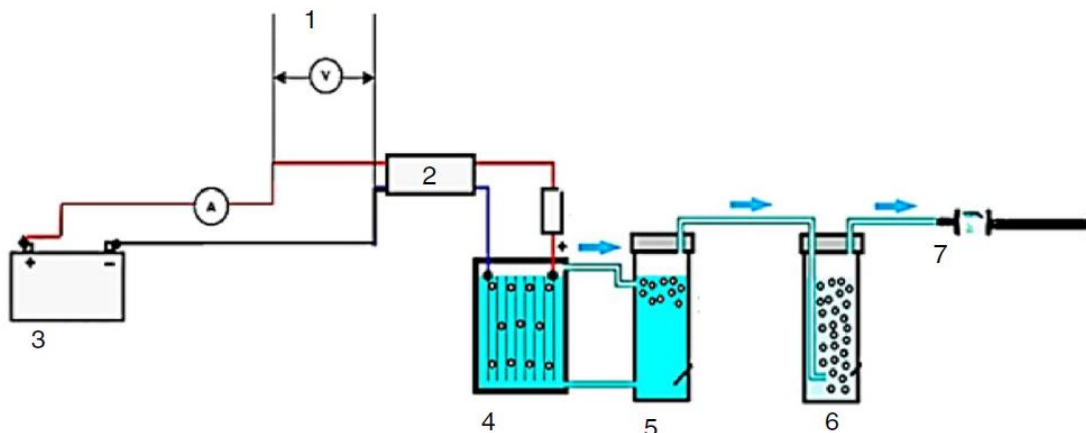


Figura 15 Circuito del kit HHO. Obtenido de *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11513-2>

El funcionamiento general del sistema de generación de gas HHO se ilustra en la Figura 15. El proceso comienza con la energía eléctrica proveniente de la batería que a su vez es cargada por el alternador del vehículo, esta alimenta un controlador electrónico. Este controlador regula la corriente enviada a la celda seca mediante modulación PWM, ajustándola dinámicamente en función de las condiciones de operación del motor, como RPM, posición del acelerador y la señal lambda.

A continuación, la corriente controlada fluye hacia la celda seca, donde ocurre la electrólisis del agua, transformando la energía eléctrica en gas oxihidrógeno (HHO), compuesto por hidrógeno y oxígeno en proporciones estequiométricas.

Para mantener el proceso estable, el depósito de agua abastece la celda mediante flujo por gravedad, asegurando un suministro constante de electrolito y evitando interrupciones en la electrólisis.

Una vez generado, el gas HHO sale de la celda y se conduce hacia el burbujeador, donde es obligado a pasar a través de un líquido. Aquí, se produce una separación mecánica de microgotas de electrolito, el gas se humidifica ligeramente, y el líquido actúa como trampa de llama, disipando cualquier retroceso de ignición que pudiera producirse en la línea de gas.

Tras el burbujeador, el gas purificado avanza hacia el sistema de admisión del motor, integrándose con el flujo de aire fresco, específicamente justo después del filtro de aire y antes del carburador o inyector, como se muestra en la Figura 16. Esta ubicación permite que el HHO se mezcle de manera homogénea con el aire antes de combinarse con el combustible. En este punto, el hidrógeno aporta su alta velocidad de llama y bajo requerimiento energético de ignición, lo que puede acelerar y mejorar la combustión, siempre y cuando se mantenga dentro de límites que no alteren la relación estequiométrica aire-combustible ni generen lecturas anómalas en los sensores del motor.

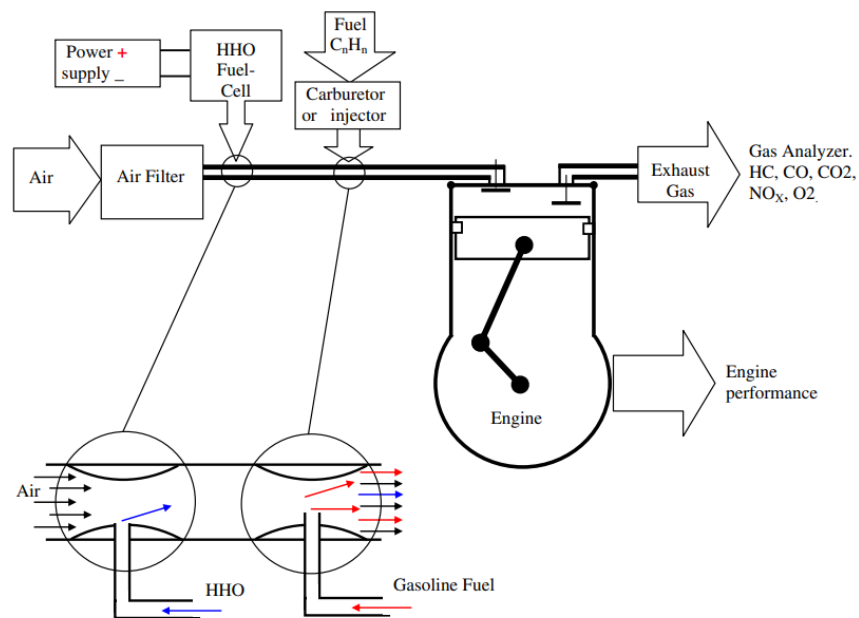


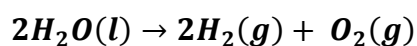
Figura 16 diagrama de flujo de gases en admisión de aire

En conjunto, el diseño del kit HHO permite su instalación en el compartimento del motor sin grandes modificaciones, gracias a su estructura modular y tamaño reducido, lo cual facilita su integración en vehículos convencionales sin comprometer espacio.

Cálculo del volumen de gas generado por litro de agua en el sistema HHO

Para dimensionar adecuadamente el sistema de generación HHO y justificar el uso de un tanque de 1 litro de agua como fuente primaria, es necesario analizar cuántos litros de gas se pueden obtener mediante electrólisis, considerando un enfoque cuantitativo basado en principios fisicoquímicos.

La reacción de electrólisis del agua se expresa según la siguiente ecuación estequiométrica:



Esta indica que por cada 2 moles de agua se generan 2 moles de hidrógeno molecular (H_2) y 1 mol de oxígeno molecular (O_2).

Dado que la densidad del agua es aproximadamente 1 kg/L, un litro de agua líquida equivale a 1000 gramos. La masa molar del agua es 18,015 g/mol, por lo tanto, el número de moles contenidos en un litro es:

$$n_{H_2O} = \frac{1000 \text{ g}}{18.015 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \approx 55.51 \text{ mol} \quad (4)$$

Aplicando la estequiometría de la reacción:

$$\text{Moles de } H_2 \text{ generados: } n_{H_2} = 55.51 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ generados: } n_{O_2} = \frac{55.51}{2} \approx 27.76 \text{ mol}$$

Considerando condiciones normales de presión y temperatura (0°C y 1 atm), donde el volumen molar de un gas ideal es de 22,4 L/mol, se obtiene:

$$V_{H_2} = 55,51 \text{ mol} \times 22, \frac{4L}{\text{mol}} \approx 1243,42L \quad (5)$$

$$V_{O_2} = 27,76 \text{ mol} \times 22, \frac{4L}{\text{mol}} \approx 621,82L \quad (6)$$

Por lo tanto, el volumen total de gas (mezcla $H_2 + O_2$) generado a partir de un litro de agua asciende aproximadamente a:

$$V_{Total} = V_{H_2} + V_{O_2} \approx \mathbf{1865,24L} \quad (7)$$

Aunque pueda parecer sorprendente que de un solo litro de agua se generen aproximadamente 1865 litros de gas, esto se debe a la alta densidad molecular del agua en estado líquido. Al descomponerse por electrólisis, las moléculas se transforman en hidrógeno y oxígeno gaseosos, cuya densidad es considerablemente menor, lo que provoca una expansión de volumen significativa al pasar a estado gaseoso bajo condiciones normales de temperatura y presión.

Sin embargo, en la práctica, los sistemas de electrólisis no alcanzan una eficiencia del 100 %. Dependiendo de la calidad de los electrodos, el diseño del generador y la fuente de energía empleada, la eficiencia energética puede oscilar entre un 60 % y un 80 % en aplicaciones reales. Considerando un escenario conservador de 70 % de eficiencia energética, el volumen efectivo de gas aprovechable será

$$V_{efectivo} = \mathbf{1865,24L} \times \mathbf{0,70} \approx \mathbf{1305,67L} \quad (8)$$

Si se considera un consumo promedio del motor o sistema equivalente a 0,5 litros por minuto de gas HHO, el tiempo de funcionamiento que permite este volumen es:

$$\frac{\mathbf{1305,67L}}{\mathbf{0.5 L/min}} \approx \mathbf{2611minutos} \approx \mathbf{43,5horas} \quad (9)$$

En consecuencia, un tanque de 1 litro de agua es capaz de alimentar el sistema por más de 43 horas continuas, lo cual justifica plenamente su capacidad y eficiencia para aplicaciones prácticas en vehículos o sistemas estacionarios con demandas intermitentes o sostenidas de bajo caudal.

4.3.3 Proceso en el Motor (Ciclo Otto)

Admisión de Aire: el gas HHO se introduce en el sistema de admisión de aire del motor, donde se mezcla con el aire y el combustible antes de entrar en los cilindros.

Compresión: la mezcla de aire, combustible y gas HHO es comprimida por los pistones dentro de los cilindros del motor. La presencia de hidrógeno en la mezcla mejora la uniformidad y la rapidez de la combustión.

Combustión: durante la fase de combustión, la mezcla comprimida es encendida por la chispa de la bujía (en motores de gasolina) o por la compresión misma (en motores diésel). El hidrógeno, con su alta velocidad de llama y baja energía de activación, facilita una combustión más completa y eficiente del combustible.

Escape: la energía liberada durante la combustión empuja los pistones hacia abajo, generando trabajo mecánico que se convierte en movimiento del vehículo. Los gases de escape son expulsados del motor.

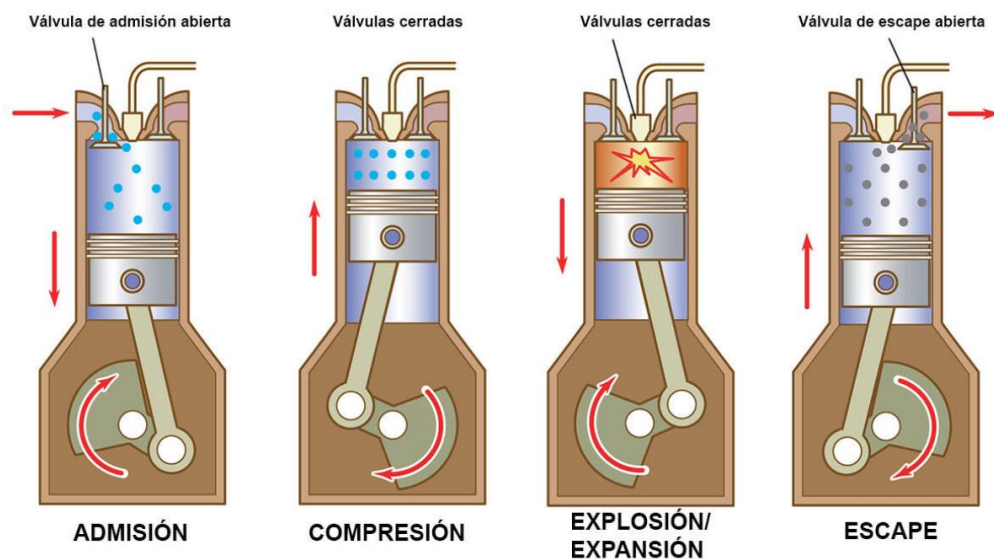


Figura 17 Diagrama del ciclo Otto. Fuente: Mundo Tuerca. (n.d.). El ciclo Otto: Motores de dos y cuatro tiempos. Recuperado de <https://mundotuerca.cl/el-ciclo-otto-motores-de-dos-y-cuatro-tiempos/>

4.3.4 Análisis de balance energético global de un vehículo

Con el objetivo de establecer una línea base clara que permita evaluar el impacto energético del sistema HHO, se construyó un modelo simplificado de balance energético para un motor de combustión interna convencional, sin intervención de celdas electrolíticas ni dispositivos externos. Este modelo permite identificar los principales flujos de energía involucrados y cuantificar las pérdidas y transformaciones energéticas bajo condiciones estándar. Para fines comparativos, se tomó como referencia una entrada de 100 megajoules (MJ) de energía química proveniente del combustible (gasolina), lo que corresponde a una cantidad arbitraria pero representativa, y que permite expresar los distintos procesos en valores absolutos fácilmente trazables.

El primer supuesto clave corresponde a la eficiencia térmica del motor, la cual se estimó en un 30 %, valor típico para motores a gasolina operando en condiciones normales. Bajo esta eficiencia, el motor es capaz de transformar 30 MJ en energía mecánica útil, mientras que el restante 70 MJ se pierde principalmente como energía térmica (disipada en el sistema de refrigeración y gases de escape), energía química (combustible no quemado), y energía sonora. Este comportamiento es coherente con la literatura técnica, que señala que entre el 65 % y 75 % de la energía química disponible en los motores de combustión se pierde antes de transformarse en trabajo efectivo.

Del total de energía mecánica generada (30 MJ), se estima que aproximadamente un 5 % es utilizada para accionar el sistema de generación eléctrica del vehículo, es decir, el alternador. Esto corresponde a 1.5 MJ desviados desde el eje del motor. Considerando una eficiencia media del alternador del 70 %, el sistema es capaz de convertir esa energía mecánica en 1.05 MJ de energía eléctrica útil, la cual es distribuida hacia los diversos componentes eléctricos del vehículo, como luces, ventiladores, sensores, central electrónica, entre otros.

Finalmente, la energía mecánica restante, equivalente a 28.5 MJ, se destina directamente al desplazamiento del vehículo, es decir, al sistema de transmisión y ruedas. Esta representa la porción verdaderamente útil para el movimiento del automóvil.

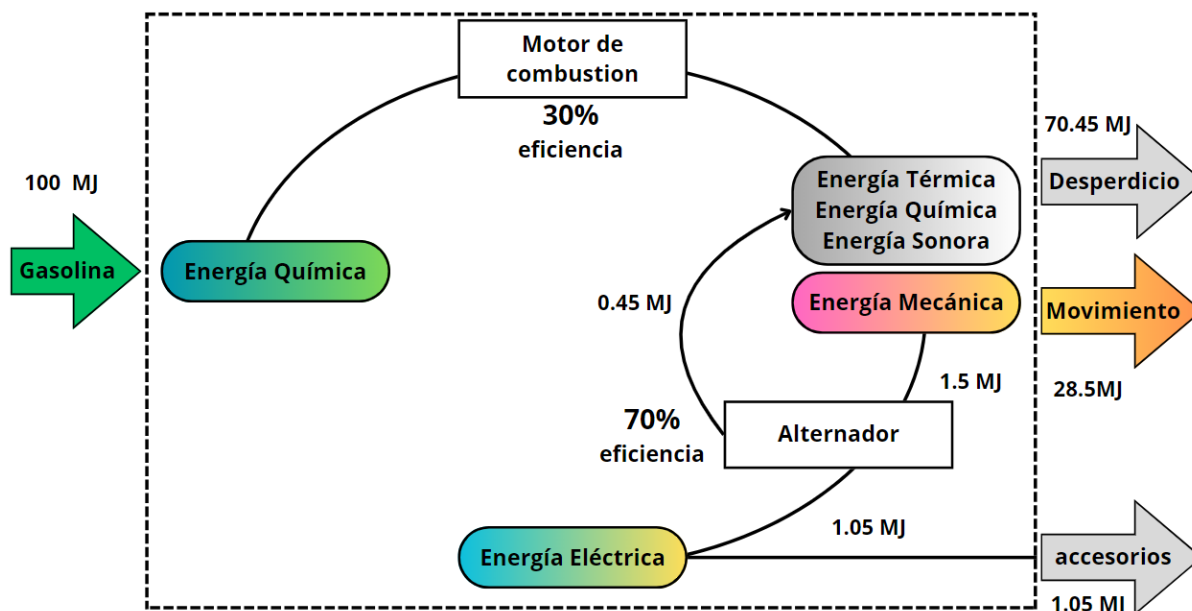


Figura 18 Diagrama básico de balance energético de un vehículo

Este modelo (Figura 18) debe entenderse como una representación altamente simplificada del comportamiento energético real de un vehículo. No contempla pérdidas por accesorios auxiliares, variaciones en el régimen de carga, fluctuaciones en la eficiencia del alternador, ni consideraciones térmicas del sistema de escape. Sin embargo, constituye una herramienta fundamental para realizar comparaciones cuantitativas al introducir modificaciones, como la incorporación de un sistema HHO. En este contexto, la entrada de 100 MJ sirve como punto de referencia para evaluar si la adición del gas oxihidrógeno es capaz de modificar significativamente el balance energético del sistema, reducir las pérdidas, o aumentar la eficiencia de conversión sin violar los principios fundamentales de la termodinámica.

4.3.5 Análisis de balance energético global de un vehículo más kit HHO

El sistema HHO ha sido objeto de escepticismo técnico debido a su aparente contradicción con los principios de conservación de la energía. Sin embargo, esta visión parte de un error conceptual: el kit HHO no introduce energía significativa al sistema, sino que modifica el proceso de conversión de la energía ya presente en el combustible. Este análisis se basa justamente en ese principio, representado en la Figura 19.

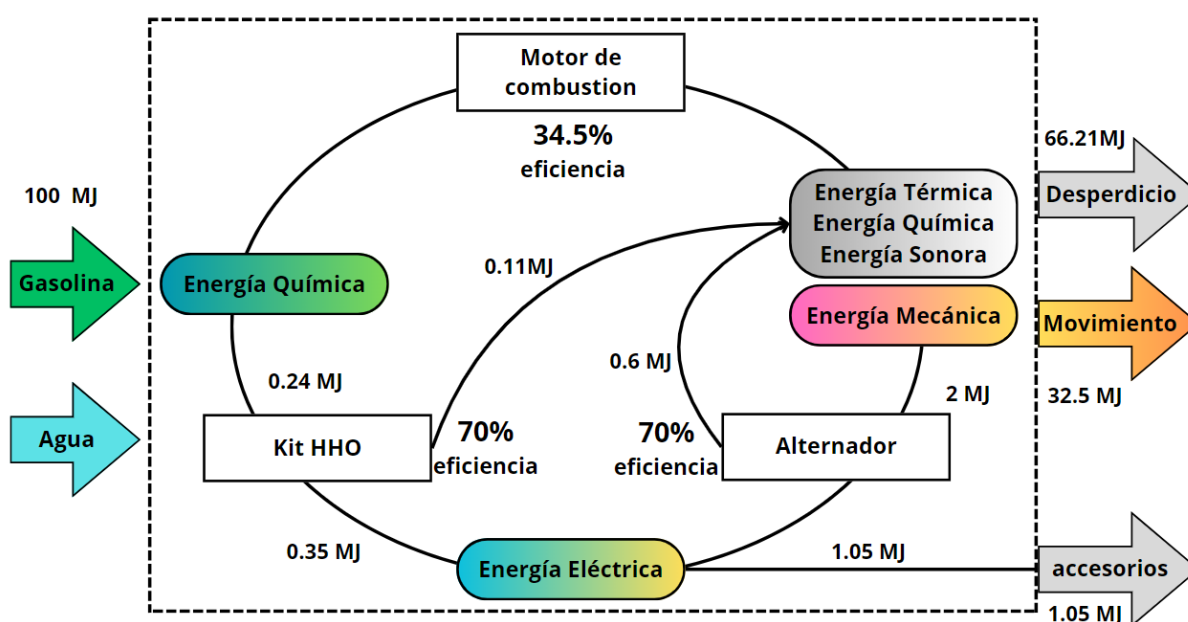


Figura 19 Diagrama básico de balance energético de un vehículo + kit HHO

Para modelar este efecto, se mantiene la misma entrada energética del caso base: 100 MJ de energía química provenientes de gasolina, sin sumar energía externa significativa. En el modelo sin HHO, se asumió una eficiencia térmica del 30 %, generando 30 MJ de energía mecánica útil. Con la incorporación del sistema HHO, y considerando datos experimentales que reportan reducciones del consumo de combustible del 10 % al 30 % (detallado en la Página 49) se adopta una mejora conservadora del 15 %. Esto eleva la eficiencia térmica a 34.5 %, produciendo 34.5 MJ de trabajo útil, sin aumentar la energía total del sistema.

Este cambio se justifica termodinámicamente por las propiedades del hidrógeno. Su alta velocidad de llama (aprox. 2.9 m/s), baja energía de ignición (0.02 mJ) y capacidad de

enriquecer zonas pobres de mezcla, permiten una propagación más rápida y uniforme del frente de llama. Esto reduce zonas frías, evita la formación de hidrocarburos no quemados, y minimiza la variabilidad de presión en la cámara, lo cual se traduce en una combustión más completa y eficiente del hidrocarburo principal (gasolina).

El sistema HHO requiere energía eléctrica para operar, la cual es extraída mecánicamente del motor mediante el alternador. En este modelo, se estima que el alternador consume 2 MJ de energía mecánica es decir un 33.33% más debido a el requerimiento energético del kit, generando 1.4 MJ eléctricos con una eficiencia del 70 %. De esa energía, 1.05 MJ abastecen los accesorios del vehículo, mientras que los 0.35 MJ restantes se destinan al kit HHO. Este, a su vez, convierte la electricidad en gas oxihidrógeno con una eficiencia del 70 %, generando alrededor de 0.25 MJ de energía química en forma de gas.

El valor energético del HHO, por sí solo, es pequeño. Pero su impacto no se mide en MJ, sino en eficiencia del proceso de combustión. En este caso, el gasto de 0.35 MJ en producir y utilizar HHO se traduce en un aumento neto de 4 MJ de energía mecánica útil (de 28.5 a 32.5 MJ dirigidos al movimiento), lo que representa una relación costo-beneficio superior a 12:1. Esto valida el uso del sistema desde el punto de vista energético.

En términos de pérdidas, el sistema reduce su desperdicio energético de 70 MJ a 66.21 MJ, sin violar ninguna ley física. Se conserva el total de 100 MJ, pero se redistribuye de forma más eficiente. Lo que antes se perdía como calor o residuos no quemados, ahora se convierte en trabajo útil.

Este enfoque evita la sobrestimación del papel energético del HHO, y se centra en su verdadera función: mejorar la eficiencia de la combustión de la gasolina. La mejora no proviene del hidrógeno como fuente de energía, sino como catalizador químico que permite obtener más trabajo desde la misma cantidad de combustible.

4.3.6 Análisis termodinámico teórico (simulación con Cantera)

Con el fin de profundizar en la comprensión del impacto energético del kit HHO, se desarrolló un análisis termodinámico teórico mediante simulaciones computacionales en equilibrio químico utilizando el software Cantera. Este enfoque permite evaluar el efecto que tiene la incorporación progresiva de gas HHO una mezcla de hidrógeno y oxígeno en proporción 2:1 sobre la combustión del heptano, combustible representativo de la gasolina, en condiciones ideales que buscan replicar el comportamiento térmico de un motor de combustión interna.

La metodología consiste en mantener constante una base de 1 mol de heptano como combustible principal, y adicionar cantidades crecientes de gas HHO a la mezcla, sin alterar dicha base. El HHO se incorpora directamente al flujo de entrada, sumándose al oxidante (aire), lo cual permite analizar el efecto energético de su aducción sin modificar la carga total de combustible. Esta estrategia refleja de forma simplificada el funcionamiento típico de los kits HHO comerciales, que inyectan hidrógeno y oxígeno como un gas adicional en la admisión del motor.

Objetivos

- Evaluar el efecto de la adición progresiva de HHO sobre la temperatura adiabática de combustión, en función de distintos regímenes de mezcla aire-combustible representados por la relación de equivalencia ϕ .
- Analizar cómo se modifica la formación de CO_2 y H_2O , principales productos de combustión, como indicadores de eficiencia térmica y grado de oxidación.
- Observar el comportamiento conjunto de estas variables (temperatura, CO_2 , H_2O) al variar la relación de equivalencia ϕ para diferentes niveles fijos de H_2 añadido, reflejando condiciones reales de operación (mezcla pobre, estequiométrica y rica).

Parámetros y condiciones simuladas

- Combustible base: n-heptano (C₇H₁₆), 1 mol fijo en todos los escenarios.
- Gas HHO: compuesto por hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) en proporción molar 2:1.
- Niveles de adición de HHO: 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mol de H₂ (con su respectivo 0.5 mol de O₂ por cada mol de H₂).
- Relación de equivalencia ϕ : desde 0.7 hasta 1.3, cubriendo mezclas pobres (exceso de aire), estequiométricas y ricas (exceso de combustible).
- Presión y temperatura inicial: 1 atm y 300 K.
- Oxidante base: mezcla de O₂ y N₂ en proporción 1:3.76, representando aire seco.
- Mecanismo químico: se utilizó un mecanismo detallado de combustión para n-heptano “heptane.yaml”, que incluye múltiples especies intermedias y productos principales. Las simulaciones se realizaron bajo suposición de equilibrio químico completo, resolviendo las composiciones finales mediante el método de equilibrio a entalpía y presión constante (HP) implementado en Cantera.

Estas simulaciones permiten observar el comportamiento termodinámico del sistema frente a la adición controlada de HHO en distintos escenarios operativos. Aunque se trata de un enfoque teórico idealizado, los resultados obtenidos entregan información valiosa sobre el potencial del HHO como gas complementario en motores de combustión interna, y permiten comparar sus efectos en función del régimen de mezcla y la proporción de gas añadido.

Temperatura adiabática vs relación de equivalencia ϕ (1 mol C₇H₁₆)

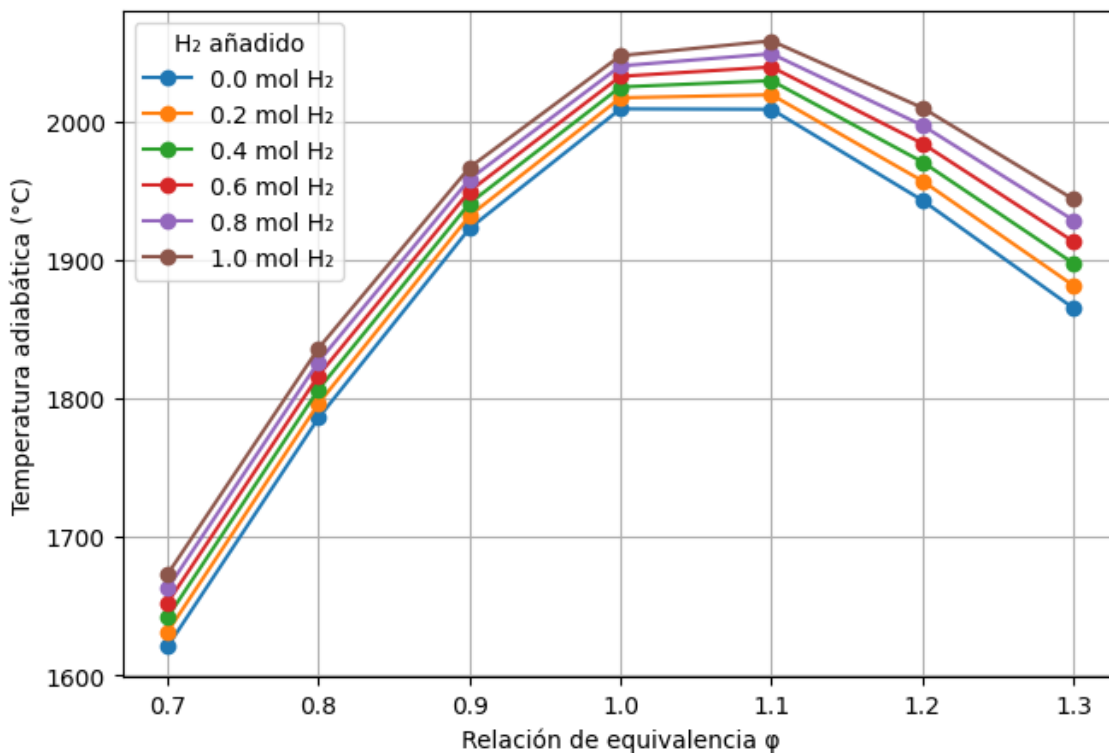


Gráfico 4 Temperatura adiabática vs relación de equivalencia ϕ (1 mol C₇H₁₆)

Al observar el Gráfico 4, la evolución de la temperatura adiabática en función de la relación de equivalencia ϕ exhibe el perfil esperado para un sistema de combustión con hidrocarburos, alcanzando su valor máximo en torno al punto estequiométrico ($\phi \approx 1.05$). Esta condición representa el equilibrio ideal entre combustible y oxidante, donde se logra la liberación energética más eficiente. Al alejarse de este punto óptimo ya sea hacia mezclas pobres ($\phi < 1.0$), donde predomina el exceso de aire, o hacia mezclas ricas ($\phi > 1.1$), con exceso de combustible la temperatura adiabática disminuye notablemente. Esto se explica, en el primer caso, por el efecto diluyente del nitrógeno y oxígeno no reaccionante, y en el segundo, por la combustión incompleta asociada a una disponibilidad limitada de oxígeno molecular.

Sin embargo, lo más significativo de este análisis es el efecto claramente observable que produce la adición progresiva de gas HHO en la cámara de combustión. A medida que se incorpora hidrógeno (con su correspondiente oxígeno en proporción estequiométrica), se aprecia un incremento sistemático de la temperatura adiabática en todos los regímenes de mezcla. Este fenómeno es particularmente marcado en mezclas cercanas a la estequiometría, donde la adición de H_2 favorece la propagación de la llama y acelera la cinética de oxidación del heptano. La diferencia térmica entre el caso base (sin HHO) y el caso con 1 mol de H_2 añadido supera los $100\text{ }^\circ\text{C}$ en algunos puntos del dominio de ϕ , lo que evidencia una intensificación energética atribuible a la elevada entalpía de combustión del hidrógeno (-286 kJ/mol) y su facilidad para iniciar cadenas reactivas.

Desde el punto de vista termodinámico, el aumento en la temperatura adiabática observado con la incorporación progresiva de HHO se traduce en una mayor disponibilidad de energía térmica en la cámara de combustión. Esto implica que, bajo condiciones ideales, una mayor fracción de la energía química contenida en los reactantes puede ser convertida en energía mecánica durante el ciclo de expansión del pistón. En términos prácticos, una combustión con mayor temperatura adiabática favorece la generación de presiones más elevadas al interior del cilindro, lo que mejora el trabajo neto producido por ciclo y, por ende, incrementa el rendimiento térmico del motor.

Fracción molar de CO₂ vs relación de equivalencia ϕ (1 mol C₇H₁₆)

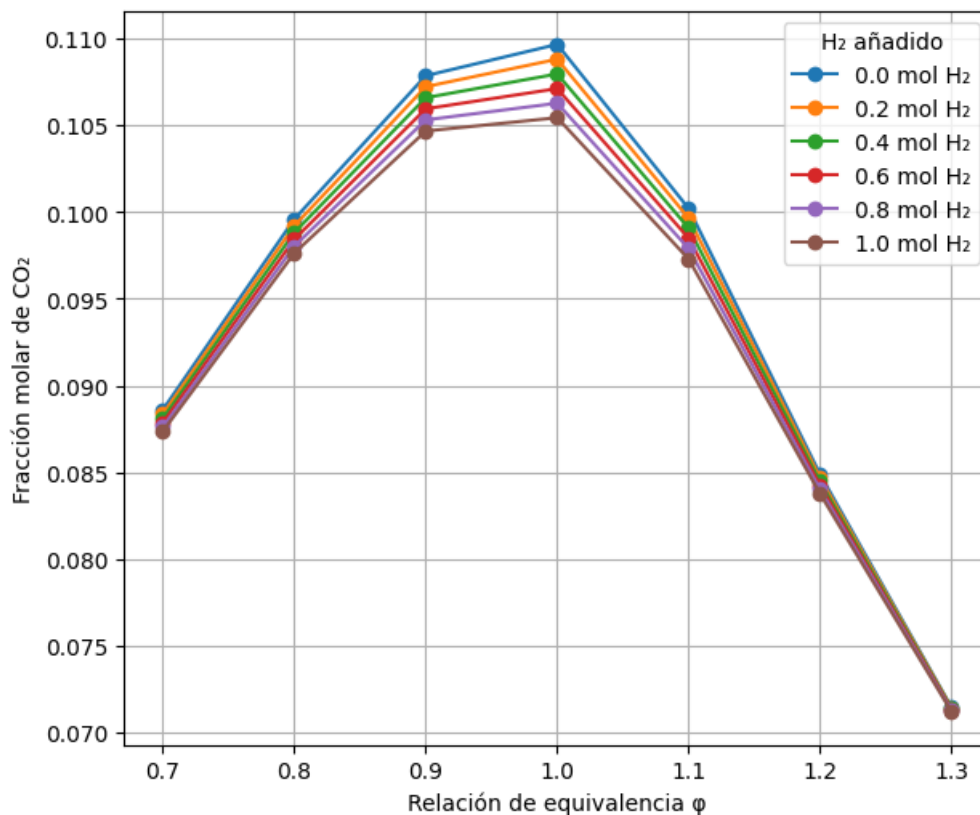


Gráfico 5 Fracción molar de CO₂ vs relación de equivalencia ϕ (1 mol C₇H₁₆)

Al observar el Gráfico 5, la evolución de la fracción molar de dióxido de carbono (CO₂) en función de la relación de equivalencia ϕ exhibe un comportamiento coherente con los principios estequiométricos de la combustión. El valor máximo de producción de CO₂ se alcanza, nuevamente, en torno a la mezcla estequiométrica ($\phi \approx 1.0$), donde se dispone de una cantidad ideal de oxígeno para oxidar completamente el heptano, lo que permite la máxima conversión del carbono contenido en el combustible hacia CO₂.

Al alejarse del punto estequiométrico, ya sea hacia mezclas pobres ($\phi < 1.0$) o ricas ($\phi > 1.0$), la fracción molar de CO₂ disminuye de forma progresiva. En mezclas pobres, el exceso de aire actúa como diluyente térmico, reduciendo la temperatura de combustión y limitando la conversión completa del combustible. En mezclas ricas, en cambio, la cantidad de oxígeno disponible resulta insuficiente, lo que favorece la formación de productos intermedios como

monóxido de carbono (CO) o hidrocarburos parcialmente oxidados. En ambos casos, la eficiencia de oxidación del carbono disminuye, lo que se traduce en una menor generación de CO₂ como producto final.

En cuanto al efecto de la adición progresiva de H₂, se observa una disminución sistemática de la fracción molar de CO₂ en todos los valores de ϕ a medida que aumenta la cantidad de hidrógeno añadido. Este comportamiento responde a dos mecanismos complementarios. En primer lugar, la combustión del H₂ al no contener carbono no genera CO₂, pero sí produce vapor de agua (H₂O), lo que incrementa el número total de moles en los productos. Este aumento en la base molar reduce la proporción relativa del CO₂ en la mezcla gaseosa, aunque su cantidad absoluta permanezca constante o varíe levemente.

En segundo lugar, y más relevante aún, la adición de H₂ como fuente energética auxiliar permite mantener la liberación térmica total con un menor requerimiento de heptano, lo que reduce efectivamente la masa absoluta de carbono oxidado. Así, parte del poder calorífico del sistema es cubierto por el HHO, disminuyendo la carga de hidrocarburo necesaria y, en consecuencia, la cantidad de CO₂ formado en términos absolutos. Esto implica no solo una mejora en la eficiencia térmica global, sino también una reducción directa de emisiones por unidad de energía generada.

Este resultado es relevante desde el punto de vista ambiental y de eficiencia energética. Si bien el CO₂ sigue siendo el principal producto de oxidación del carbono, su fracción molar decreciente con el uso de HHO sugiere una posible dilución del impacto climático por unidad de energía liberada. En otras palabras, el uso de HHO podría permitir un desplazamiento parcial del combustible fósil hacia un portador energético sin carbono, reduciendo la intensidad de carbono por megajulio producido, lo que constituye una mejora en términos de sostenibilidad del sistema.

Fracción molar de H₂O vs relación de equivalencia ϕ (1 mol C₇H₁₆)

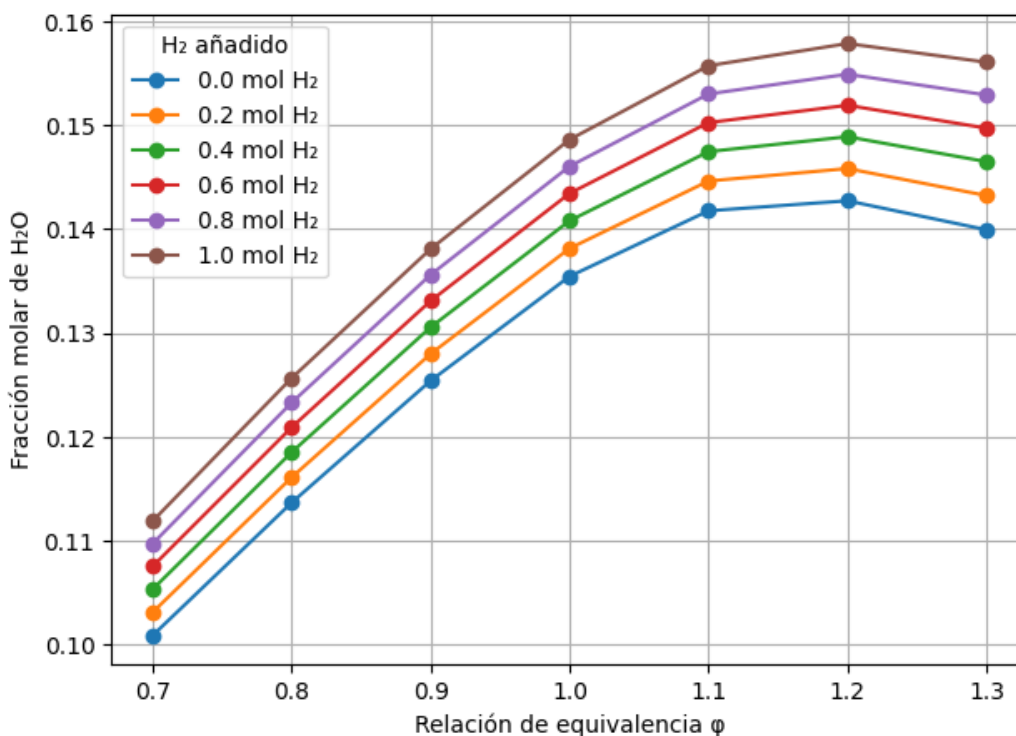


Gráfico 6 Fracción molar de H₂O vs relación de equivalencia ϕ (1 mol C₇H₁₆)

El Gráfico 6 muestra que la fracción molar de vapor de agua (H₂O) aumenta de manera consistente en todos los rangos de relación de equivalencia ϕ a medida que se incorpora mayor cantidad de hidrógeno a la mezcla de combustión. Este comportamiento responde directamente a la estequiometría de oxidación del H₂, que reacciona completamente con oxígeno formando exclusivamente agua como producto. La tendencia creciente observada en el gráfico confirma que el hidrógeno añadido está participando efectivamente en las reacciones de combustión, en lugar de actuar como un gas inerte o residuo no oxidado.

Este resultado, si bien no refleja directamente un aumento en eficiencia, sí valida que el hidrógeno está siendo aprovechado como vector energético dentro de la cámara de combustión. Cuanto mayor es la proporción de H₂O generada, mayor es la contribución del hidrógeno a la liberación térmica total del sistema. En consecuencia, el aumento de agua no solo evidencia una mayor participación del HHO en el proceso, sino que respalda los resultados anteriores relacionados con el incremento de la temperatura adiabática.

4.4 Beneficios del Kit de HHO

4.4.1 Reducción del consumo de combustible

Diversos estudios han investigado el efecto de la adición de gas oxihidrógeno (HHO) o hidrógeno puro sobre el consumo de combustible en motores de combustión interna, tanto de encendido por chispa como diésel. En el estudio experimental de Al-Rousan (2010) [27], se evaluó el impacto de la inyección de gas HHO sobre el consumo de combustible en un motor de gasolina Honda G200, monocilíndrico, bajo distintas condiciones de régimen.

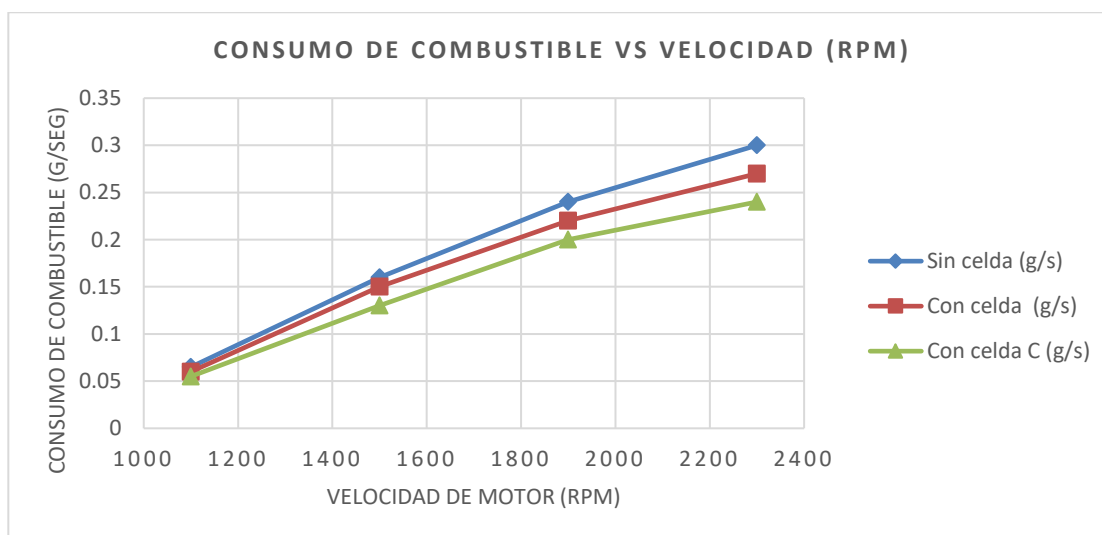


Gráfico 7 Consumo de combustible vs Velocidad del motor

Los resultados, representados en el Gráfico 7, muestran una reducción progresiva del consumo de combustible (en kg/s) al emplear celdas generadoras de HHO (identificadas como celda B y celda C) en comparación con la operación sin celda. Específicamente, se observa que, a medida que aumenta la velocidad del motor de 1100 rpm a 2300 rpm, el consumo de combustible crece en todos los casos, pero de manera más acentuada en el motor que no utiliza gas HHO. Se evidencian una disminución en el consumo que alcanza hasta aproximadamente un 20-30 %, dependiendo del régimen de operación, lo cual Al-Rousan atribuye a una combustión más rápida y completa, favorecida por las propiedades fisicoquímicas del

hidrógeno, como su alta velocidad de llama y bajo requerimiento de energía de ignición.

Nabil y Khairat Dawood (2019) [28] evaluaron el efecto del gas HHO en motores de gasolina de 150 cc (a) y 1300 cc (b), encontrando reducciones en el consumo de combustible de 14,8 % y 16,3 %, respectivamente, respecto a la operación convencional. Según el Gráfico 8 el caudal másico de combustible (g/s) fue consistentemente menor con HHO en todo el rango de velocidades, evidenciando una mejora en la eficiencia volumétrica y la combustión, atribuida a las propiedades fisicoquímicas del hidrógeno.

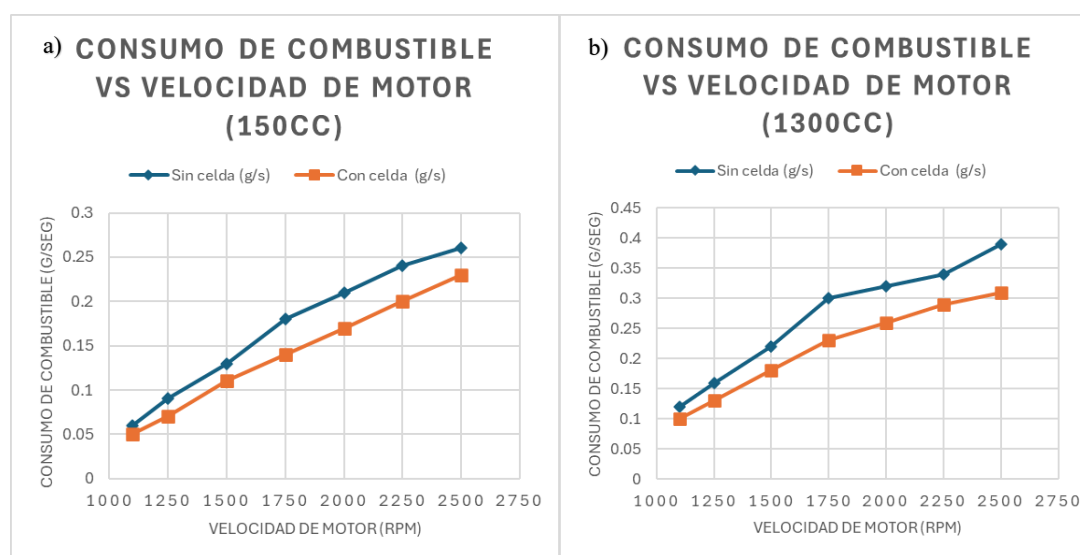


Gráfico 8 Consumo de combustible vs velocidad motor a)150 y b)1300

Además, los autores presentan la siguiente tabla en donde se muestra el porcentaje de reducción de combustible para distintos motores.

Tabla 3 Porcentaje de reducción del consumo de combustible de diferentes motores.

Engine model	Engine size (CC)	Year model	Saving fuel consumption (%)
Renault Duster	1800	2001	27
Jeep Sheroky	3700	2011	30
Daewoo Nubira	1600	1998	21
Chevrolet Lanos	1500	2003	18
Suzuki (carburetor)	1000	2013	20
generator	500kw	-	18

Gad et al. (2022) realizaron ensayos en un motor de gasolina monocilíndrico de cuatro tiempos operando a una velocidad constante de 5254 rpm, utilizando un sistema generador de HHO compuesto por una celda seca de 20 placas. La electrólisis se alimentó con corrientes de 15 A y 28 A, correspondientes a caudales de producción de HHO de 250 ml/min y 500 ml/min, respectivamente.

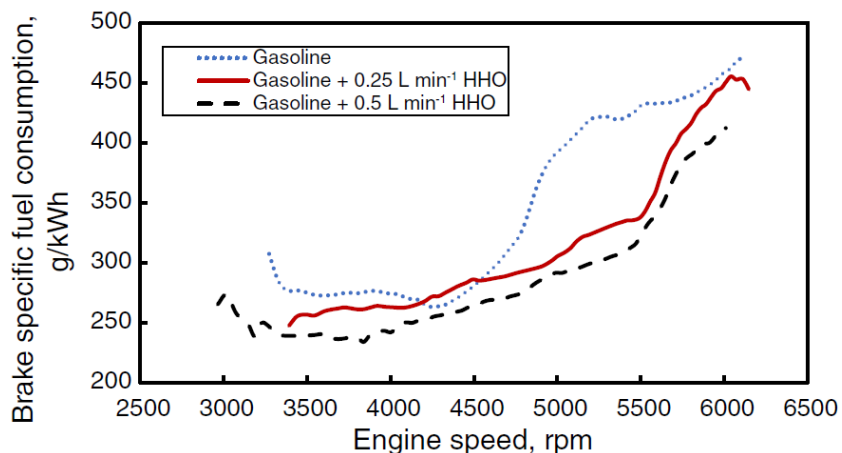


Gráfico 9 Consumo específico de combustible vs rpm

Bajo estas condiciones, se evaluó el consumo específico de combustible (BSFC), observándose en el Gráfico 9 una disminución máxima del 8,58 % con el flujo de 250 ml/min y del 39,92 % con el flujo de 500 ml/min, comparado con el funcionamiento convencional del motor utilizando únicamente gasolina [29]. Estos resultados se obtuvieron manteniendo constante la apertura del acelerador en un 32 %, y utilizando una mezcla electrolítica de 4 g de KOH por litro de agua como electrolito en la celda de electrólisis.

El-Kassaby et al. (2016) evaluaron el efecto de la adición de gas HHO en el consumo de combustible de un motor de gasolina Skoda Felicia 1.3 GLXi, de cuatro cilindros y 1289 cm³, operando a 1500 (a), 2000 (b) y 2500 rpm (c), bajo distintas cargas en banco dinamométrico. El sistema HHO empleado consistió en una celda seca con 16 electrodos de acero inoxidable (configurada en disposición +, 2 neutros, -), con placas de 16 × 20 cm y separación de 1 mm, alimentada con una solución electrolítica de KOH al 6 g/L. La celda logró

una producción máxima de 18 L/h de gas HHO. Bajo estas condiciones, según el Gráfico 10 se observó una reducción de hasta el 34 % en el consumo específico de combustible (BSFC) al operar el motor con HHO en comparación con gasolina pura [30]. Es importante destacar que los resultados fueron reportados en función de la potencia de frenado del motor (Brake Power, BP), una medida que representa la potencia mecánica útil entregada en el eje del motor, descontando las pérdidas internas del sistema. Este parámetro permite evaluar con precisión el rendimiento real del motor, ya que refleja exclusivamente la energía disponible para propulsar el vehículo o realizar trabajo útil.

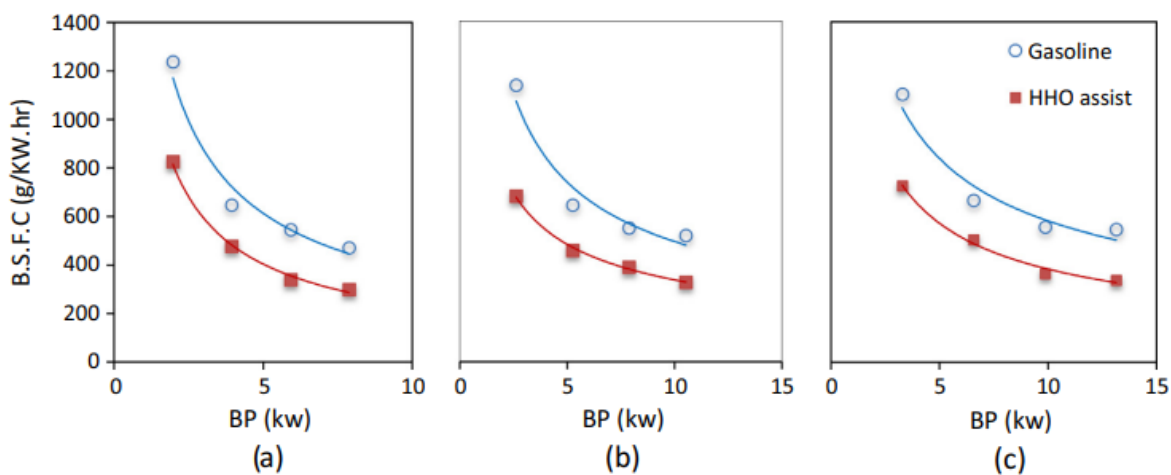


Gráfico 10 Efecto de la variación de la carga del dinamómetro del motor en BSFC; (a)1500 rpm, (b)2000 rpm y (c)2500 rpm.

Yilmaz et al. (2010) investigaron el impacto de la adición de gas HHO en un motor diésel de cuatro cilindros, de inyección directa, bajo condiciones de carga parcial y plena, operando a regímenes de 1250, 1750 y 2250 rpm. El gas HHO fue generado mediante una celda electrolítica alimentada con 12 V y 13 A, produciendo un caudal de aproximadamente 1,6 L/min. Durante los ensayos, de genero el Gráfico 11 se observó una reducción promedio del consumo específico de combustible (BSFC) del 14 % al utilizar HHO suplementario, siendo el efecto más marcado a regímenes medios y altos, mientras que a bajas revoluciones se advirtió que el consumo podría aumentar si no se controlaba adecuadamente el caudal de gas [31]. Estos resultados evidencian el potencial del HHO para mejorar la eficiencia térmica del motor diésel.

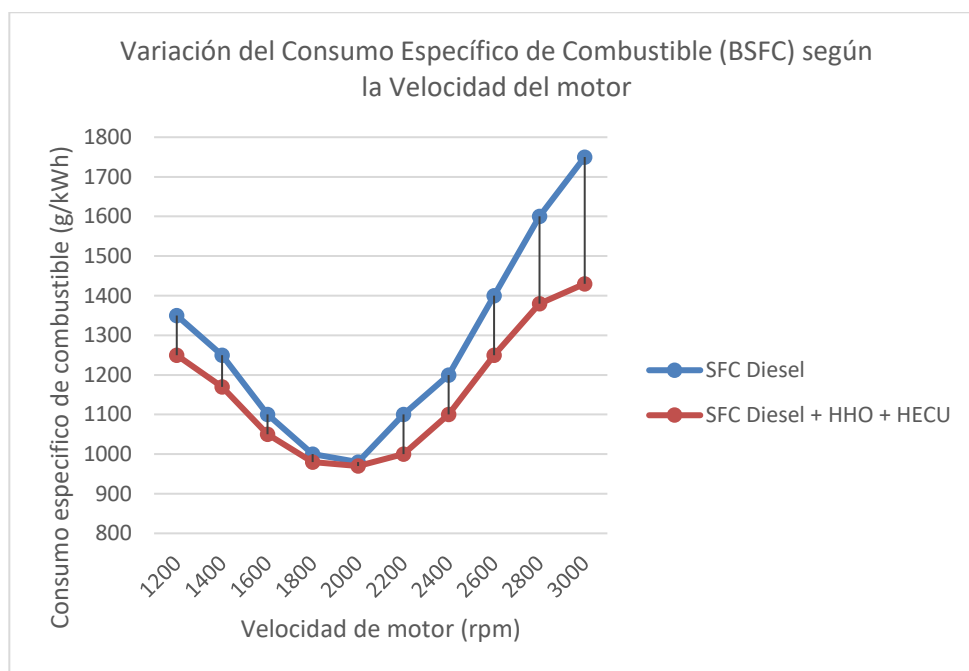


Gráfico 11 Variación del Consumo Específico de Combustible (BSFC) según la Velocidad del motor

4.4.2 Reducción de emisiones contaminantes

Nabil y Khairat Dawood (2019) evaluaron el impacto del gas HHO en motores de gasolina de 150 cc y 1300 cc, operando bajo distintas condiciones de régimen. Sus resultados indican que la adición de HHO logró una reducción en las emisiones de CO del 33 % y de HC del 27,4 % en el motor de 150 cc, y del 24,5 % y 21 %, respectivamente, en el motor de 1300 cc, comparado con el funcionamiento convencional sin HHO, dichos datos lo presentaron en la Tabla 4 [28]. Estas disminuciones se observaron de forma consistente en todo el rango de velocidades, como el Gráfico 12.

Emission	150CC engine			1300CC engine		
	without HHO	with HHO	Reduction percent %	without HHO	with HHO	Reduction percent %
CO	2.45%	1.64%	33%	0.57%	0.43%	24.5%
HC	985 ppm	674 ppm	27.4%	180 ppm	142 ppm	21%

Tabla 4 reducción de emisiones según motor

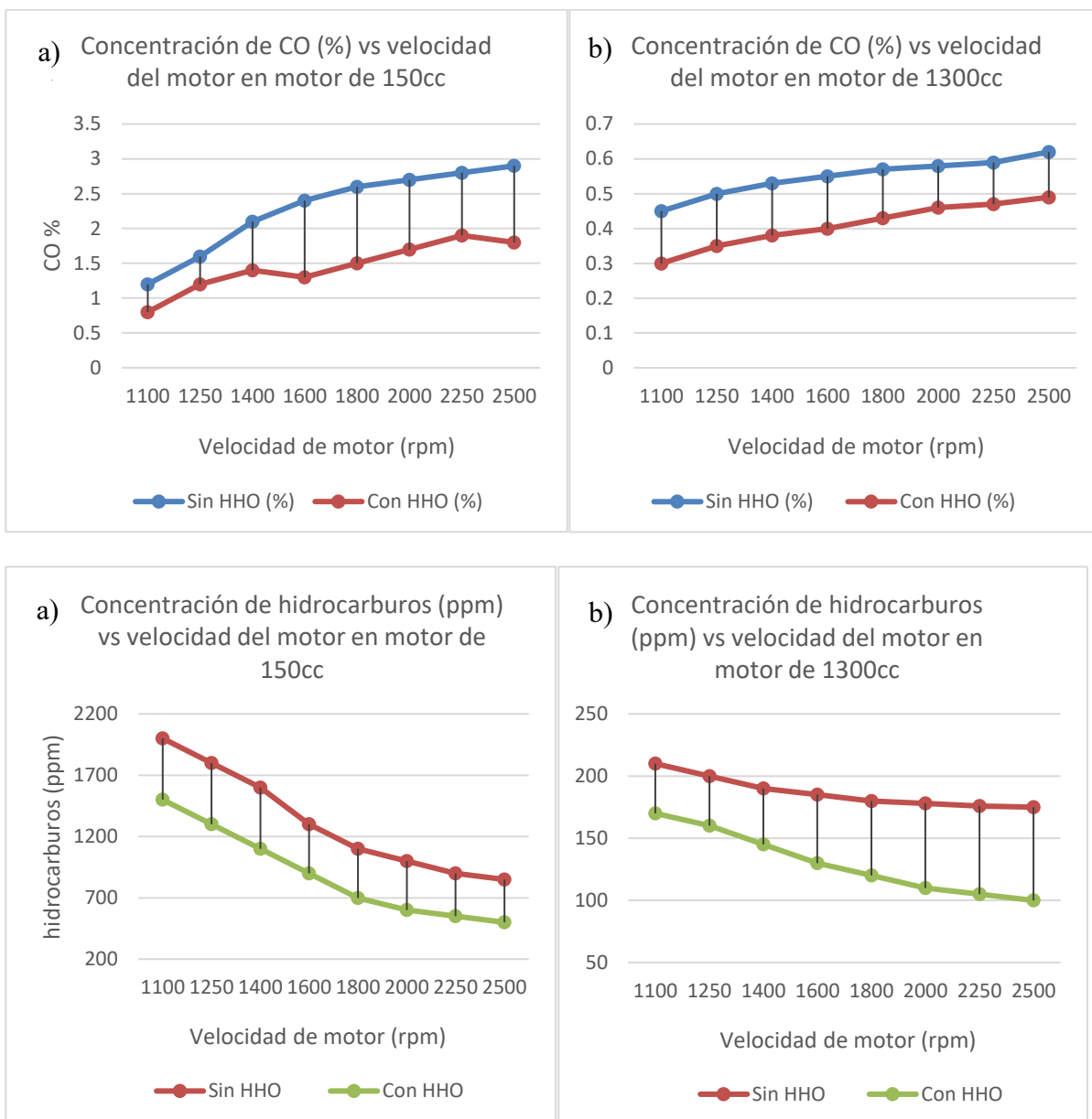


Gráfico 12 Emisiones de %CO₂ y HC vs velocidad de motor; a)150 y b)1500

Gad et al. (2022) realizaron ensayos en un motor de gasolina monocilíndrico de cuatro tiempos, operando a 5254 rpm, utilizando una celda seca de 20 placas, alimentada con corrientes de 15 A y 28 A, correspondientes a caudales de producción de HHO de 250 ml/min y 500 ml/min, respectivamente. Bajo estas condiciones, se observó que, al añadir HHO, las emisiones contaminantes disminuyeron en comparación con gasolina pura, logrando reducciones del 33,86 % en CO, 19,43 % en NO_x y 26,42 % en CO₂ [29] [17], como se muestra en el Gráfico 13.

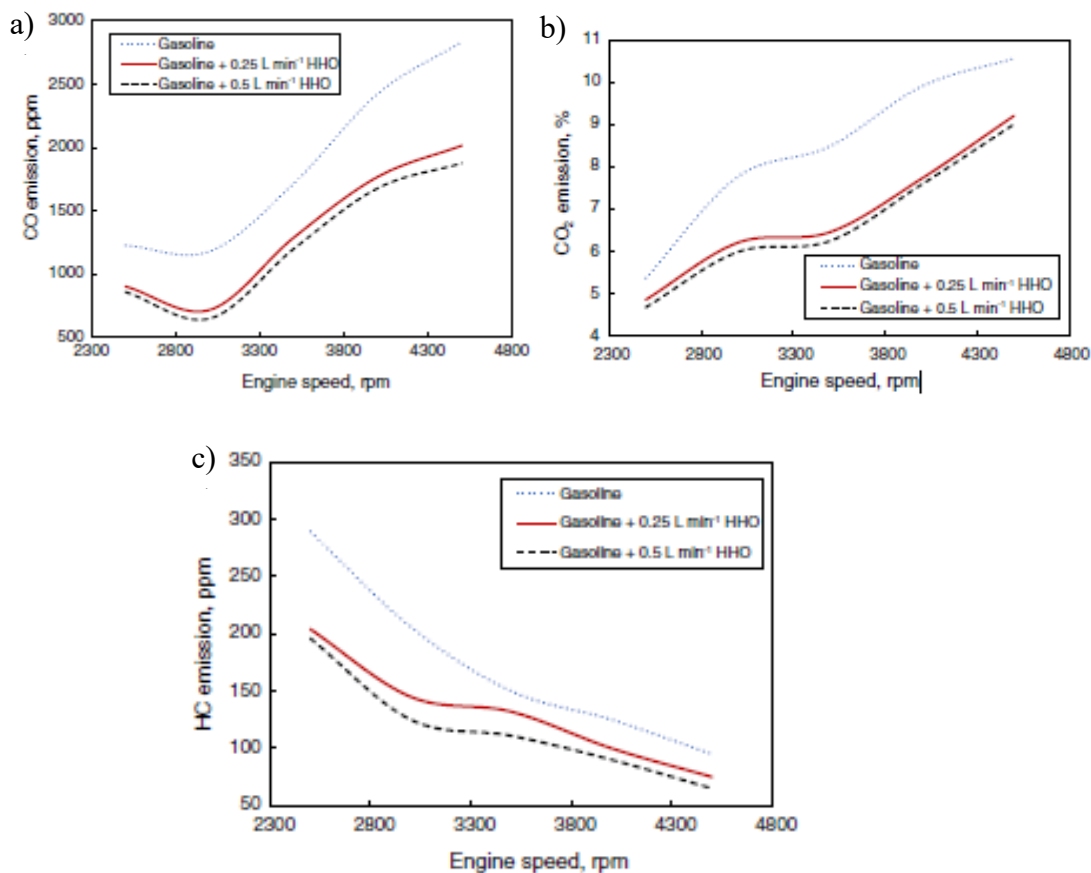


Gráfico 13 Emisión de a) CO, b) CO₂ y c) HC vs la velocidad del motor (sin HHO, con 0.25L/min de HHO y 0.5 L/min de HHO)

El-Kassaby et al. (2016) estudiaron el efecto del gas HHO en un motor de gasolina Skoda Felicia 1.3 GLXi, de cuatro cilindros y 1289 cm³, utilizando una celda seca de 16 electrodos de acero inoxidable, con placas de 16 × 20 mm separadas por 1 mm, alimentada con una solución de KOH al 6 g/L, alcanzando una producción máxima de 18 L/h de gas HHO. Bajo estas condiciones, se observó una reducción promedio de las emisiones contaminantes, registrándose disminuciones de 15 % en NO_x, 18 % en CO y 14 % en HC en comparación con el funcionamiento convencional del motor con gasolina pura [30]. Los ensayos se realizaron a 1500, 2000 y 2500 rpm, bajo diferentes cargas en banco dinamométrico, y los autores destacan que la incorporación de HHO permitió lograr una combustión más limpia y estable, lo cual se reflejó en los valores promedio de gases de escape, tal como se aprecia en el Gráfico 14 y Gráfico 15.

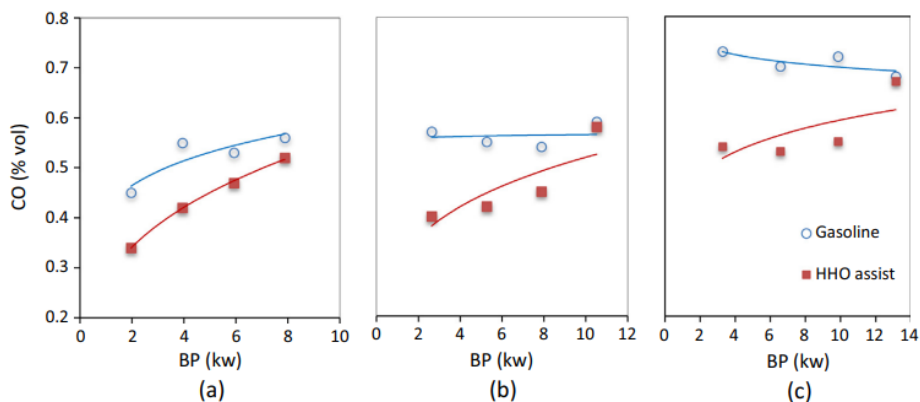


Gráfico 14 Efecto de la variación de la carga en el dinamómetro del motor sobre las emisiones de CO: (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm y (c) 2500 rpm.

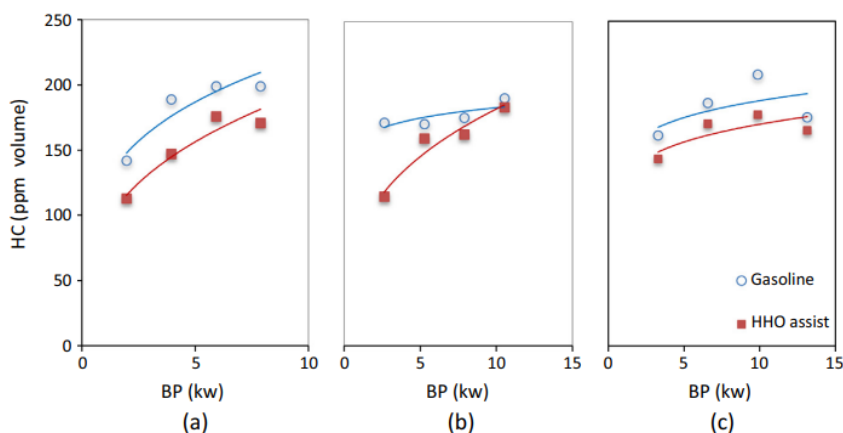


Gráfico 15 Efecto de la variación de la carga en el dinamómetro del motor sobre las emisiones de HC: (a) 1500 rpm, (b) 2000 rpm y (c) 2500 rpm.

Yilmaz et al. (2010) evaluaron un motor diésel de cuatro cilindros e inyección directa, utilizando una celda electrolítica que generó aproximadamente 1,6 L/min de gas HHO. Bajo regímenes de 1750 rpm y superiores, se logró una reducción promedio del 5 % en las emisiones de HC y una disminución de 13,5 % en CO, en comparación con el funcionamiento con diésel puro, datos representados en el Gráfico 16. Los autores destacan que el efecto reductor de HHO fue más pronunciado en condiciones de carga media y alta, debido a la combustión más rápida y completa del combustible diésel-hidrógeno, mientras que a bajas velocidades el exceso de volumen del gas HHO puede afectar la entrada de aire, limitando la combustión completa.

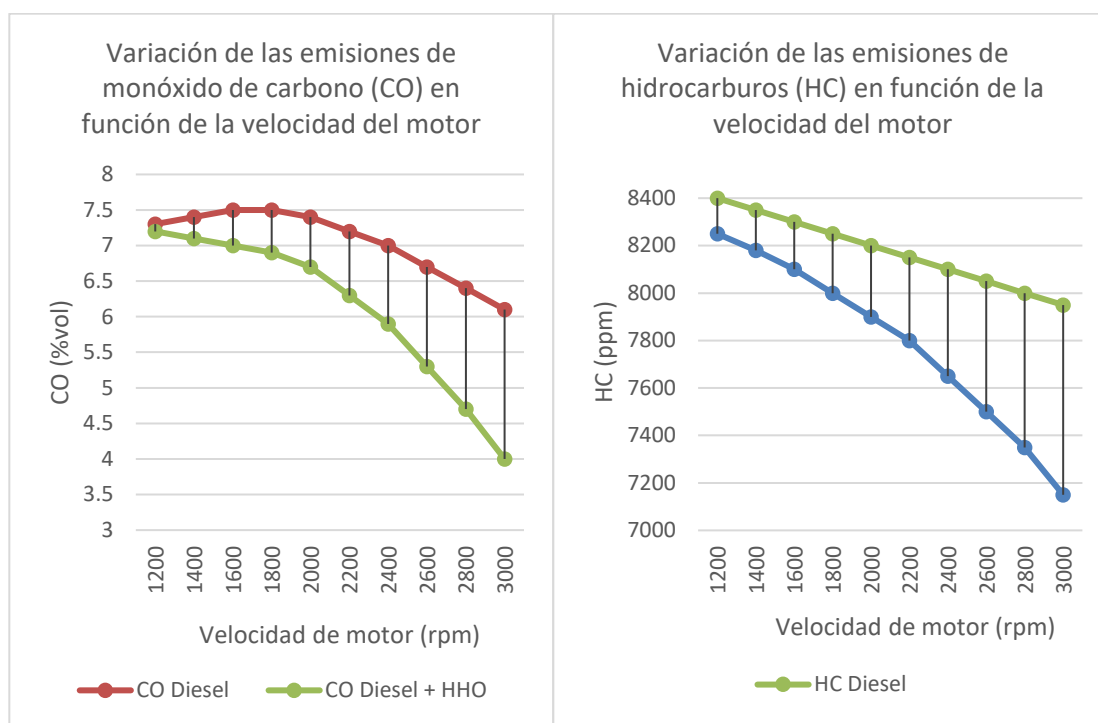


Gráfico 16 Variación de las emisiones de CO y HC en función de la velocidad del motor

4.4.3 Mayor potencia en el motor

Diversos estudios han evidenciado que la adición de gas oxihidrógeno (HHO) o hidrógeno puro puede generar aumentos en la potencia desarrollada por motores de combustión interna. Al-Rousan (2010), en un ensayo con un motor de gasolina Honda G200, mostró en sus gráficos incrementos de potencia y torque al utilizar celdas generadoras de HHO [27], aunque sin cuantificar los aumentos en términos porcentuales. Nabil y Khairat Dawood (2019) reportaron que la adición de gas HHO incrementó la eficiencia de freno del motor en 17,9 % para un motor de 150 cc y en 22,4 % para uno de 1300 cc, comparado con el funcionamiento con gasolina pura, resultado atribuido al mayor poder calorífico del gas HHO [28]. Gad et al. (2022), trabajando con un motor de gasolina monocilíndrico a 5254 rpm, registraron aumentos máximos en la potencia de frenado de 9,21 % y 16,52 % al añadir HHO a la gasolina, en comparación con el funcionamiento con gasolina pura, como se muestra en el Gráfico 17, utilizando una celda seca de 20 placas [29]. Por otra parte, Yilmaz et al. (2010) estudiaron un motor diésel de cuatro cilindros e inyección directa, operando a regímenes de 1250, 1750 y

2250 rpm, utilizando un caudal aproximado de 1,6 L/min. Bajo estas condiciones, reportaron un incremento promedio del 19,1 % en el par motor respecto al funcionamiento con diésel puro, especialmente a regímenes medios y altos. Este aumento se atribuyó a la alta velocidad de llama y bajo retardo de ignición del gas oxihidrógeno, que mejora la rapidez de combustión y eleva la presión máxima en el cilindro, reduciendo las pérdidas de calor y acercando la combustión a un ciclo más próximo al de volumen constante. Sin embargo, los autores advirtieron que, a bajas velocidades, el efecto positivo del HHO disminuye debido a su baja densidad energética volumétrica, que puede limitar el aporte energético y provocar reducciones de par si no se controla adecuadamente el caudal, aunque este inconveniente podría mitigarse mediante el uso de sistemas electrónicos de gestión.

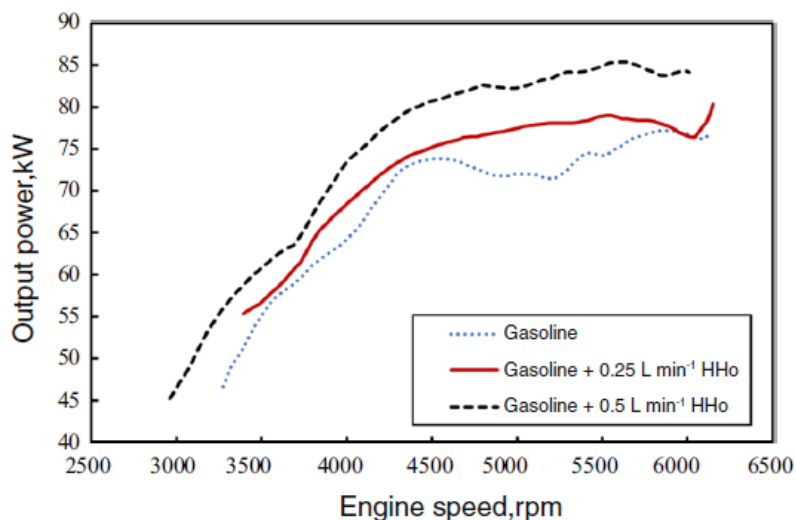


Gráfico 17 velocidad vs potencia de salida.

En síntesis, los estudios muestran que la adición de gas oxihidrógeno (HHO) o hidrógeno puro puede mejorar la potencia del motor, es decir, la capacidad de alcanzar mayor velocidad o trabajo, con incrementos reportados entre un 9 % y un 16,5 %. Asimismo, se observan mejoras en el par motor, que corresponde a la fuerza de giro que permite mejor aceleración y respuesta bajo carga, con aumentos de hasta un 19 %. Esto refleja el potencial del HHO para optimizar el rendimiento de los motores, aunque requiere un control preciso para evitar efectos negativos a bajas revoluciones.

4.4.4 Limpieza del motor

El uso de gas oxihidrógeno (HHO) ha sido promovido en el ámbito comercial para la limpieza interna de motores, conocida como descarbonización. Este proceso consiste en inyectar gas HHO en la admisión de aire de un motor en marcha, permitiendo que el hidrógeno y el oxígeno generados reaccionen en la cámara de combustión, aumentando localmente la temperatura de combustión y facilitando la oxidación y eliminación de depósitos de carbono adheridos en válvulas, pistones, cámara de combustión y sistema de escape.

Empresas como HHO Carbon Cleaner, HHO Chile (ver Figura 20), Motortek, entre otras, ofrecen servicios de descarbonización basados en esta tecnología, afirmando que contribuye a mejorar el rendimiento del motor y prolongar la vida útil de componentes internos.



Figura 20 Ejemplo de Maquina descarbonizadora

A nivel técnico, diversos estudios han explorado el fenómeno. Por ejemplo, Gad et al. describen que la presencia de hidrógeno en la mezcla provoca una combustión más rápida y temperaturas pico más elevadas [29], lo que facilita la pirolización o combustión de depósitos carbonosos, ayudando a mantener limpias las superficies internas del motor [29]. Además, Yilmaz et al. señalan que la adición de HHO incrementa la velocidad de llama y reduce significativamente las emisiones de hidrocarburos sin quemar [30]. En general, los estudios mencionados sugieren que el uso de HHO disminuye la emisión de hidrocarburos no quemados, lo que podría indicar efectos beneficiosos sobre la acumulación de residuos internos en el motor, aunque ninguno de ellos evalúa de forma directa la limpieza de depósitos carbonosos.

5 Impacto de la Implementación del Sistema HHO en Chile.

Para realizar un análisis riguroso y cuantitativo del impacto potencial que tendría la implementación de sistemas generadores de hidrógeno HHO en el parque automotor chileno, es indispensable establecer previamente las bases numéricas y los supuestos técnicos sobre los cuales se sustentará el estudio.

En primer lugar, se ha definido considerar exclusivamente el parque vehicular liviano de uso particular, compuesto por automóviles, station wagons, SUV y camionetas destinadas principalmente al transporte de personas o carga liviana. Esto se justifica porque estos vehículos representan el segmento con mayor volumen y circulación diaria, y concentran la mayor proporción de consumo de combustible en entornos urbanos y suburbanos. Además, se excluyen camiones, buses y motocicletas debido a que poseen patrones de uso, tecnologías de motorización y rangos de consumo significativamente distintos, lo que haría inviable una proyección homogénea de impacto.

Según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), al cierre de 2023, el parque vehicular en Chile alcanza un total de 6.538.727 unidades (INE, 2023a). Por otra parte, a partir de datos regionales de la Región del Biobío, se estimó que los vehículos livianos representan aproximadamente el 88 % del parque total (INE, 2023b), lo que permite proyectar un parque vehicular liviano a nivel nacional de alrededor de 5.754.080 unidades.

Respecto al kilometraje recorrido, diversos estudios y reportes del sector automotor en Chile indican que un vehículo liviano particular recorre en promedio entre 12.000 y 15.000 kilómetros al año. Para efectos conservadores y alineados a un enfoque de ingeniería realista, se adoptará un valor promedio de 12.000 kilómetros/año por vehículo. Esto permite proyectar los consumos y emisiones en un horizonte anual, facilitando la comparación y evaluación de impactos económicos y ambientales.

Asimismo, se asume un consumo promedio de combustible de 12 km/litro, lo cual es representativo de vehículos livianos convencionales a combustión interna en condiciones mixtas (ciudad-carretera). Con estos valores, se obtiene un consumo anual promedio por vehículo de 1.000 litros/año:

$$\text{Consumo anual} = \frac{12.000 \frac{\text{km}}{\text{año}}}{\frac{12 \text{ km}}{\text{litro}}} = \frac{1.000 \text{ litros}}{\text{año}} \quad (10)$$

Además, se empleará un precio promedio de la bencina de \$1.267 por litro, correspondiente al valor promedio de la bencina de 95 octanos en 2024 en la Región Metropolitana (INE, 2025), como referencia para la estimación de costos económicos.

Finalmente, para asegurar un análisis prudente y técnicamente defendible, se analizarán distintos escenarios, y rangos de reducción de consumo y emisiones reportados en estudios sobre el sistema HHO. Esto permitirá evitar sobreestimaciones en los beneficios y entregar conclusiones sólidas desde el punto de vista energético, ambiental y económico.

Sobre la base de estos datos y supuestos, en los apartados siguientes se cuantificarán el impacto energético, calculando el ahorro potencial de combustible y energía; el impacto económico, proyectando los ahorros monetarios para los usuarios particulares; y el impacto ambiental, estimando la reducción de emisiones contaminantes asociadas al menor consumo de combustible, con el propósito de evaluar la factibilidad y relevancia de implementar sistemas HHO en el transporte liviano particular en Chile.

5.1 Impacto energético en Chile

Para evaluar el impacto energético de la implementación del Kit HHO en el parque vehicular liviano en Chile, se utilizarán los datos y supuestos previamente establecidos. Entre estos se utilizó como base el consumo promedio anual de 1.000 litros por vehículo y un parque total estimado en 5.754.080 unidades. A partir de esta cifra, se calculó el consumo total anual del parque vehicular liviano, equivalente a aproximadamente 5.754 millones de litros de combustible.

Consumo total anual sin HHO:

$$C_{\text{total, sin HHO}} = N \times C_{\text{vehículo}} \quad (11)$$

$$C_{\text{total, sin HHO}} = 5.754.080 \times 1000 \text{ litros/año} = \mathbf{5.754.080.000 \text{ litros/año}}$$

Por otra parte, los diversos estudios experimentales mencionados en la literatura reportan rangos de ahorro de combustible entre un 10 % y un 30 % por vehículo con la incorporación del kit HHO, dependiendo del tipo de motor, condiciones de operación y diseño del sistema. En función de estos antecedentes, se elaboró un modelo paramétrico que permite estimar el ahorro total de combustible a nivel nacional como función de dos variables: (i) el porcentaje de adopción del kit dentro del parque vehicular que va desde 0 a 100% y (ii) la eficiencia técnica del kit expresada como porcentaje de ahorro por unidad en tres escenarios técnicos: 10 %, 20 % y 30 %.

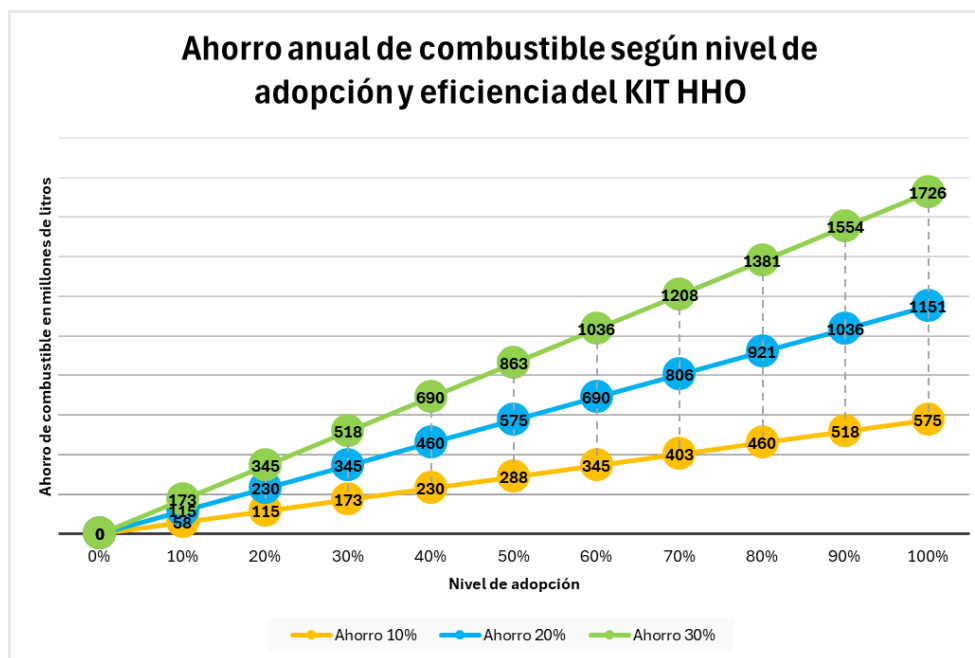


Gráfico 18 Ahorro anual de combustible según nivel de adopción y eficiencia del kit HHO

Si bien el modelo planteado representado en el Gráfico 18 entrega resultados esperables y lineales producto de una relación directamente proporcional entre el porcentaje de adopción del kit HHO y su eficiencia técnica, resulta fundamental realizar un análisis de sensibilidad que permita evaluar escenarios más realistas respecto del nivel de implementación que podría alcanzar esta tecnología a nivel nacional.

Para ello se definieron tres escenarios de adopción:

- Escenario **pesimista**: 10 % del parque vehicular.
- Escenario **intermedio**: 40 % de adopción.
- Escenario **optimista**: 70 % de adopción.

En cada uno de estos casos, se evaluó el ahorro energético total anual para tres niveles de eficiencia técnica: 10 %, 20 % y 30 %. El objetivo es visualizar la sensibilidad del ahorro energético frente a la variabilidad en la adopción del sistema y su desempeño real.

Tabla 5 Casos de adopción y eficiencia

Ahorro	Casos de adopción		
	Pesimista (10%)	Intermedio (40%)	Optimista (70%)
10%	57.5	230.0	403.0
20%	115.1	460.3	805.6
30%	172.6	690.5	1208.4

Escenario pesimista (10 % de adopción)

En este caso, el impacto energético se sitúa en un rango de 57,5 a 172.6 millones de litros de combustible ahorrados por año, según el nivel de eficiencia técnica. Aunque representa un escenario de baja adopción, estos volúmenes son equivalentes, por ejemplo, a eliminar por completo el consumo de combustible de toda la flota vehicular liviana de una ciudad como Antofagasta durante un año completo o al total de bencina consumido por todos los taxis y colectivos del país durante más de un año, dependiendo de la eficiencia alcanzada. Esta magnitud de ahorro, aun bajo condiciones poco favorables, da cuenta de un potencial real y cuantificable que podría ser aprovechado en programas piloto o implementación focalizada en sectores estratégicos.

Escenario intermedio (40 % de adopción)

Con una adopción moderada potencialmente alcanzable mediante políticas de incentivo, regulación progresiva o implementación sectorial, el ahorro nacional anual se sitúa entre 230 y 690.5 millones de litros de combustible, dependiendo del rendimiento técnico del sistema. Para dimensionar esta magnitud, cabe señalar que este volumen es equivalente al consumo anual de combustible de toda la flota vehicular de toda la región de Valparaíso. Bajo este escenario, el kit HHO deja de ser una solución experimental para convertirse en una herramienta concreta de apoyo a los objetivos de eficiencia energética a escala nacional, especialmente si se implementa de forma priorizada en flotas de uso intensivo.

Escenario optimista (70 % de adopción)

En el escenario de mayor penetración tecnológica, el impacto energético se estima entre 403 y 1.208 millones de litros de combustible ahorrados por año, en función del nivel de eficiencia técnica alcanzado. Esta magnitud es comparable al volumen total de bencina que Chile importa en aproximadamente dos meses, o bien, al consumo anual en conjunto de todo el parque vehicular de la Región de Valparaíso y la región del Biobío en un escenario de eficiencia máxima. Este resultado posiciona al kit HHO como una alternativa de alto impacto, no solo por su potencial de reducción directa del consumo interno, sino también por su capacidad de contribuir a la disminución de la dependencia energética del país, y a la mejora del balance energético del sector transporte, en línea con los compromisos de sostenibilidad y descarbonización progresiva.

5.2 Impacto económico en los habitantes de Chile

Para analizar el impacto económico de la implementación del sistema generador de hidrógeno HHO a nivel de usuario individual, es necesario considerar que los beneficios económicos no son uniformes para todos los propietarios de vehículos. El ahorro real dependerá directamente del consumo de bencina anual, del precio del combustible, del nivel de eficiencia del sistema, y del costo de adquisición e instalación del kit.

En términos de inversión, los valores de mercado del sistema HHO pueden variar considerablemente, dependiendo de la empresa proveedora, los materiales, la configuración técnica del kit y si incluye o no instalación profesional. Actualmente, se encuentran kits desde los \$150.000 CLP hasta los \$400.000 CLP o más. Para efectos de este análisis, y con el objetivo de mantener una estimación prudente, se asumirá un costo base de \$400.000 CLP, con una vida útil de 5 años, lo que implica una inversión anualizada de \$80.000 CLP/año, a su vez consideraremos un gasto anual de \$20.000 CLP/año por mantenimiento.

$$C_{anual,HHO} = \frac{400.000 \text{ CLP}}{5 \text{ años}} + 20.000 \text{ CLP} = \mathbf{100.000 \frac{CLP}{año}} \quad (12)$$

Asimismo, se mantendrá como referencia el precio promedio de la bencina de 95 octanos en 2025, estimado en \$1.267 CLP/litro. Se considerarán tres escenarios de eficiencia técnica del kit: 10 %, 20 % y 30 % de ahorro en consumo de combustible, los cuales corresponden al rango reportado en la literatura técnica previamente analizada.

Con base en estos supuestos, se desarrollará un modelo de análisis económico individual que estime el ahorro neto anual para distintos niveles de eficiencia técnica del sistema HHO, considerando una variación de consumo anual entre 0 y 2.000 litros. Este enfoque permite identificar con precisión los umbrales de uso mínimo necesarios para que la inversión en el sistema sea económicamente justificable. A través de este análisis, se busca establecer

condiciones operacionales críticas que determinan la viabilidad del kit HHO desde el punto de vista del usuario, diferenciando claramente entre escenarios de pérdida, equilibrio y rentabilidad.

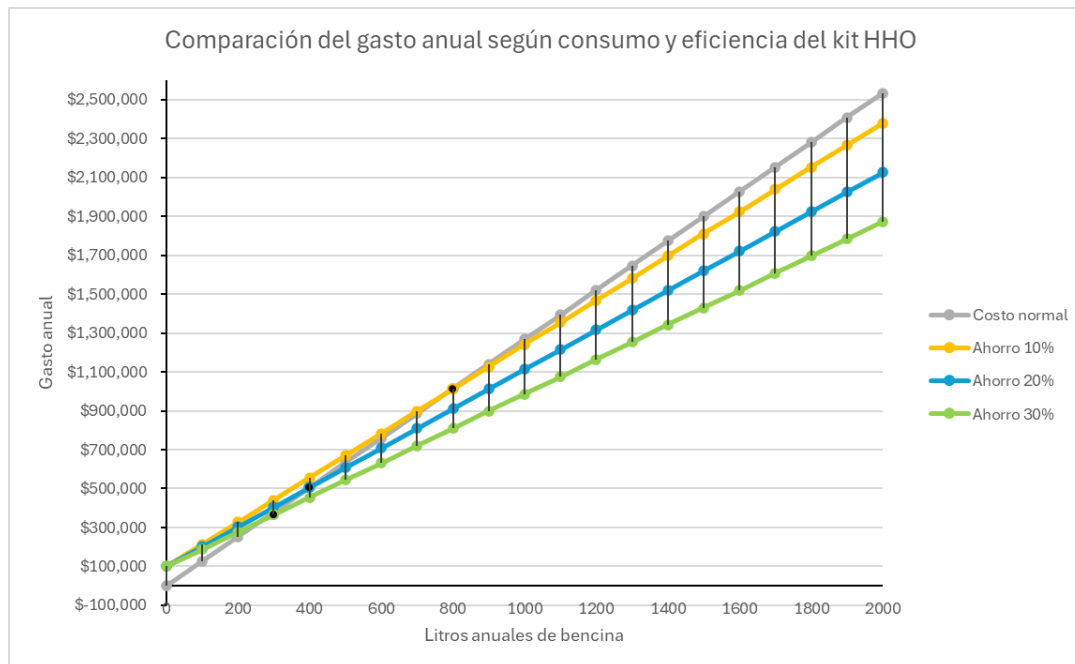


Gráfico 19 Comparación del gasto anual según consumo y eficiencia del kit HHO

El Gráfico 19 presenta cuatro rectas crecientes, todas de comportamiento lineal. La pendiente disminuye con el aumento en la eficiencia del sistema HHO, lo que refleja una menor tasa de gasto por litro consumido. Inicialmente, todas las curvas con HHO superan al gasto base, producto del costo fijo del sistema. Sin embargo, a partir de cierto nivel de consumo, cada curva intercepta a la línea base. Desde ese punto, el sistema comienza a generar ahorro neto. La brecha entre curvas aumenta con el consumo, evidenciando que los beneficios económicos crecen proporcionalmente al uso y a la eficiencia del sistema.

Tabla 6 Matriz de litros consumidos vs pesos chilenos

Matriz de litros consumidos vs pesos chilenos				
Litros /Año	Costo normal	Eficiencia 10%	Eficiencia 20%	Eficiencia 30%
0	\$ -	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000
100	\$ 126,700	\$ 214,030	\$ 201,360	\$ 188,690
200	\$ 253,400	\$ 328,060	\$ 302,720	\$ 277,380
300	\$ 380,100	\$ 442,090	\$ 404,080	\$ 366,070
400	\$ 506,800	\$ 556,120	\$ 505,440	\$ 454,760
500	\$ 633,500	\$ 670,150	\$ 606,800	\$ 543,450
600	\$ 760,200	\$ 784,180	\$ 708,160	\$ 632,140
700	\$ 886,900	\$ 898,210	\$ 809,520	\$ 720,830
800	\$ 1,013,600	\$ 1,012,240	\$ 910,880	\$ 809,520
900	\$ 1,140,300	\$ 1,126,270	\$ 1,012,240	\$ 898,210
1000	\$ 1,267,000	\$ 1,240,300	\$ 1,113,600	\$ 986,900
1100	\$ 1,393,700	\$ 1,354,330	\$ 1,214,960	\$ 1,075,590
1200	\$ 1,520,400	\$ 1,468,360	\$ 1,316,320	\$ 1,164,280
1300	\$ 1,647,100	\$ 1,582,390	\$ 1,417,680	\$ 1,252,970
1400	\$ 1,773,800	\$ 1,696,420	\$ 1,519,040	\$ 1,341,660
1500	\$ 1,900,500	\$ 1,810,450	\$ 1,620,400	\$ 1,430,350
1600	\$ 2,027,200	\$ 1,924,480	\$ 1,721,760	\$ 1,519,040
1700	\$ 2,153,900	\$ 2,038,510	\$ 1,823,120	\$ 1,607,730
1800	\$ 2,280,600	\$ 2,152,540	\$ 1,924,480	\$ 1,696,420
1900	\$ 2,407,300	\$ 2,266,570	\$ 2,025,840	\$ 1,785,110
2000	\$ 2,534,000	\$ 2,380,600	\$ 2,127,200	\$ 1,873,800

Escenario de eficiencia del 10%

El umbral de rentabilidad en este escenario se alcanza con un consumo anual de aproximadamente 785 litros de combustible. Asumiendo un rendimiento promedio de 12 km por litro, esto equivale a 9.420 km recorridos al año, o 785 km mensuales. Esta cifra deja un margen relativamente estrecho respecto al promedio estimado nacional de 12.000 km al año, por lo que el kit resulta económicamente rentable para un usuario promedio, así como para aquellos que realizan viajes interurbanos frecuentes o utilizan su vehículo como herramienta de trabajo, como es el caso de conductores de aplicaciones, taxis colectivos o servicios de transporte privado. En contraste, no es recomendable para usuarios que recorren menos de 785 km mensuales, ya que en ese rango el ahorro generado no alcanza a cubrir el costo anual del sistema. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este análisis se basa en un escenario pesimista tanto en términos de eficiencia técnica (10 %) como de inversión inicial, utilizando

un valor alto de referencia para el sistema HHO (\$400.000 CLP) e incluyendo gastos de mantenimiento.

Escenario de eficiencia del 20%

En este escenario, el sistema HHO alcanza su punto de equilibrio económico con un consumo anual de aproximadamente 400 litros de combustible. Considerando una autonomía promedio de 12 km/litro, esto equivale a 4.800 km recorridos al año, o 400 km mensuales. Este umbral es considerablemente inferior al promedio nacional estimado de 12.000 km al año, por lo que el sistema se vuelve rentable para una amplia gama de usuarios con un uso regular del vehículo, incluso sin requerir un uso intensivo. Conductores que utilicen su automóvil unas tres veces por semana o que realicen trayectos urbanos constantes podrían superar este umbral con facilidad.

Escenario de eficiencia del 30%

En este escenario, el sistema HHO alcanza su umbral de rentabilidad con un consumo anual de aproximadamente 270 litros de combustible, lo que equivale a 3.240 km recorridos al año, o 270 km mensuales, considerando un rendimiento de 12 km por litro.

Este umbral es extraordinariamente bajo, lo que implica que el sistema se vuelve rentable incluso para usuarios de bajo uso vehicular, como quienes utilizan su automóvil solo los fines de semana o de manera ocasional. En términos prácticos, basta con conducir poco más de 9 km diarios para comenzar a generar ahorro neto. Este escenario representa el rango óptimo de desempeño del sistema HHO, en el que su adopción resulta justificable en casi cualquier perfil de uso.

En términos económicos, la rentabilidad del kit HHO está directamente condicionada por la eficiencia técnica alcanzada y el nivel de consumo anual del usuario como era de esperar, a mayor eficiencia y mayor uso del vehículo, más rápido se recupera la inversión y mayores

son los beneficios acumulados en el tiempo. El análisis permite identificar umbrales operativos precisos, que definen el punto de equilibrio económico para cada escenario, validando su aplicabilidad incluso bajo condiciones conservadoras.

Adicionalmente, este modelo se centra exclusivamente en el ahorro por combustible, sin considerar externalidades técnicas ya reportadas en la literatura, como la disminución de residuos de combustión, cabe recordar que la acumulación de residuos de combustión incompleta contribuye al desgaste de componentes mecánicos y a una disminución progresiva en la eficiencia del motor, afectando tanto su desempeño como su vida útil operativa. Estos factores podrían generar ahorros indirectos relevantes en mantenimiento y reparaciones, incrementando el valor funcional y económico del kit HHO en un horizonte de mediano a largo plazo.

5.3 Impacto ambiental en Chile

Para evaluar el impacto ambiental de la eventual implementación del sistema generador de hidrógeno HHO en vehículos livianos particulares, es necesario establecer primero las emisiones anuales típicas de un automóvil. Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [32], un vehículo de pasajeros promedio emite alrededor de 4,6 toneladas métricas de CO₂ al año, equivalentes a 4.600 kg.

Por otra parte, la composición de los gases de escape está definida aproximadamente por los siguientes porcentajes en volumen y masa representados en el Gráfico 20 [33]:

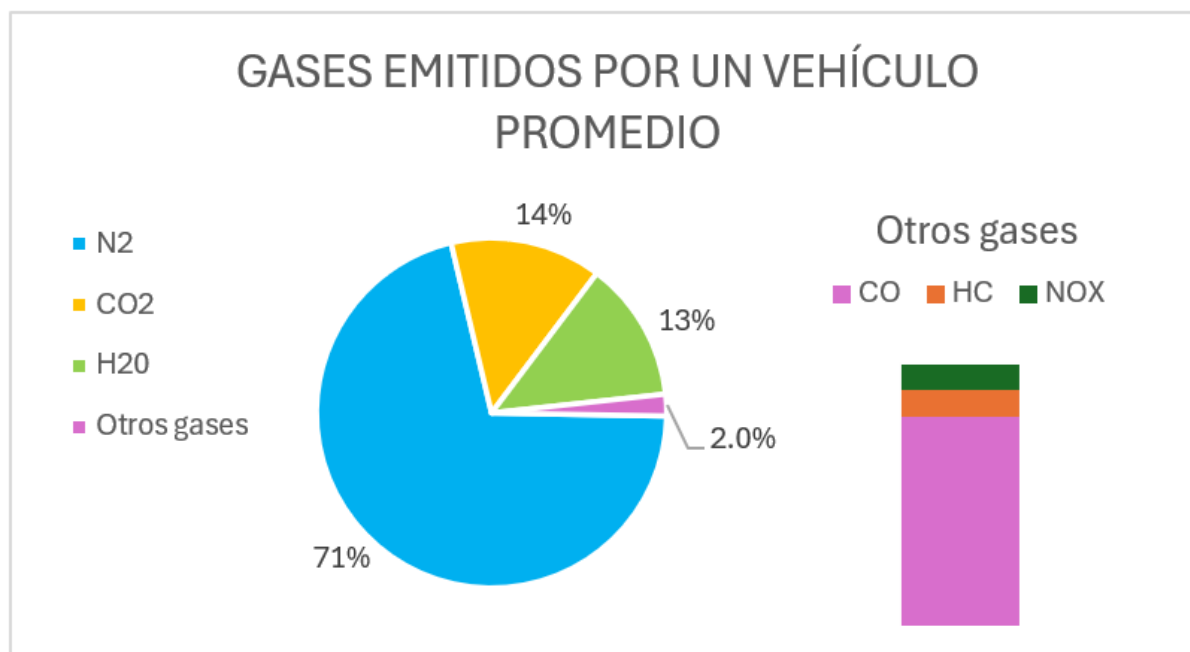


Gráfico 20 Gases emitidos por un automóvil promedio (elaboración propia)

Con estos antecedentes, se puede estimar el total de gases emitidos por un vehículo al año y, en consecuencia, la cantidad de monóxido de carbono (CO), Hidrocarburos y Óxidos nítricos emitidos, gases altamente tóxicos y relevante para la salud pública.

Masa total anual de gases emitidos:

$$Masa\ total\ gases = \frac{masa\ CO_2}{0,14} \quad (13)$$

$$Masa\ total\ gases = \frac{4.600}{0.14} = 30.857 \frac{kg}{año} \quad (13)$$

Masa de CO emitido:

$$Masa\ de\ CO = 32.857 \frac{kg}{año} \times 0,02 \times 0.8 \approx 526 \frac{kg}{año} \quad (14)$$

Masa de HC emitido:

$$Masa\ de\ HC = 32.857 \frac{kg}{año} \times 0,02 \times 0.1 \approx 66 \frac{kg}{año} \quad (15)$$

Masa de NOx emitido:

$$Masa\ de\ NOx = 32.857 \frac{kg}{año} \times 0,02 \times 0.1 \approx 66 \frac{kg}{año} \quad (16)$$

Con los datos previamente establecidos, es posible calcular el impacto ambiental potencial que tendría la implementación del kit HHO en el parque vehicular liviano particular a nivel país.

Reducción de CO₂

Uno de los principales gases emitidos por los motores de combustión interna es el dióxido de carbono (CO₂) el cual ronda los 4.600 kilos/año por vehículo promedio. Si bien no es un gas tóxico en términos directos para la salud humana, su concentración en la atmósfera está directamente relacionada con el fenómeno del calentamiento global y el cambio climático. Por esta razón, resulta fundamental evaluar su comportamiento en el marco de la implementación del kit HHO.

Según los estudios revisados, la instalación del kit puede lograr reducciones de emisiones de CO₂ que oscilan entre un 13,5 % y un 26,4 %, dependiendo de la configuración del sistema, las condiciones operativas y el tipo de motor. Este rango permite proyectar escenarios realistas de mitigación ambiental, tanto en condiciones conservadoras como en situaciones de máximo desempeño técnico.

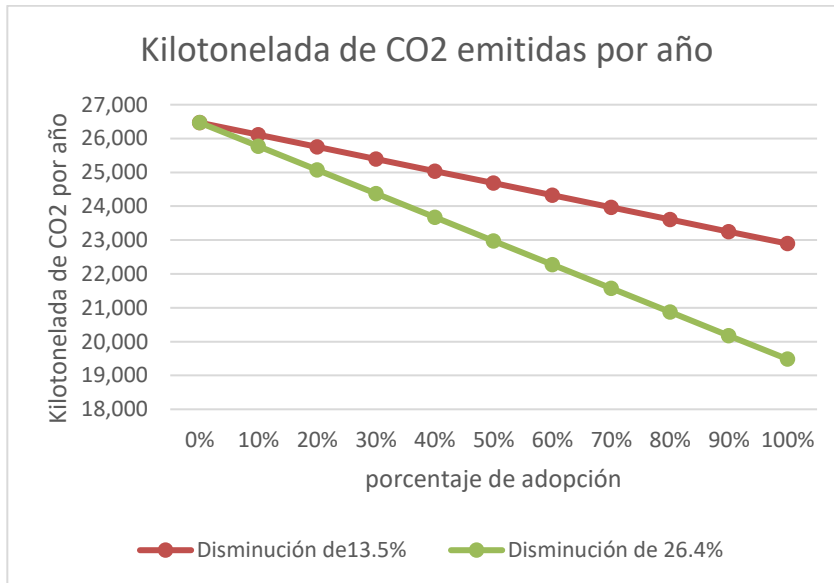


Gráfico 21 Kilotonelada de CO₂ emitidas por año.

El Gráfico 21 presenta una tendencia lineal decreciente, lo que es coherente con una relación proporcional entre el nivel de adopción del sistema HHO y la reducción de emisiones por vehículo. Si bien las mejoras son constantes, el impacto comienza a ser significativamente relevante cuando la adopción supera niveles intermedios, lo que refuerza la idea de que esta

tecnología adquiere sentido estratégico principalmente bajo escenarios de implementación masiva.

Tabla 7 Kilotonelada de CO2 emitido según eficiencia de kit HHO y adopción

Adopción	kilotonelada de CO2 emitido	
	Disminución de 13.5%	Disminución de 26.4%
0%	26469	26469
10%	26111	25770
20%	25754	25071
30%	25397	24372
40%	25039	23674
50%	24682	22975
60%	24325	22276
70%	23967	21577
80%	23610	20879
90%	23253	20180
100%	22895	19481

Según la Tabla 7, bajo un escenario pesimista, con una adopción del 10 % del sistema HHO en el parque vehicular liviano, las emisiones anuales de CO₂ se reducirían entre 358 y 699 kilotoneladas, según la eficiencia del sistema. Esta magnitud es equivalente a la captura anual de entre 17 y 33 millones de árboles maduros, o a evitar la quema de hasta 280.000 toneladas de carbón, lo que da cuenta de su potencial como medida de mitigación climática incluso en fases tempranas de implementación.

En contraste, un escenario optimista con un 70 % de adopción permitiría una reducción mucho más significativa, con emisiones totales de CO₂ disminuyendo en un rango de 2.502 a 4.892 kilotoneladas por año, dependiendo de la eficiencia del sistema. Este volumen de CO₂ equivale a la captura anual de entre 119 y 233 millones de árboles adultos, o a evitar la quema de hasta 2 millones de toneladas de carbón mineral, lo que representa una mitigación sustancial en términos de balance de carbono. Esta magnitud posiciona al kit HHO como una herramienta de impacto nacional en estrategias de reducción de gases de efecto invernadero.

Reducción de CO

El monóxido de carbono (CO) es uno de los gases más críticos desde el punto de vista sanitario emitidos por los motores de combustión interna. Se trata de un gas incoloro, inodoro y altamente tóxico, cuya exposición puede generar efectos neurológicos severos, pérdida de conciencia e incluso la muerte en ambientes cerrados o mal ventilados. A nivel urbano, es uno de los principales responsables de la contaminación atmosférica directa asociada al tráfico vehicular. Según los estudios revisados, la instalación del kit puede lograr reducciones significativas de emisiones de CO₂, que oscilan entre un 13,5 % y un 26,4 %. Por tanto, resulta relevante proyectar su disminución potencial a nivel país, considerando distintos niveles de adopción tecnológica.

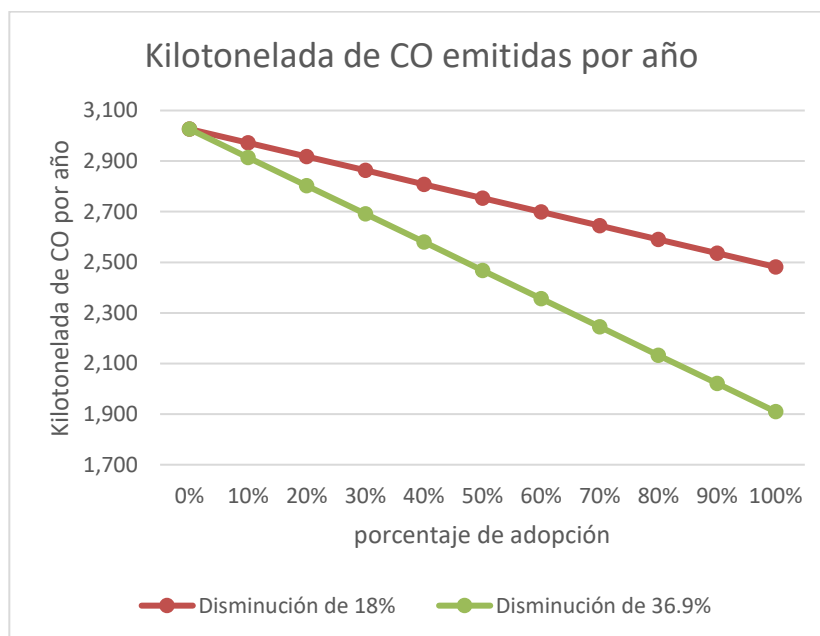


Gráfico 22 Kilotonelada de CO emitidas por año

El Gráfico 22 muestra una reducción lineal en las emisiones de CO en función del nivel de adopción del sistema HHO. Sin embargo, a diferencia de otros contaminantes, lo más relevante en este caso es la amplitud del rango de eficiencia (18 % a 36,9 %), lo que genera una brecha cada vez más pronunciada entre ambos escenarios a medida que se incrementa la adopción. Esta característica hace que el impacto ambiental del sistema sea proporcionalmente

más significativo en escenarios de implementación masiva, reforzando su valor como herramienta efectiva para mitigar contaminantes altamente tóxicos como el CO.

Tabla 8 Kilotonelada de CO emitido según eficiencia de kit HHO y adopción.

Adopción	kilotonelada de CO emitido	
	Disminución de 18%	Disminución de 36.9%
0%	3027	3027
10%	2972	2915
20%	2918	2803
30%	2863	2692
40%	2809	2580
50%	2754	2468
60%	2700	2357
70%	2645	2245
80%	2591	2133
90%	2536	2021
100%	2482	1910

Según la Tabla 8, en un escenario pesimista, con un 10 % de adopción del sistema HHO, las emisiones anuales de monóxido de carbono (CO) se reducen entre 55.000 y 112.000 toneladas, dependiendo del nivel de eficiencia técnica alcanzado. Esta masa corresponde a la liberación evitada de entre 48 y 98 millones de metros cúbicos de CO gaseoso a condiciones ambientales, volumen equivalente de hasta 39.000 piscinas olímpicas llenas exclusivamente de gas tóxico evitado.

Bajo un escenario optimista, con un 70 % de adopción del sistema HHO, las emisiones anuales de monóxido de carbono (CO) disminuirían en un rango de 382.000 a 782.000 toneladas, según la eficiencia técnica alcanzada. Esta reducción equivale a evitar la liberación de entre 170 y 348 millones de metros cúbicos de CO gaseoso a condiciones ambientales, volumen equivalente de hasta más de 270.000 piscinas olímpicas llenas de este gas. lo que posiciona al kit HHO como una herramienta viable para mitigar emisiones primarias en entornos urbanos de alta densidad.

Reducción de HC

Los hidrocarburos no quemados (HC) corresponden a compuestos orgánicos volátiles liberados como resultado de la combustión incompleta del combustible. Muchos de estos compuestos son tóxicos, cancerígenos o mutagénicos, y participan en reacciones fotoquímicas que generan ozono troposférico (O_3) y smog fotoquímico, afectando directamente la calidad del aire en zonas urbanas. Además, los HC influyen en el deterioro de la salud respiratoria, especialmente en niños y personas con enfermedades pulmonares crónicas. De acuerdo con la literatura técnica analizada, la incorporación del kit HHO permite reducir las emisiones de HC en un rango que va desde un 5% en condiciones mínimas hasta un 24,4% en escenarios de mayor eficiencia. Dada su alta reactividad y su rol en la contaminación secundaria del aire, resulta relevante cuantificar su reducción potencial a escala nacional bajo distintos niveles de adopción de esta tecnología.

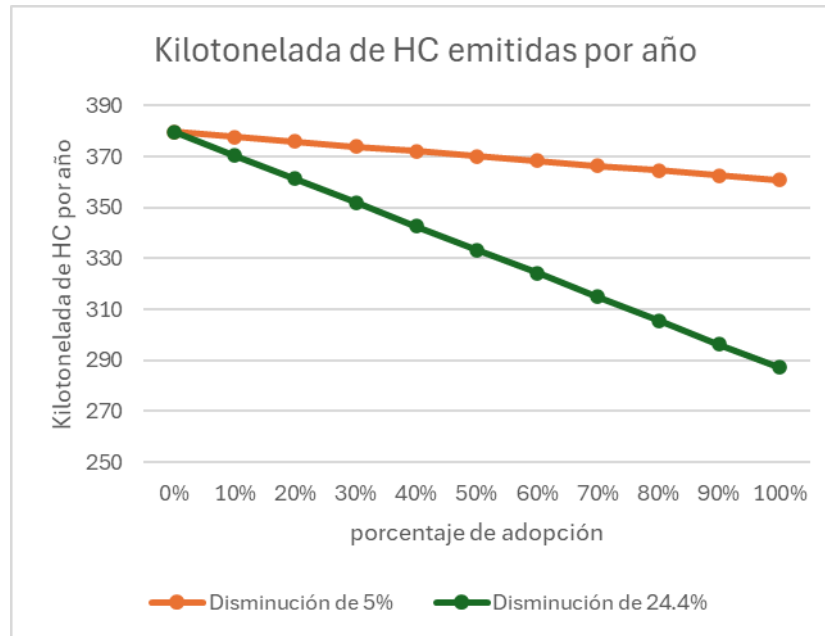


Gráfico 23 Kilotonelada de HC emitidas por año

El Gráfico 23 evidencia una disminución lineal en las emisiones de HC a medida que aumenta la adopción del sistema HHO. A diferencia de otros gases, en este caso el impacto visual del gráfico es más contrastante debido a la gran diferencia relativa entre los extremos del

rango de eficiencia: desde un modesto 5 % hasta un 24,4 %. Esta amplitud genera una brecha progresivamente mayor entre ambos escenarios, lo que permite apreciar con claridad cómo el sistema solo alcanza reducciones significativas cuando opera con alta eficiencia técnica y en niveles elevados de adopción.

Tabla 9 Kilotonelada de HC emitido

Adopción	kilotonelada de HC emitido	
	Disminución de 5%	Disminución de 24.4%
0%	380	380
10%	378	371
20%	376	361
30%	374	352
40%	372	343
50%	370	333
60%	368	324
70%	366	315
80%	365	306
90%	363	296
100%	361	287

Desde una perspectiva cuantitativa, según la Tabla 9, en un escenario pesimista de 10 % de adopción, las emisiones de HC se reducen levemente a 2.000 toneladas anuales con eficiencia del 5 %, o a 9.000 toneladas anuales con eficiencia del 24,4 %. Esta diferencia equivale a eliminar las emisiones de HC de alrededor de 136.000 vehículos livianos, una magnitud comparable a el parque vehicular de toda la región de Tarapacá.

En el escenario optimista de 70 % de adopción, la reducción es de hasta 65.000 toneladas anuales. Esta disminución equivale a eliminar las emisiones de HC de alrededor de 985.000 de vehículos, equivalente a la cantidad de vehículos de varias ciudades de Chile en conjunto. lo que evidencia el valor ambiental agregado del sistema bajo una adopción generalizada y un diseño eficiente.

Reducción de NO_x

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), principalmente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son contaminantes altamente reactivos generados en motores de combustión a altas temperaturas. Estos compuestos contribuyen a la formación de ozono a nivel del suelo, material particulado secundario (PM_{2.5}) y lluvia ácida, además de provocar efectos adversos directos sobre la salud humana. Según los antecedentes técnicos revisados, la implementación del sistema HHO puede lograr una reducción de emisiones de NO_x en un rango que va desde un 15 % en condiciones conservadoras hasta un 19,4 % en condiciones óptimas. Esto se puede explicar desde un punto de vista cinético, donde la formación de NO_x se rige por reacciones altamente activadas, cuya velocidad depende exponencialmente de la temperatura y del contenido de oxígeno disponible. La presencia de H₂ puede modificar la composición local de radicales (O, OH, H) y promover rutas de reacción más rápidas y completas para los hidrocarburos, lo que reduce la cantidad de oxígeno libre y acorta la duración de la zona de alta temperatura, limitando así la formación de NO_x. Dada la relevancia sanitaria de este contaminante, incluso reducciones moderadas pueden traducirse en mejoras sustantivas en la calidad del aire urbano.

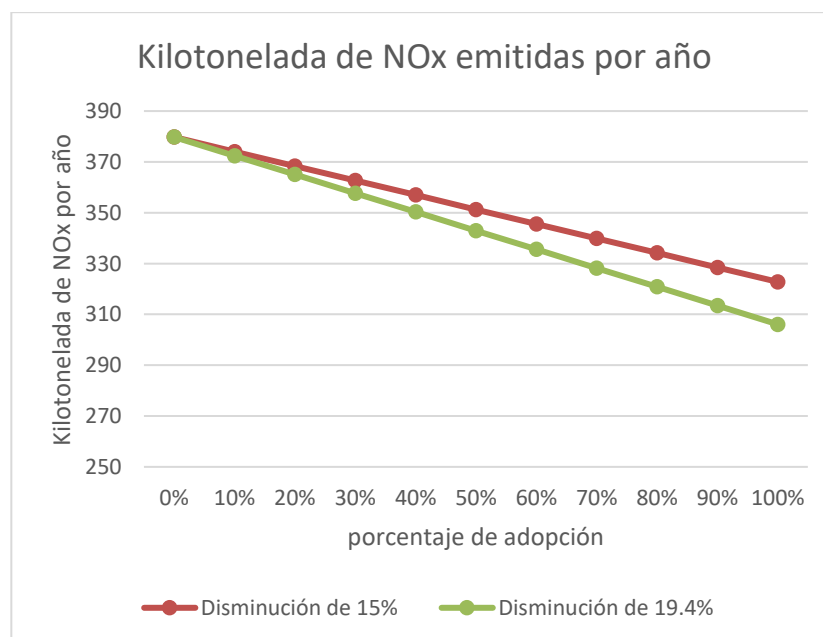


Gráfico 24 Kilotonelada de NO_x emitidas por año

El Gráfico 24 muestra una disminución lineal clara en las emisiones anuales de óxidos de nitrógeno (NO_x) en función del nivel de adopción del sistema HHO. A pesar de que el rango de eficiencia técnica es más acotado que en otros contaminantes (15 % a 19,4 %), el impacto ambiental de estas reducciones es considerable, dada la alta reactividad y peligrosidad de este compuesto. La pendiente de las curvas es constante, pero el hecho de que ambas se mantengan separadas de forma progresiva refleja que incluso mejoras porcentuales moderadas pueden tener efectos acumulados importantes a gran escala, especialmente en entornos urbanos.

Tabla 10 kilotonelada de NO_x emitido

Adopción	kilotonelada de NO _x emitido	
	Disminución de 15%	Disminución de 19.4%
0%	380	380
10%	374	372
20%	368	365
30%	363	358
40%	357	350
50%	351	343
60%	346	336
70%	340	328
80%	334	321
90%	329	313
100%	323	306

En un escenario pesimista, con 10 % de adopción, las emisiones de NO_x se reducen entre 6.000 toneladas (15%) y 8.000 toneladas (19.4%) al año. Aunque esta diferencia pueda parecer modesta, equivale a neutralizar las emisiones de NO_x de más de 120.000 vehículos livianos, con beneficios directos sobre la calidad del aire en zonas de alta densidad vehicular.

En el escenario optimista, con 70 % de adopción, la disminución alcanza niveles mucho más relevantes: entre 40.000 toneladas (15%) y 52.000 toneladas (19.4%) al año. Esta cantidad equivale a eliminar las emisiones de NO_x de más 780.000 vehículos livianos, lo que refuerza el rol estratégico que puede jugar esta tecnología en la mitigación de contaminantes primarios en ciudades con alta congestión y problemas respiratorios asociados como lo es Santiago de Chile.

6 Comparación con otros tipos de transportes sostenibles

Con el objetivo de evaluar de manera integral la viabilidad del sistema generador de hidrógeno HHO frente a otras tecnologías sostenibles en el contexto chileno, esta sección desarrolla un análisis comparativo que va más allá de las descripciones técnicas generales. Se consideran además los resultados cuantitativos obtenidos en los capítulos anteriores en relación con consumo energético, reducción de emisiones y ahorro económico, con el fin de contextualizar su desempeño frente a soluciones como los vehículos eléctricos, híbridos, a gas natural (GLP/GNC) y de hidrógeno puro (FCEV).

La comparación se estructura en torno a tres dimensiones clave: eficiencia energética, impacto ambiental y costos económicos asociados tanto a la implementación como a la operación de cada tecnología. Para cada eje se presentan indicadores específicos que permiten contrastar el sistema HHO en igualdad de condiciones con las demás opciones disponibles. Esto incluye consumos por kilómetro, niveles de emisiones directas e indirectas, precios de adquisición, infraestructura requerida y características técnicas relevantes.

Este enfoque tiene como finalidad no solo determinar cuál tecnología es más limpia o eficiente desde una perspectiva teórica, sino también identificar cuál representa una alternativa viable y aplicable en la realidad chilena actual, considerando factores estructurales como el precio de los combustibles, la distribución del parque vehicular, la capacidad adquisitiva de los usuarios y el estado de la infraestructura energética nacional. De este modo, se busca ofrecer una evaluación rigurosa que permita fundamentar técnicamente la incorporación o no del sistema HHO como una solución transitoria o complementaria en el proceso de descarbonización del transporte en Chile.

Vehículos Eléctricos:

Los vehículos eléctricos (ver Figura 21) son, desde el punto de vista energético, la alternativa más eficiente, con rendimientos que alcanzan hasta un 90 % en la conversión de energía eléctrica en movimiento. Consumen en promedio 15 a 18 kWh cada 100 km y no requieren combustibles fósiles durante su operación. Sin embargo, su impacto ambiental no es nulo. La electricidad utilizada para la carga puede provenir parcialmente de fuentes fósiles, lo que genera emisiones indirectas de CO₂. En el caso de Chile, la matriz eléctrica es mixta: alrededor del 67% proviene de energías renovables [34], mientras que el resto se origina en centrales térmicas a carbón, gas o diésel.

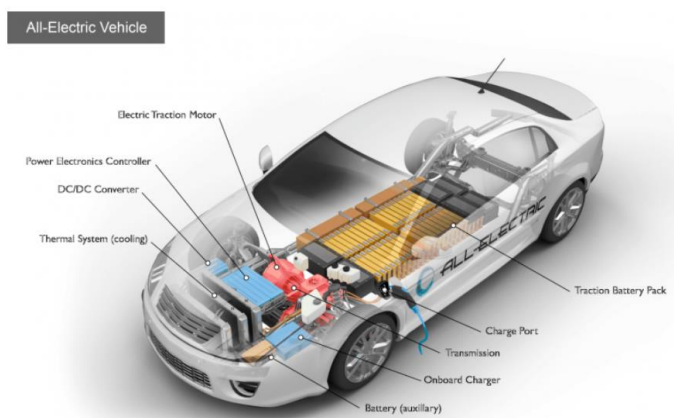


Figura 21 vehículo eléctrico. Imagen del Alternative Fuels Data Center (Gobierno de Estados Unidos).

Además, la fabricación de las baterías de iones de litio implica impactos ambientales relevantes. La extracción y procesamiento de materiales como litio, cobalto y níquel genera altas emisiones de CO₂, junto con consumo intensivo de agua y energía. Se estima que cada batería puede generar entre 3 y 8 toneladas de CO₂ durante su fabricación.

En términos económicos, su principal limitante es el costo de adquisición, que sigue siendo elevado. En Chile, un vehículo eléctrico de gama media tiene un precio entre \$25 y \$30 millones CLP, lo que lo hace inaccesible para la mayoría de la población, especialmente considerando que el parque vehicular nacional se compone en gran parte por vehículos usados o de segunda mano.

Vehículos Híbridos:

Los vehículos híbridos combinan un motor de combustión interna con uno o más motores eléctricos asistidos por baterías (ver Figura 22). Esta configuración permite una mejora en la eficiencia energética de entre un 20 % y 40 % respecto a vehículos convencionales, con un consumo estimado de entre 4,5 y 6,5 litros de combustible por cada 100 km, dependiendo del modelo y las condiciones de uso.

A nivel ambiental, los híbridos generan emisiones directas de CO₂ y contaminantes locales, aunque en menor cantidad que los motores tradicionales (reducción estimada entre 20 % y 30 % [35]). El uso del motor eléctrico en desplazamientos a baja velocidad permite reducir emisiones urbanas, especialmente en tráfico denso. No obstante, su impacto sigue siendo significativo, ya que el motor a combustión mantiene un rol principal en carretera y a velocidades medias-altas.

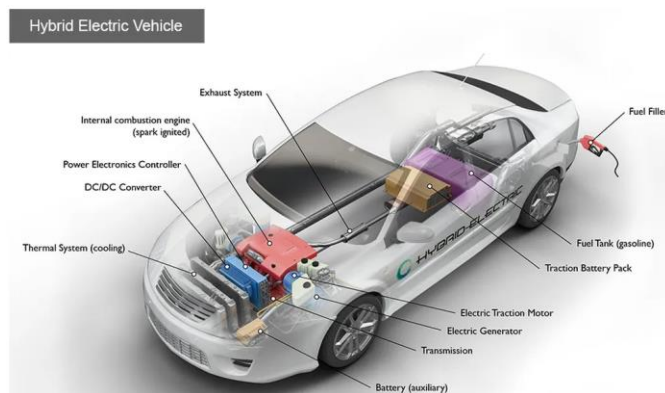


Figura 22 Esquema de vehículo híbrido. Imagen del Alternative Fuels Data Center (Gobierno de Estados Unidos).

En cuanto a las emisiones indirectas, si bien las baterías son de menor capacidad que en los vehículos eléctricos, su fabricación también implica la extracción de materiales críticos como litio, aunque en menores cantidades. Este proceso genera una huella de carbono moderada, pero inferior a la de un vehículo eléctrico.

En términos económicos, los vehículos híbridos presentan un costo de adquisición menor que los eléctricos puros. En Chile, los precios oscilan entre \$18 y \$25 millones CLP para modelos de gama media, lo que sigue representando una barrera para muchos usuarios.

Vehículos de Hidrógeno:

Los vehículos a hidrógeno utilizan una celda de combustible que convierte hidrógeno gaseoso en electricidad para alimentar un motor eléctrico (ver Figura 23). Su eficiencia energética es moderada, con un rendimiento estimado entre 30 % y 60 % [36], y un consumo aproximado de 1 kg de hidrógeno por cada 100 km recorridos.

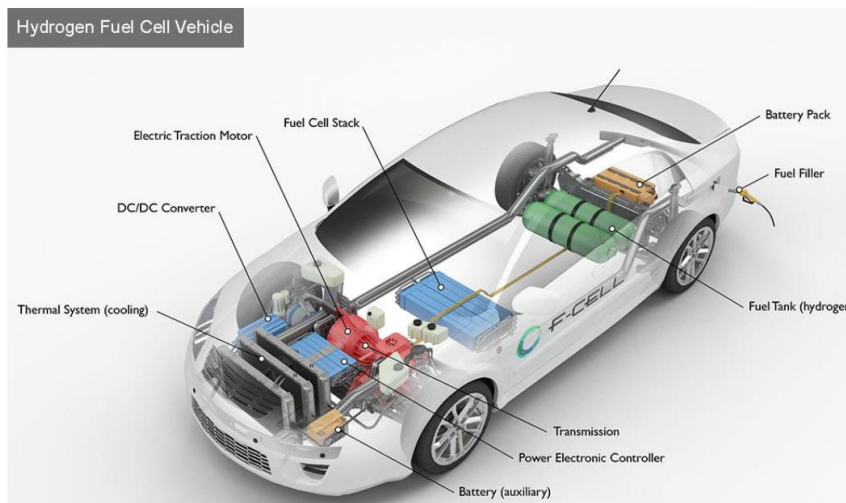


Figura 23 Esquema Vehículo Hidrogeno. Imagen del Alternative Fuels Data Center (Gobierno de Estados Unidos).

Durante su operación, no emiten contaminantes locales, solo vapor de agua como subproducto, lo que los posiciona como una tecnología de cero emisiones locales. No obstante, el impacto ambiental depende del origen del hidrógeno: si es hidrógeno gris (producido a partir de gas natural sin captura de CO₂), las emisiones indirectas pueden ser elevadas; en cambio, el hidrógeno verde, generado por electrólisis con energías renovables, tiene una huella casi nula, aunque su producción es limitada y costosa.

La infraestructura en Chile para este tipo de vehículos es prácticamente inexistente, y la producción de hidrógeno verde se encuentra aún en fase piloto. En cuanto al costo, los FCEV son altamente costosos, con precios que superan los \$55 millones CLP por unidad, lo que los hace inviables para el uso masivo en el corto plazo.

Vehículos a Gas (GNC/GLP):

Los vehículos a gas utilizan gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural comprimido (GNC) como combustible, ya sea en motores diseñados específicamente para ello (ver Figura 24) o mediante kits de conversión instalados en motores a gasolina. Su eficiencia energética es similar o ligeramente superior a la gasolina estimado en un 32.5%, con consumos aproximados de 6 a 8 litros equivalentes cada 100 km, dependiendo del tipo de gas y el sistema de conversión.



Figura 24 Esquema Vehículo a gas. Imagen del Alternative Fuels Data Center (Gobierno de Estados Unidos).

En términos ambientales, emiten menos CO₂, NO_x y material particulado que los motores a gasolina o diésel, lo que mejora la calidad del aire en entornos urbanos. Sin embargo, al ser combustibles fósiles, no eliminan las emisiones de carbono, y su uso prolonga la dependencia energética del petróleo y del gas natural.

Desde el punto de vista económico, su principal ventaja es el bajo costo de conversión, que varía entre \$1 y \$2 millones CLP dependiendo del sistema. Además, el precio del gas es inferior al de la bencina, lo que permite reducir el gasto operativo. No obstante, la infraestructura de carga en Chile es limitada y la autonomía por carga suele ser menor que la de un vehículo convencional.

Vehículos con Sistema HHO:

El sistema HHO consiste en un kit que genera gas oxihidrógeno a partir de agua mediante electrólisis, utilizando la energía eléctrica del vehículo (ver Figura 25). El gas se inyecta en el sistema de admisión para enriquecer la mezcla aire-combustible. El sistema HHO surge como una tecnología de mejora aplicada a vehículos existentes.

Según la literatura presentada, permite una reducción del consumo de combustible entre un 10 % y 30 %, dependiendo del tipo de motor, caudal de gas y condiciones operativas. Su eficiencia mejora la combustión y favorece un mayor aprovechamiento energético del combustible convencional.



Figura 25 esquema simple de sistema HHO

En términos ambientales, se reportan reducciones de CO₂ entre 13,5 % y 26,4 %, y de CO hasta un 39,9 %, junto con descensos en emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), estas cifras varían según el régimen de operación y diseño.

El costo estimado del kit varía entre \$150.000 y \$400.000 CLP, con una vida útil cercana a los 5 años. A diferencia de las otras tecnologías no es un vehículo nuevo, sino un dispositivo que se integra en motores convencionales sin hacer una modificación extrema como los vehículos a gas, lo que lo hace más accesible.

6.1 Comparación de la eficiencia energética:

La eficiencia energética representa la relación entre la energía útil entregada por un sistema de propulsión y la energía total consumida para su funcionamiento. En el ámbito del transporte, este indicador permite cuantificar qué tan eficientemente una tecnología convierte el combustible o la energía eléctrica en movimiento, y, por ende, cuánta energía se pierde en forma de calor, fricción u otros procesos no útiles.

En esta sección se comparan las principales tecnologías sostenibles disponibles o proyectadas para el contexto chileno: vehículos eléctricos, híbridos, a hidrógeno, a gas (GLP/GNC) y el kit HHO aplicado a motores de combustión interna. La comparación se presenta en términos de rangos de eficiencia y consumo estimado por cada 100 km recorridos, utilizando valores obtenidos de la literatura técnica especializada, resumido en la Tabla 11.

Tabla 11 Eficiencia energética y consumo de cada tecnología

Tecnología	Eficiencia energética (%)	Consumo estimado por 100km
Vehículo convencional	25-30.0	7-12 litros de gasolina
Vehículo con Kit HHO	33-39	4.9-10.8 litros de gasolina
Vehículo híbrido	36-42	4.5-6.5 litros de gasolina
Vehículo a gas (GLP/GNC)	28-32.5	6-8 Litros eq. gas
Vehículo a hidrógeno (FCEV)	30-60	1 kg de h2 (~3,3 litros gasolina equivalentes).
Vehículo eléctrico (VE)	70-90	15-18 kWh

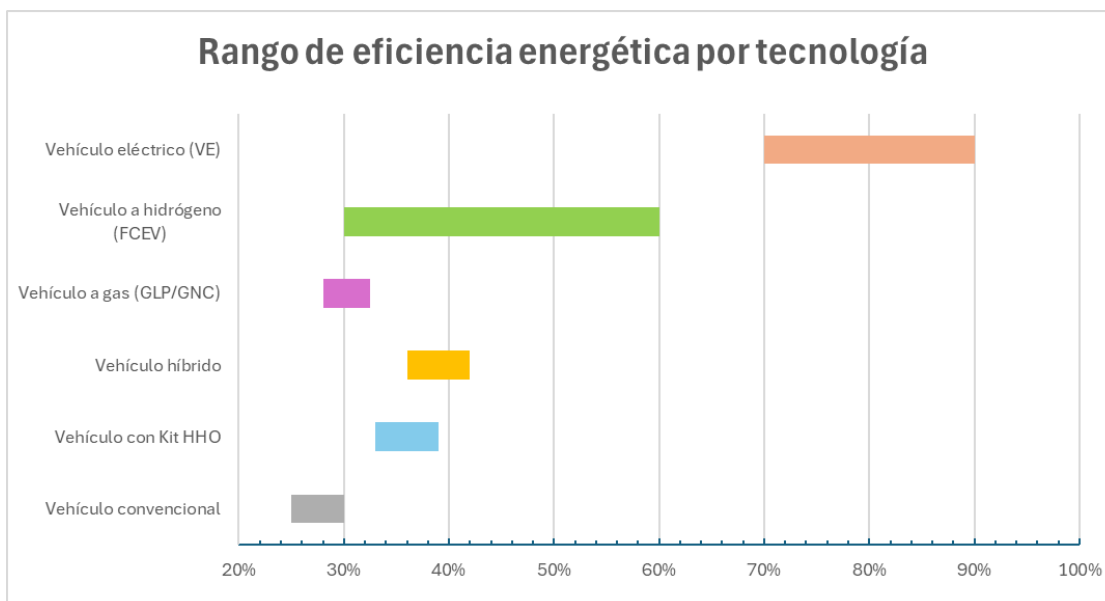


Gráfico 25 Rango de eficiencia energética por tecnología.

Según el Gráfico 25, la comparación general entre tecnologías revela una amplia dispersión en los niveles de eficiencia energética, con diferencias superiores a los 60 puntos porcentuales entre la alternativa más eficiente y la menos eficiente del conjunto.

El vehículo eléctrico presenta el mejor desempeño, con eficiencias que alcanzan hasta un 90 %, producto de la conversión directa de energía eléctrica en trabajo mecánico, sin etapas térmicas intermedias ni fricción mecánica relevante. Este nivel de eficiencia se refleja en consumos bajos, del orden de 15 a 18 kWh por cada 100 km recorridos, convirtiéndolo en la opción técnicamente más eficiente.

En el extremo opuesto, se encuentran tecnologías térmicas cuya eficiencia no supera el 32 %, como ocurre en vehículos a gas natural o licuado. Estos presentan consumos equivalentes de 6 a 8 litros de gas cada 100 km, lo que, lo que refleja un aprovechamiento energético limitado desde el punto de vista termodinámico.

El vehículo a hidrógeno (FCEV) exhibe un rango de eficiencia particularmente amplio, entre 30 % y 60 %, influido por el tipo de celda, el sistema de almacenamiento y las pérdidas en la cadena de conversión. Su consumo promedio, de 1 kg de hidrógeno cada 100 km, equivale aproximadamente a 3,3 litros de gasolina en contenido energético. En configuraciones óptimas, esta tecnología supera a soluciones híbridas y térmicas, aunque su adopción depende fuertemente del desarrollo de infraestructura de producción y carga.

El kit HHO, por su parte, permite una mejora relativa de entre 10 % y 30 % sobre el rendimiento base del motor, gracias a una combustión más rápida y completa facilitada por la inyección de gas oxihidrógeno. Esta mejora se traduce en una disminución del consumo desde valores típicos de 7 a 12 litros cada 100 km (caso base) a un rango proyectado entre 4,9 y 10,8 litros, dependiendo de la configuración del sistema, la gestión electrónica y las condiciones de operación.

En conjunto, el análisis muestra que las tecnologías basadas en electrificación ya sea a través de baterías o hidrógeno presentan un mejor aprovechamiento energético y menores requerimientos por kilómetro recorrido. En cambio, las soluciones que conservan la combustión interna, aunque mejoradas mediante sistemas como el HHO o la hibridación, siguen presentando consumos más elevados y menores eficiencias relativas. La elección entre ellas dependerá no solo del rendimiento energético, sino también de su integración en el entorno operativo y de las condiciones tecnológicas del sistema de transporte.

6.2 Comparación de impacto ambiental:

El impacto ambiental asociado al transporte no se limita exclusivamente a las emisiones generadas durante la operación directa del vehículo, sino que también considera los efectos indirectos asociados al origen y transformación de la energía utilizada. En este análisis, se abordan cuatro contaminantes clave: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos no quemados (HC), los cuales son característicos de procesos de combustión incompleta o de alta temperatura, y poseen implicancias tanto climáticas como sanitarias

En tecnologías como los vehículos eléctricos, si bien no se generan emisiones locales, es posible estimar un nivel de contaminación indirecta vinculado a la matriz eléctrica nacional. En el caso chileno, con una participación de 67 % de fuentes renovables en la generación eléctrica (2025), se puede suponer que el 33 % restante proviene de fuentes fósiles, por otra parte, una planta eléctrica promedio genera alrededor de 400g de CO_2 por kwh, lo cual introduce emisiones indirectas atribuibles al uso del vehículo. En otras palabras, si bien el vehículo no emite CO_2 durante su operación, una fracción de las emisiones de generación eléctrica debe ser considerada para estimar su impacto ambiental real.

Algo similar ocurre con los vehículos a hidrógeno, cuyo balance ambiental depende en gran medida del origen del hidrógeno utilizado. El hidrógeno verde obtenido mediante electrólisis con energías renovables presenta una huella de carbono prácticamente nula, pero si el hidrógeno es producido a partir de gas natural (hidrógeno gris), las emisiones indirectas pueden ser comparables a las de un motor de combustión tradicional o incluso, peor, debido a que la producción es de 95% hidrogeno gris y menos del 1% hidrogeno verde [37].

La siguiente Tabla 12 fue elaborada a partir de diferentes fuentes de información disponibles, como sitios web técnicos, informes públicos y datos aproximados extraídos de literatura general, debido a la ausencia de cifras oficiales claras y consistentes para todos los

casos. En particular, para tecnologías cuyos vehículos no emiten gases contaminantes de forma directa como los vehículos eléctricos y los vehículos impulsados por hidrógeno se realizaron estimaciones propias mediante cálculos basados en el consumo energético, el tipo de fuente utilizada y las características de la matriz energética chilena.

El objetivo de esta tabla es permitir una comparación más ajustada al uso real de cada tecnología, considerando no solo las emisiones locales, sino también aquellas generadas durante la producción y suministro de la energía utilizada. De este modo, se entrega una visión más completa del impacto ambiental operativo total, especialmente en contextos donde la fuente de energía es determinante en el balance de emisiones.

Tabla 12 Tecnología Estimación de emisiones (g/km) según tecnología

Tecnología	Estimación de emisiones (g/km)			
	CO ₂	CO	HC	NO _x
Vehículo convencional	160-270	18-31	2-4	2-4
Vehículo con Kit HHO	118-228	13-27	1.5-3.8	1.7-3.2
Vehículo híbrido	112-216	13-25	1.4-3.2	1.4-3.2
Vehículo a gas (GLP/GNC)	102-136	15-28	1.6-3.4	1.6-3.4
Vehículo a hidrógeno (gris)	9000-12000	36-84	1.2-3.6	06-12
Vehículo a hidrógeno (verde)	0	0	0	0
Vehículo eléctrico (VE)	1980-2370	96-115	12-14.4	12-14.4

Observaciones:

- **Vehículo convencional:** no se incluyen emisiones del ciclo del combustible (extracción, refinación, transporte), contaminación acústica presente.
- **Vehículo con Kit HHO:** se considera insignificante la contaminación involucrada en la fabricación del kit. Contaminación acústica sigue presente.
- **Vehículo híbrido:** impacto indirecto moderado por fabricación de baterías (níquel, litio). Dependencia térmica persiste.
- **Vehículo a gas (GLP/GNC):** no hay consideraciones significativas de otros tipos de contaminación más que la acústica.

- **Vehículo a hidrógeno (gris):** no hay consideraciones de otro tipo de contaminación.
- **Vehículo a hidrógeno (verde):** sin emisiones directas ni indirectas si se usa electrólisis renovable.
- **Vehículo eléctrico (VE):** cero emisiones locales. Emisión indirecta proporcional al 33 % fósil en la matriz eléctrica chilena. Fabricación de batería con huella de 3-5 t CO₂ [38].

Los Gráficos 26 y 27 muestran la estimación de emisiones por kilómetro recorrido para cuatro contaminantes clave (CO₂, CO, HC y NO_x), permitiendo visualizar de forma clara las diferencias entre tecnologías. Los datos incluyen tanto emisiones directas como indirectas, especialmente relevantes en los casos de vehículos eléctricos e impulsados por hidrógeno.

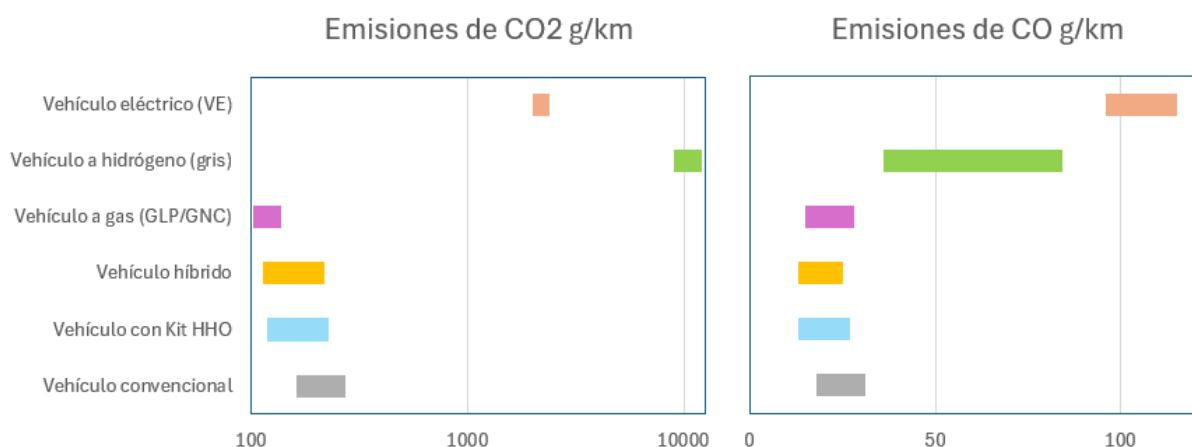


Gráfico 26 Rango de emisiones de CO₂ y CO según tecnología

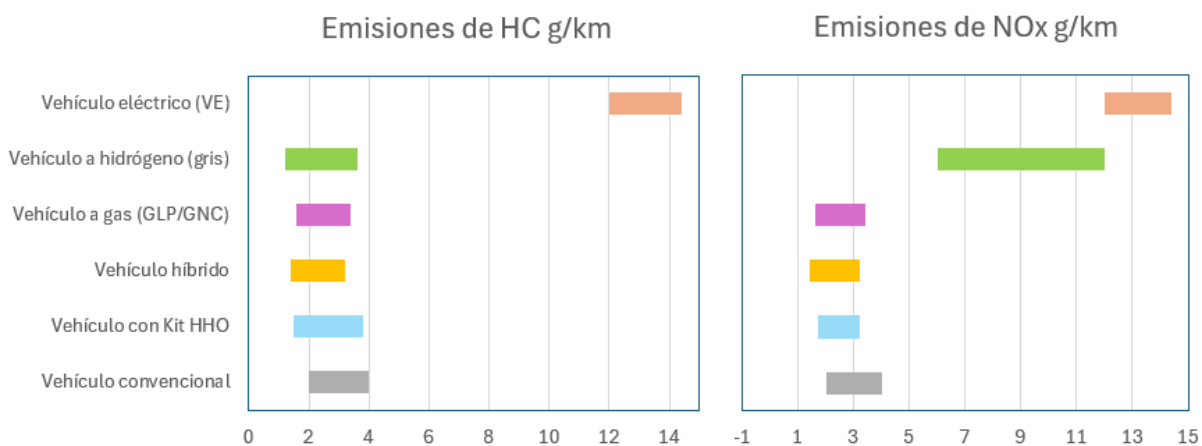


Gráfico 27 Rango de emisiones de HC y NO_x según tecnología

En lo que respecta a contaminación durante la operación y generación de energía, el vehículo a hidrógeno verde destaca como la tecnología más limpia, con emisiones locales nulas y sin impacto indirecto cuando el hidrógeno es producido mediante electrólisis alimentada por fuentes renovables. Su operación es neutra en todos los compuestos considerados.

En el extremo opuesto, el vehículo eléctrico (VE) resulta ser la tecnología con mayor carga contaminante total en este análisis, pero exclusivamente por considerar el 33 % de la matriz eléctrica chilena que aún depende de combustibles fósiles. Al incorporar el impacto ambiental de la generación eléctrica (especialmente desde carbón y gas), se observan niveles elevados de CO₂, CO, NO_x y HC, que no son emitidos por el vehículo directamente, pero sí por su fuente energética.

El segundo peor desempeño corresponde al vehículo a hidrógeno gris, cuyo hidrógeno es producido a partir de gas natural mediante reformado con vapor. Aunque la operación del vehículo no genera emisiones, el proceso de producción es intensivo en carbono y genera importantes cantidades de CO, NO_x y CO₂ a nivel industrial, superando en varios casos al vehículo convencional.

En contraste, tecnologías como el vehículo a gas (GLP/GNC), el vehículo híbrido y el vehículo con Kit HHO presentan resultados favorables frente al vehículo convencional en todos los contaminantes evaluados. Estas tecnologías, aunque siguen utilizando combustibles fósiles, logran disminuir la carga contaminante. Aunque se debe de considerar la contaminación la batería del vehículo híbrido ya que su impacto es significativo a gran escala.

Cabe destacar que estos resultados, si bien ilustrativos, son altamente sensibles a las condiciones de uso de cada tecnología. Factores como el tipo de conducción (urbana o carretera), la eficiencia real del sistema, el origen del combustible o energía eléctrica, y el estado de mantenimiento del vehículo pueden alterar significativamente el comportamiento ambiental de cada alternativa. Por tanto, cualquier decisión tecnológica debe basarse en un estudio detallado de estas variables contextuales antes de proyectar impactos a escala nacional.

6.3 Comparación económica:

La evaluación económica entre tecnologías de transporte requiere considerar no solo el costo inicial de adquisición, sino también los costos de operación asociados al consumo energético, los cuales tienen un impacto acumulativo significativo a lo largo del ciclo de uso del vehículo.

Para facilitar esta comparación, se establecieron valores promedio de referencia tanto para el precio de compra como para el costo unitario de cada tipo de energía (gasolina, GLP, electricidad e hidrógeno). Además, se utilizó un consumo energético promedio por tecnología expresado en litros, kWh o kg cada 100 km, según corresponda.

El cálculo del costo de operación anual se basa en una hipótesis estándar de uso de 12.000 km recorridos por año, lo que permite homogeneizar el análisis entre tecnologías. En este contexto, La Tabla 13 resume los datos base utilizados.

Tabla 13 Resumen de datos utilizados por tecnología

Tecnología	costo inicial	Consumo Promedio 100(km)	Precio asumido	Costo operación anual (12.000km)
Vehículo convencional	15,000,000	9.5 L	\$ 1,267	\$ 1,444,380
Vehículo con Kit HHO	15,400,000	7.9 L	\$ 1,267	\$ 1,201,116
Vehículo híbrido	21,500,000	5.5 L	\$ 1,267	\$ 836,220
Vehículo a gas (GLP/GNC)	16,500,000	7 L	\$ 644	\$ 540,960
Vehículo a hidrógeno (gris)	55,000,000	1 kg	\$ 3,131	\$ 375,720
Vehículo a hidrógeno (verde)	50,000,000	1 kg	\$ 4,817	\$ 578,040
Vehículo eléctrico (VE)	27,500,000	16 kWh	\$ 220	\$ 422,400

Es importante aclarar que esta evaluación corresponde a un escenario de referencia y tiene alta sensibilidad a las condiciones reales, tales como:

- el valor real del vehículo según marca y segmento,
- las variaciones del precio del combustible,
- y los kilómetros efectivamente recorridos por año.

El Gráfico 28 permite observar la evolución del costo total acumulado (adquisición + operación) durante 20 años, considerando un uso constante de 12.000 km anuales. Esta visualización hace evidente cuándo cada tecnología supera o se posiciona por debajo del vehículo convencional en términos de costos totales.

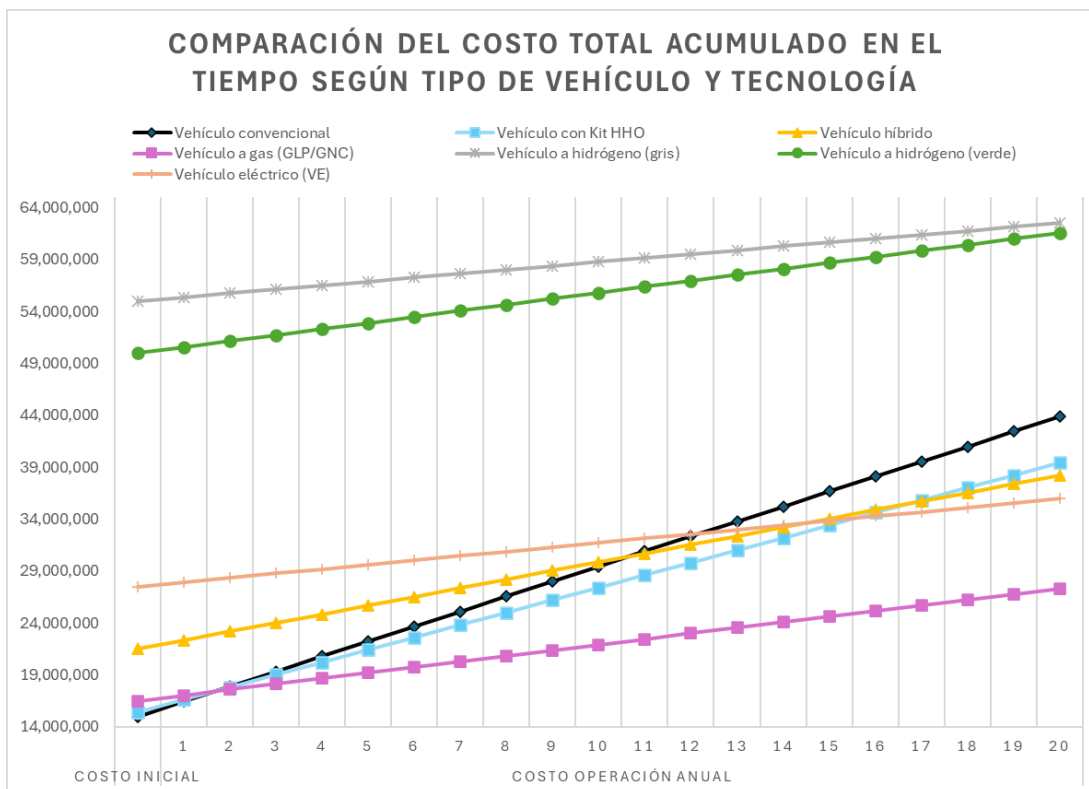


Gráfico 28 Comparación del costo total acumulado en el tiempo según tipo de vehículo y tecnología

En primer lugar, destaca que el vehículo a hidrógeno (gris y verde), debido a su altísimo costo inicial, no logra ser más rentable que el vehículo convencional en ningún punto del horizonte de 20 años. A pesar de sus bajos costos de operación (especialmente en el caso del hidrógeno gris), la inversión inicial excesiva impide recuperar la diferencia.

En contraste, todas las demás alternativas superan al vehículo convencional en rentabilidad antes del año 12, siendo algunas considerablemente más competitivas:

- El vehículo con Kit HHO es el más rentable de todos. Recupera su inversión adicional en solo 1 a 2 años, y a partir de ese momento mantiene una ventaja constante frente al convencional gracias a una mejora en el rendimiento por litro. Es una opción económica y de rápida amortización.
- El vehículo a gas (GLP/GNC) se vuelve más rentable que el convencional a partir del segundo año, lo que lo posiciona como una de las mejores alternativas a mediano plazo en cuanto a eficiencia económica, gracias al bajo costo del combustible.
- El vehículo híbrido supera al convencional entre los 10 y 11 años de uso, lo que representa una rentabilidad progresiva, favorecida por un consumo más bajo, aunque penalizada por un mayor precio inicial.
- El vehículo eléctrico (VE) alcanza el punto de equilibrio recién en el año 12, debido a su alto valor de adquisición, que compensa gradualmente gracias a su muy bajo costo por kilómetro. Si el costo inicial disminuyera, se convertiría en uno de los sistemas más competitivos.

Por último, la pendiente de la curva del vehículo convencional es una de las más pronunciadas, reflejando su alto costo operativo. En 20 años, sus costos de operación duplican su inversión inicial. Por el contrario, las curvas más planas como la del hidrógeno gris y del vehículo eléctrico indican tecnologías con menores costos por kilómetro, pero con alta barrera de entrada en términos de precio.

6.4 Análisis de comparación integrado:

Considerando eficiencia energética, impacto ambiental y viabilidad económica en el contexto chileno actual, se concluye que ninguna tecnología resulta superior en todos los aspectos, pero es posible identificar las más equilibradas.

Desde el punto de vista energético, el vehículo eléctrico es el más eficiente, seguido del hidrógeno verde y los vehículos híbridos. El sistema HHO, si bien no reemplaza el motor térmico, mejora su rendimiento en hasta un 30 %.

En impacto ambiental, el hidrógeno verde es la opción más limpia, con cero emisiones directas e indirectas. En contraste, el hidrógeno gris presenta la mayor carga contaminante debido a su forma de producción. El vehículo eléctrico tiene baja emisión directa, pero su impacto depende del 33 % fósil de la matriz eléctrica. Las tecnologías HHO, híbrida y a gas muestran reducciones parciales frente al vehículo convencional.

Económicamente, el Kit HHO es la opción más rentable a corto plazo (1–2 años de retorno), seguido del vehículo a gas (2 años), y el híbrido (10–11 años). El vehículo eléctrico se vuelve competitivo a los 12 años. En cambio, ninguna variante a hidrógeno resulta rentable en un horizonte de 20 años por su alto costo inicial.

Considerando infraestructura existente, precios de adquisición y la posibilidad de una adopción masiva en el corto plazo, las tecnologías que presentan mayor viabilidad en el contexto chileno actual son el Kit HHO, el vehículo a gas (GLP/GNC) y el vehículo híbrido. Estas opciones permiten reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes sin requerir una transformación significativa del parque vehicular ni una infraestructura nueva a gran escala. Su implementación puede realizarse de forma progresiva y con menores barreras económicas, lo que las convierte en soluciones prácticas y accesibles.

En contraste, tecnologías como el vehículo eléctrico o el vehículo a hidrógeno verde, si bien ofrecen altas ventajas en eficiencia energética y sostenibilidad ambiental, aún enfrentan limitaciones importantes en términos de costo inicial, redes de carga o abastecimiento, y disponibilidad comercial en el país. Su adopción generalizada dependerá del avance en políticas públicas, incentivos económicos, y del desarrollo de la infraestructura energética en los próximos años.

7 Conclusión

La evaluación del kit generador de hidrógeno HHO en vehículos de combustión interna demuestra que, aunque no es revolucionario en términos de generación energética neta, representa una optimización del proceso de combustión. El análisis termodinámico y el balance energético global confirman que no se violan los principios de la física, sino que se mejora el aprovechamiento de la energía, reduciendo las pérdidas térmicas y químicas del motor.

A nivel nacional, su implementación progresiva permitiría reducir de forma sustancial el consumo de combustibles fósiles, las emisiones de gases contaminantes y los costos operativos del transporte. El ahorro energético en escenarios realistas podría superar los mil millones de litros de bencina al año, mientras que las reducciones de CO₂ y contaminantes locales aportarían a los compromisos climáticos de Chile y a la mejora de la salud pública.

Desde una perspectiva económica, el kit HHO ofrece una de las relaciones costo-beneficio más atractivas del ecosistema tecnológico actual. Su bajo precio de adquisición, rápida amortización y facilidad de instalación lo posicionan como una solución accesible, escalable y de bajo riesgo financiero para el usuario final.

Comparado con tecnologías avanzadas como los vehículos eléctricos o los FCEV, el sistema HHO no busca competir en términos de eficiencia absoluta o neutralidad de carbono total. Su virtud radica en su rol estratégico como tecnología de transición: puede ser implementado de forma inmediata, sin infraestructura adicional, sobre el parque vehicular existente, aportando beneficios concretos mientras se consolidan las condiciones necesarias para la adopción masiva de tecnologías de cero emisiones.

En síntesis, el kit HHO no es una solución definitiva, pero sí es una alternativa técnicamente sólida, económicamente viable y ambientalmente beneficiosa para el proceso de descarbonización del transporte en Chile. Su implementación, en contextos urbanos contaminados, representa una oportunidad inmediata para avanzar hacia un modelo de movilidad más eficiente, resiliente y sostenible.

8 Referencias

- [1] IEA, «Energy System - Transport,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport>.
- [2] Gobierno de Chile, «Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile 1990-2018,» 2020. [En línea]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/7305681_Chile-BUR4-1-2020_IIN_CL.pdf.
- [3] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), «Realizan el primer y más detallado mapa de la contaminación en Chile: sector residencial es responsable de más del 90 % de las emisiones,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.cr2.cl/realizan-el-primer-y-mas-detallado-mapa-de-la-contaminacion-en-chile-sector-residencial-es-responsable-de-mas-del-90-de-las-emisiones-la-tercera/>.
- [4] Health Effects Institute (HEI), «Informe sobre el estado del aire a nivel mundial 2024,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>.
- [5] Lancet Countdown South America, «Lancet Countdown South America 2023: Tracking progress on health and climate change,» *The Lancet Regional Health – Americas*, vol. 38, n° <https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2667-193X%2824%2900073-5>, p. 100734, 23 abril 2024.
- [6] Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE), «Más vehículos en Chile: Permisos de circulación crecieron en 2022,» 2023. [En línea]. Available: [https://www.ine.gob.cl/sala-de-prensa/prensa/general/noticia/2023/07/06/m%C3%A1s-veh%C3%ADculos-en-chile-permisos-de-circulaci%C3%B3n-crecieron-en-2022#:~:text=Si%20bien%20la%20gran%20mayor%C3%ADa%20\(99%2C8%25\)%20de%20los,incluidos%20h%C3%ADbridos\)%2C%20](https://www.ine.gob.cl/sala-de-prensa/prensa/general/noticia/2023/07/06/m%C3%A1s-veh%C3%ADculos-en-chile-permisos-de-circulaci%C3%B3n-crecieron-en-2022#:~:text=Si%20bien%20la%20gran%20mayor%C3%ADa%20(99%2C8%25)%20de%20los,incluidos%20h%C3%ADbridos)%2C%20)
- [7] DieselNet, «Engine Efficiency,» [En línea]. Available: https://dieselnet.com/tech/engine_efficiency.php.
- [8] Ministerio de Energía de Chile, «Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.,» 2020. [En línea]. Available: <https://energia.gob.cl/h2/Estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>.
- [9] SNE Research, 11 Febrero 2025. [En línea]. Available: [https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/373/page/0?s_cat=%7C&s_key word=.](https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/373/page/0?s_cat=%7C&s_key word=)
- [10] A. H. D. S. H. M. e. a. Soleimani, «Progress in hydrogen fuel cell vehicles and up-and-coming technologies for eco-friendly transportation: an international assessment,» n° <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00482-8>, p. 3153–3172, Septiembre 2024.
- [11] McKinsey & Company, «Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>.
- [12] Centro Nacional Del Hidrógeno España, «Centro Nacional Del Hidrógeno- Seguridad,» [En línea]. Available: <https://www.cnh2.es/seguridad/>.
- [13] Asociación Chilena De Hidrógeno, «SEGURIDAD DEL HIDRÓGENO,» [En línea]. Available: <https://h2chile.cl/seguridad-del-hidrogeno/>.
- [14] Clean Air Task Force, «Realidades técnico-económicas del transporte de hidrógeno a larga distancia,» 26 Septiembre 2023. [En línea]. Available: https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2023/09/25153519/catf-kbr-hydrogen-transport.pdf?_gl=1*akcym0*_gcl_au*NzI1Mjc3MTQ5LjE3NTE3NDkyNDY.*_ga*N TAzMTE3MzcuMTc1MTc0OTI0Ng.*_ga_88025VJ2M0*czE3NTE3NDkyNDUkbzE

kZzEkdDE3NTE3NDk0NDMkajYwJGwwJGgxNjkwODQxNTEEx*_fpl.

- [15] Institution Of Mechanical Engineers, «El viaje histórico del hidrógeno,» 25 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.imeche.org/news/news-article/the-historical-journey-of-hydrogen>.
- [16] H. R. (2020), «Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from?,» 6 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>.
- [17] M. S. E. A. H. H. M. F.-A. J. A.-C. L. Q. N. A. A. P. V. & P. H. Gad, «Impact of oxy-hydrogen enriched gasoline on petrol engine performance and emissions,» *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, n° <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11513-2>, p. 13793–13803, 2022.
- [18] P. & C. J. Jakliński, «An experimental investigation of the impact of added HHO gas on automotive emissions under idle conditions,» *International Journal of Hydrogen Energy*, n° <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.144>, p. 13119–13128, 2020.
- [19] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE,» 2020.
- [20] G. Lira, «Precio de la bencina: El valor de los combustibles en Chile en 2025,» 24 marzo 2025. [En línea]. Available: [https://www.autofact.cl/blog/noticias/autofact/precio-bencina#:~:text=Como%20habr%C3%A1s%20notado%2C%20el%20precio,un%20precio%20promedio%20de%20\\$1.362..](https://www.autofact.cl/blog/noticias/autofact/precio-bencina#:~:text=Como%20habr%C3%A1s%20notado%2C%20el%20precio,un%20precio%20promedio%20de%20$1.362..)
- [21] M. O. G., «Contaminación aérea y sus efectos en la salud,» [En línea]. Available: <https://www.scielo.cl/pdf/rcher/v26n1/art04.pdf>.
- [22] Superintendencia del Medio Ambiente Gobierno de Chile, «SMA,» septiembre 2024. [En línea]. Available: Superintendencia del Medio Ambiente.
- [23] ChileAutos, «El auge del hidrógeno verde en Chile: la innovación energética para un futuro sostenible,» 24 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://www.chileautos.cl/noticias/detalle/el-auge-del-hidrogeno-verde-en-chile-innovacion-energetica-para-un-futuro-sostenible--29552/>.
- [24] J. S. & T.-A. K. E. Newman, «Electrochemical Systems,» 2012.
- [25] R. M.-R. E. F. Q. J.C. Cruz, «Efecto de la temperatura en la respuesta electroquímica en un,» 2013.
- [26] M. E. A. H. H. e. a. Gad, «Impact of oxy-hydrogen enriched gasoline on petrol engine performance and emissions,» *J Therm Anal Calorim*, Vols. %1 de %2<https://doi.org/10.1007/s10973-022-11513-2>, p. 13793–13803, 2022.
- [27] A. A. Al-Rousan, «Reduction of fuel consumption in gasoline engines,» *Elsevier*, vol. 35, n° <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.144>, pp. 12930-12935, 2010.
- [28] K. D. M. M. Nabil T., «Impact of addition oxy-hydrogen gas (HHO) on vehicle engines performance and emissions,» *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, vol. 3, n° 10.30464/jmee.2019.3.2.177, pp. 177-190, 2019.
- [29] M. S. E. A. H. H. M. F.-A. J. A.-C. L. Q. N. A. A. P. V. & P. H. Gad, «Impact of oxy-hydrogen enriched gasoline on petrol engine performance and emissions,» *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, n° <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11513-2>, pp. 147, 13793–13803, 2022.
- [30] M. M. E. Y. A. K. M. E. & K. K. I. El-Kassaby, «Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions,» *Alexandria Engineering Journal*, n° <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.016>, pp. 55(3), 243–251, 2016.
- [31] A. C. U. E. & A. K. Yilmaz, «Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance

- and exhaust emissions in compression ignition engines,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 11366–11372, n°
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.040>, p. 35(23), 2010.
- [32] United States Environmental Protection Agency, «Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle,» 12 Junio 2025. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>.
- [33] pais lobo, «Pais Lobo,» 19 DICIEMBRE 2015. [En línea]. Available: <https://www.paislobo.cl/2015/12/rechazado-en-la-revision-tecnica-por.html>.
- [34] Ministerio de Energía Chile, «Reporte de proyectos en,» 2025. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/reporte_de_proyectos_-_enero_2025.pdf.
- [35] MAPFRE, «MAPFRE.COM,» [En línea]. Available: <https://www.mapfre.com.ar/seguros-autos/articulos/cuanto-contaminan-autos-hibridos/#:~:text=Por%20tanto%2C%20un%20auto%20h%C3%ADbrido,anual%20de%20un%20veh%C3%ADculo%20tradicional..>
- [36] bbva, «Coches de hidrógeno: el futuro de la movilidad sostenible,» 9 Febrero 2025. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/puede-un-coche-con-una-pila-de-hidrogeno-cambiar-el-futuro-de-la-movilidad-sostenible/>.
- [37] J. Kilner, «CIC Energi GUNE,» [En línea]. Available: [https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores#:~:text=En%20la%20actualidad%2C%20la%20producci%C3%B3n%20de%20hidr%C3%B3geno,de%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20\(CO2\)%20como%20subproducto..](https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores#:~:text=En%20la%20actualidad%2C%20la%20producci%C3%B3n%20de%20hidr%C3%B3geno,de%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO2)%20como%20subproducto..)
- [38] EARTH ORG, «El impacto ambiental de la producción de baterías para vehículos eléctricos,» 11 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://earth.org/environmental-impact-of-battery-production/>.
- [39] J. D. R. Á. & G. O. González Gil, «Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 143–154., n°
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/6976/7865>, p. 17(1), 2018.
- [40] Y. B. D. T. & o. Rusdianasari, «HHO Gas Generation in Hydrogen Generator using Electrolysis,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 012007, n° <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012007>, p. 258, 2019.