



## ING. AUTOMOTRIZ

Trabajo integración Curricular previa a la obtención  
del título de Ingeniería en Mecánica Automotriz

**AUTORES:**

Cristopher Rafael Serpa Cozar  
Esteban Ignacio Jaramillo Solano

**TUTOR:**

Ing. Juan Carlos Rubio Terán

Análisis comparativo de emisiones post  
utilización de oxi-hidrogeno bajo la normativa  
INEN 2204 en motores de ciclo Otto

Nosotros, Cristopher Rafael Serpa Cozar y Esteban Ignacio Jaramillo Solano

**DECLARARAMOS QUE:**

La investigación presente llevada a cabo: “Análisis comparativo de emisiones post utilización de oxi-hidrogeno bajo la normativa INEN 2204 en motores de ciclo otto” se ha desarrollado con base a una investigación exhaustiva y analítica, respetando todos los derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se añadieron en la bibliografía de la investigación.

Consiguientemente este trabajo es de nuestra autoría, apoyados en la tutoría, asesoramiento y seguimiento constante de nuestro docente tutor.

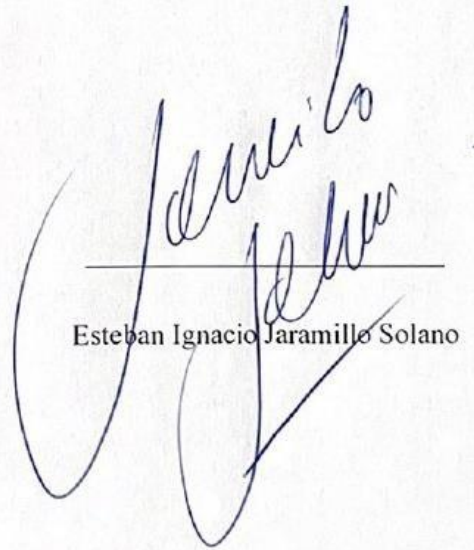
En razón de la presente declaración, nos responsabilizamos por el contenido de esta investigación, en cuanto a su veracidad y alcance científico generado para la Facultad de Ingeniería en Mecánica Automotriz.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.

Quito, marzo 2023



Cristopher Rafael Serpa Cozar

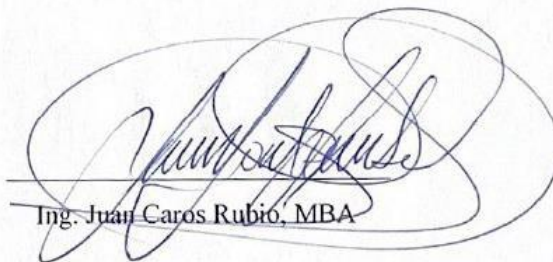


Esteban Ignacio Jaramillo Solano

## CERTIFICACIÓN

Yo Ing. Juan Carlos Rubio Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del Grado de ingenieros con el Tema: “Análisis comparativo de emisiones post utilización de oxi-hidrogeno bajo la normativa INEN 2204 en motores de ciclo otto” ha sido elaborado por: Christopher Rafael Serpa Cozar y Esteban Ignacio Jaramillo Solano, el mismo que ha sido revisado y analizado en un 25%, 50%, y/o 100% con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor, por lo que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Quito, marzo 2023



Ing. Juan Carlos Rubio, MBA

## **DEDICATORIA**

El presente artículo de investigación se lo dedico a mi madre Mery Cozar y mis hermanas Ariana Serpa y Nicole Serpa por su incondicional apoyo a lo largo de toda mi vida personal y profesional. Mi familia siempre ha sido el eje fundamental, quienes me han brindado su acompañamiento a lo largo del desarrollo de esta investigación, de igual manera a mis abuelos el señor Pedro Cozar y Zoila Muñoz que siempre con sus bendiciones, consejos y mucho amor han estado presentes a lo largo de mi vida. Para finalizar de la misma forma este artículo lo dedico a mi novia Nathaly Parra por su interese, consejos y acompañamiento a lo largo de mis últimos años académicos y a todas las personas que han sido parte de este proceso personal y profesional.

Cristopher Rafael Serpa Cozar

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme cumplir un objetivo más en mi vida dándome la fortaleza y sabiduría para salir adelante. Agradezco a mi familia por siempre confiar en mí y darme su apoyo incondicional en cada paso que he venido dando a lo largo de mi vida personal y profesional. Agradezco a mis compañeros que hicieron de las vivencias una linda experiencia y en especial reconocimiento a mis docentes por los conocimientos compartidos, todas las enseñanzas y formación que nos permiten tener unas bases firmes y conocimientos amplios en la profesión, de igual manera un sincero agradecimiento a Fernando Parra y Tecnicentro Cumbaya por la oportunidad de poner en practica todo lo aprendido y afianzar los conocimientos.

Cristopher Rafael Serpa Cozar

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo para la obtención de mi titulación como Ingeniero Mecánico Automotriz, lo dedico a mi madre y a mí amado hijo; han sido fuente interminable de bondad, fuerza y amor.

A mi madre, Laura, quién siempre ha creído en mí y me ha acompañado a lo largo del camino; siempre animando, apoyando y estando presente en todos los momentos de mi vida. Mi ejemplo.

A mi hijo, Juan Esteban, fuente de motivación, motor y luz de mi vida. La visión de los hombres yace en el bienestar de los hijos. Eres mi camino. Mi proyección.

A mis padres de corazón y vida, Margarita y Vinicio. Interminable fuente de fe y compromiso. Padres de mis hermanos y unión de nuestras vidas. Mi fortaleza.

A mis hermanos, María Elena, Mónica, Verónica, Nadia y Humberto Vinicio. El camino no se acaba. Mi compromiso.

A mi familia y a mis queridos amigos que siempre confiaron en mi crecimiento. Mi confianza.

Esteban Ignacio Jaramillo Solano

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por su infinita bondad y misericordia.

A mí madre. Que linda vida construimos.

A mí padre.

A mí tutor, Juan Carlos Rubio, gracias, Inge.

A mí joven compañero, Cristopher.

A Esteban, por no perder el ánimo, por no dejar este objetivo, por querer cumplir otros sueños y por mantener la voluntad de crecer. Siempre...

Esteban Ignacio Jaramillo Solano

## INDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA.....	ii
CERTIFICACION .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
RESUMEN .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. MARCO TEÓRICO .....	7
3. MATERIALES .....	8
4. TOMA DE DATOS.....	11
5. PROCEDIMIENTO DE INGRESO HHO .....	12
6. CONCLUSIONES .....	19
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	20
ANEXOS INTRODUCCIÓN.....	
1. ANEXO 1.....	25
ANEXOS MARCO TEORICO	
1. ANEXO 1.....	87
ANEXO MATERIALES Y METODOS	
1. ANEXO 1.....	123
2. ANEXO 2.....	130



## RESUMEN.

La investigación analizó varios documentos científicos donde se analiza el comportamiento del hidrógeno para mejorar las prestaciones de motores de combustión interna con proceso termodinámicos a volumen constante, esta investigación tiene el objetivo de la utilización del oxi hidrogeno como un agente de limpieza del motor en forma interna previo a una revisión técnica vehicular (RTV) para cumplir con la norma 2204 que rige en la ciudad de Quito, **metodología** cuantitativa que se utiliza el ANOVA para sustentar la investigación y descriptiva que permite identificar los cambio numéricos que sufren los diferentes componentes que se producen en los gases emitidos al medio ambiente, ya que el sistema de limpieza se lo hace de forma técnica con instrumentos que facilitan su aplicación en condiciones controladas asegurando su eficiencia dentro de un tiempo determinado, **Resultados**, el estudio demostró que al hacer una limpieza a vehículos con más de 100000 kilómetros los resultados obtenidos en las pruebas estáticas de laboratorio y de campo, presentan una disminución considerable de las emisiones contaminantes que es el objeto de éste estudio, esto con la ayuda de Norma Inen 2204 se valida la información obtenida por los instrumentos de medición anterior a la limpieza y su aplicación posterior a la misma, pudiendo plantear interrogantes para que se realicen futuras investigaciones sobre este proceso, como sería, cada cuanto se lo debería hacer, si sería un procedimiento que ayude a bajar el impacto de las emisiones contaminantes si se aplica a cualquier motor de combustión interna. **Conclusión**. El estudio realizado permite identificar con claridad que posterior al procedimiento de limpieza con oxi hidrogeno hay una disminución en los HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> que permite estar dentro de los parámetros permitidos por la norma de la RTV. Es un procedimiento no invasivo al motor, se lo puede controlar de forma fácil y no degenera los componentes internos del motor.

Palabras Claves: Oxi Hidrógenos, norma, motores de combustión interna, mejorar, emisiones.

## ABSTRACT.

The investigation analyzed several scientific documents where the behavior of hydrogen is analyzed to improve the performance of internal combustion engines with thermodynamic processes at constant volume, this investigation has the objective of using oxy hydrogen as an internal cleaning agent for the engine. Prior to a vehicle technical review (RTV) to comply with the 2204 standard that governs the city of Quito, a descriptive quantitative methodology allows to identify the numerical changes suffered by the different components that are produced in the gases emitted to the environment, since the cleaning system is done in a technical way with instruments that facilitate its application and under controlled conditions, ensuring its efficiency within a certain time. Results, the study showed that when cleaning vehicles with more than 100,000 kilometers, the results obtained in the static laboratory and field tests, present a considerable decrease in polluting emissions that is the object of this study, this with the help of Norma Inen 2204 validates the information obtained by the measuring instruments prior to cleaning and its application after it, being able to raise questions so that Future research on this process should be carried out, how often it should

be done, if it would be a procedure that helps reduce the impact of polluting emissions, if it is applied to any internal combustion engine. Conclusion. The study carried out allows us to clearly identify that after the cleaning procedure with oxy hydrogen there is a decrease in HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> that allows us to be within the parameters allowed by the RTV standard. It is a non-invasive procedure to the engine, it can be easily controlled and it does not degenerate the engine components.

Keywords: Oxy Hydrogens, standard, internal combustion engines, improve, emissions.

## 1. INTRODUCCIÓN

El mundo se encuentra en constan cambios para descubrir nuevas fuentes que proporcionen energía, el uso indiscriminado de algunas como las provenientes de los derivados del petróleo en el siclo XX marcan en cambio fuerte a nivel mundial, donde se evidencia un cambio climático degenerativo, que empuja a buscar otras fuentes menos contaminantes que ayuden a disminuir el impacto al globo terráqueo, la humanidad en todas sus latitudes se ve afectado por este fenómeno. La **contaminación del aire por la quema de combustibles fósiles** principalmente carbón, petróleo y gas- está detrás de alrededor de 4,5 millones de muertes anuales en todo el mundo y genera unas pérdidas económicas estimadas en 2,9 billones de dólares, lo que equivale a aproximadamente un 3,3% del PIB mundial. Así lo revela un informe elaborado por Greenpeace y el Centro de Investigación en Energía y Aire Limpio (CREA, Febrero 2020).

### Contaminación de combustibles fósiles.



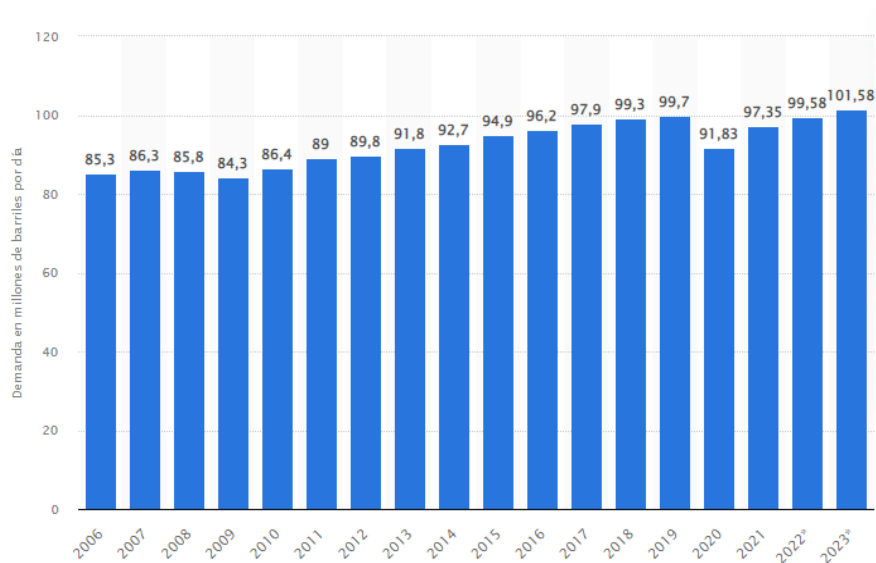
*Figura #1. Fuente Propia*

Los derivados del petroleó sigue siendo la fuente principal para la generación de energía para movilizar al mundo, generación de industrias a todo nivel. Las consecuencias causadas a planeta permiten la búsqueda incesante de nuevas alternativas de generar energías lo más amigables con el medio ambiente y por consecuencia con la humanidad, en la búsqueda de estas energías alternativas hay muchas posibilidades, un ejemplo en la actualidad los autos eléctricos toman un impulso fuerte, sus prestaciones son similares e incluso en algunos aspectos superan a los de combustibles fósiles, dentro de sus limitaciones importantes están

la autonomía que no permite hacer recorridos muy extensos hasta su complicada recarga actualmente, la dificultad de recarga en cualquier lugar hoy en día y tiempo de espera para ello, no es menos cierto que la para la cotidianidad, para transporte, para el trabajo es una alternativa muy importante, adicional al combustible que se deja de utilizar el recambio de aceite y filtros también contaminantes se elimina. “Existen Un estudio realizado por el científico Christoph Buchal, profesor de física en la Universidad de Colonia (Alemania), ha vuelto a poner en tela de juicio los coches eléctricos. La c, concluye que estos automóviles contaminan entre un 11 % y un 28% más que los de gasoil. Ello se debe principalmente a las **baterías** de estos coches, fabricadas a partir de **litio, cobalto y manganeso**, y en el proceso de su producción, en el que se gasta un alto consumo de energía”.

El petróleo es una fuente de energía que se encuentra localizado en pocos lugares del mundo, los países propietarios de éstas reservas son agrupados por la O.P.E.P (Organización de Países Exportadores de Petróleo), “De acuerdo con su Estatuto, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) tiene como misión coordinar y unificar las políticas petroleras de sus Países Miembros y asegurar la estabilización de los mercados petroleros para asegurar un suministro eficiente, económico y regular de petróleo para los consumidores, un ingreso estable para los productores y un rendimiento justo del capital para quienes invierten en la industria del petróleo” ([https://www.opec.org/opec\\_web/en/about\\_us/23.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/about_us/23.htm)). La organización tiene la función de regularizar la demanda mundial entre los países aliados, regulariza los precios del mercado de acuerdo a la demanda y a las circunstancias en la que el mundo se encuentre, el petróleo es una fuente de energía no renovable y hoy en día la fuente más importante en la generación de energía, esto permite prever que a medida que se vaya agotando éste recurso natural sufrirá incrementos en el precio dependiendo de la demanda y de la disponibilidad.

#### **Demanda Mundial de barriles de petróleo por día.**



**Figura # 2 Rosa Fernández, (9 agosto 2022)**

La tendencia en el mundo es bajar la contaminación de donde venga con la utilización de sistema de energías limpias, luego de varios años de construcción automotores eléctricos denominados vehículos limpios, estudios demuestran que también son automotores muy contaminantes por efecto de las baterías u otros elementos, esto permite volver la mirada a los motores de combustión interna y ver alternativas donde se pueda minimizar el impacto ambiental. En la actualidad la utilización del hidrogeno en el sector automotriz tiene varias aristas de investigación, *Empresas de todo el mundo están estableciendo objetivos de reducción de carbono para disminuir las emisiones de GHG (Greenhouse Gas, Gas de efecto invernadero). Reemplazar las fuentes de energía con mucho contenido de carbono por hidrógeno reduce la liberación de CO2 a la atmósfera. Los productos de la combustión de oxígeno con cualquier hidrocarburo producen CO2 en la reacción, mientras que la combustión de hidrógeno solo produce agua. La creciente demanda de muchos usuarios finales, como universidades e instalaciones industriales más grandes, genera más motivación para reducir la huella de carbono, y aún proporcionar electricidad y calor fiable.*(Solar turbines 2020). La utilización del hidrógeno en el sector automotriz puede ser la mejor alternativa de energías limpias, utilizada en los motores de combustión interna los residuos que emite son agua, también se la utiliza ya como un medio para bajar las emisiones de efecto invernadero

***El hidrógeno.*** *El elemento más simple del universo, se compone de un protón y un electrón. El más ligero de todos los elementos y gases, es 14 veces más ligero que el aire. Capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que cualquier otro combustible conocido: 33,3 kWh/kg, frente a los 13,9 kWh/kg del gas natural o los 12,4 kWh/kg del petróleo, lo que se traduce en una mayor eficiencia por peso que la de los combustibles que se emplean en la actualidad (Dutta 2014).*

Los motores de combustión interna en su ciclo normal de funcionamiento almacenan sedimentos de carbón producto de la combustión del combustible fósiles, estos sedimentos pueden generar puntos calientes entre ciclos de ignición ocasionando que la mezcla de combustible pueda llegar a encenderse de forma no controlado (espontanea) conocida como pre-ignición, produciendo un funcionamiento inestable ocasionando fallos del motor, la mala combustión a causa de estos residuos genera una mayor contaminación a causa de una combustión incompleta, este fenómeno en la jerga automotriz es conocida como cascabeleo del motor, resta rendimiento y un mayor consumo de combustible.

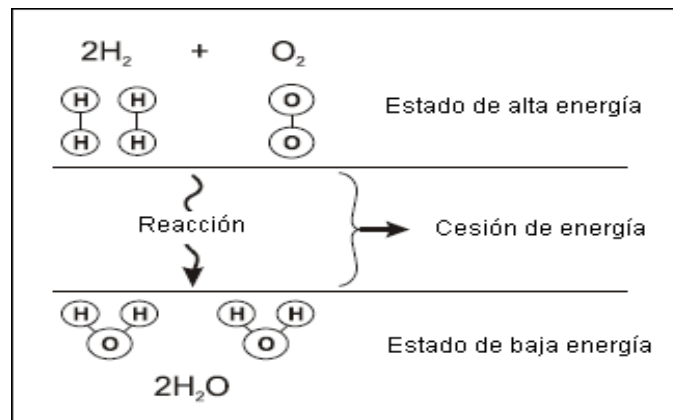
El hidrogeno no es un elemento ajeno en el proceso de combustión, “En la Tierra es muy abundante, constituye aproximadamente el 75 % de la materia del Universo, pero se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua, o al carbono, formando compuestos orgánicos. Por tanto, no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético (como la electricidad) y por ello se tiene que “fabricar.” (Centro Nacional del Hidrógeno, 2020).

Como propiedades físicas del hidrogeno se lo puede encontrar en estado líquido a temperaturas inferiores a los -252, 77 °C, para encontrarlo en estado sólido debe estar a una temperatura de -259.2 °C que es la condición debajo de su punto de fusión, las temperaturas descritas son

extremamente bajas, también conocidas como temperaturas criogénicas menores a los  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el hidrogeno en estado puro es casi invisible a la luz del día, es insípido, no tiene olor ni color, si bien es cierto el hidrógeno no es toxico, pero puede causar asfixia ya que este elemento desplaza al oxigeno que se encuentra en su entorno, al almacenar hidrogeno se debe tener extrema precaución de que no existan fugas en especial en lugares pequeños y cerrados, “La OSHA establece que el “nivel seguro” mínimo de oxígeno en un espacio confinado es del 19,5 %, mientras que el “nivel seguro” máximo de oxígeno en un espacio confinado es del 23,5 %.” Industrial Cientific (8 junio 2020). “¡Atención! El hidrógeno inhalado puede dar lugar a una mezcla inflamable dentro del cuerpo. La inhalación de hidrógeno puede producir inconsciencia y asfixia.” Industrial Cientific (8 junio 2020).

Dentro de las propiedades químicas del hidrogeno ser lo puede considerado como combustible, tiene una alta reactividad con el oxígeno pasando de un estado alto de energía a un bajo produciendo en esta transición un cambio de estado que genera una liberación de energía que se la traduce como trabajo útil que puede ser aprovechado en varias aplicaciones.

### Estado de la energía Química



Figura# 3. Fuente Marc Fábrega Ramos (Barcelona España 2009)

La grafica permite determinar el cambio de estado en el cual se genera una reacción violenta donde se genera calor (energía) que se puede aprovecharla para convertirla en trabajo, en el estado de baja energía se libera agua. Es por eso que es una fuente de energía con contaminación cero dentro del proceso de oxidación o combustión, siempre se dice que son fuentes limpias así por citar un ejemplo los vehículos eléctricos hoy considerados como vehículos de bajo impacto ambiental tienen muchas inconvenientes con las baterías, incluso hay rumores que están contaminado igual o aun peor que los vehículos a combustión por el proceso de las baterías.

“Todo combustible es capaz de liberar una cierta cantidad de combustible cuando reacciona con el oxígeno para formar agua. Esta cantidad de energía se mide experimentalmente y se cuantifica como el poder calorífico superior de un combustible (HHV; que son las siglas anglosajonas de *Higher Heating Value*), y como el poder calorífico inferior (LHV; *Low Heating Value*). La diferencia entre el HHV y el LHV es el “calor de la evaporación” y representa la cantidad de energía requerida para vaporizar un combustible líquido en un combustible gaseoso” (Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna, Marc Fábrega Ramos, 2009)

El poder calórico del hidrógeno definido como HHV (poder calórico superior) genera 141.86 kJ/g a una temperatura de 25°C y el LHV (poder calórico inferior) genera 119.93 kJ/g a una temperatura de 25°C.

La inflamación de los combustibles se lo hace en estado gaseoso, la volatilidad de un combustible es la capacidad de pasar de estado líquido a gaseoso siendo una de las características conocida también como punto de inflamabilidad en los combustibles y se lo determina a la temperatura más baja que puede evaporarse, consecuencia de ello estos gases pueden inflamarse a presión atmosférica con la presencia de una fuente de ignición como puede ser la chispa eléctrica de una bujía o la presión alta y temperatura elevada de un motor a presión constante. La inflamación de los combustibles se lo hace en estado gaseoso en el caso del hidrógeno ya lo encontramos en la naturaleza en esta condición mientras que las gasolinas, diésel entre otros los tenemos en forma líquida, el estado gaseoso para efectos de la combustión es ideal, pero para su almacenamiento genera complicaciones, un gas ocupa muchísimo espacio en referencia a un líquido, un volumen importante de gas para su almacenamiento requiere ser presurizarlo para ocupar un menor espacio y entra otro factor que es la presurización. En el siguiente cuadro se muestra los puntos de inflamación y las temperaturas de autoencendido a presión atmosférica como el número de octanos. En una combustión se busca que el proceso sea controlado, en otras palabras el detonante del combustible se encienda en el momento exacto determinado para su efecto y no por un auto encendido espontáneo del combustible, para esto se determina una escala de octanos que no es más que la capacidad que tienen los combustibles para no auto encenderse por si mismos, a más octanos mejora la resistencia a la presión y a la temperatura, es por ello que las gasolinas los nombres con la que se expende están acompañados por un número de octanos por ejemplo la Súper 92 octanos, extra 88 octanos.

**Punto de inflamación y temperatura de auto encendido.**

COMBUSTIBLE	PUNTO DE INFLAMACION	TEMPERATURA AUTOENCENDIDO	NUMERO DE OCTANOS
<b>Hidrogeno</b>	<-253°C	585°C	130
<b>Metano</b>	A -188°C	540°C	125
<b>Propano</b>	A -104°C	490°C	105
<b>Metanol</b>	11°C	385°C	109
<b>Gasolina</b>	Aproximadamente a -43°C	Entre 230°C y 480°C	87

**Tabla #1, Fuente Autores.**

La tabla demuestra las diferentes características físicas de algunos combustibles donde se aprecia bondades presentes en cada uno de ellos, algunos con mejores prestaciones, mayores características comparados entre sí, permite tener un balance entre estos combustibles ayudando a determinar con claridad la potencialidad, aplicabilidad y desempeño de cada elemento químico.

Hidrogeno se lo utiliza como un limpiador de **carbonilla** en motores de combustión interna, la carbonilla se forma en el proceso de combustión de motores diésel o gasolina en la cámara de combustión en los pistones y en todo el sistema de escape, acumulaciones que como característica es mala conductora del calor y pueden generar puntos calientes produciendo el auto encendido del motor, también en mínima parte esta carbonilla proviene de la quema del aceite del motor en el proceso de combustión. La sedimentación de la carbonilla en estudios

Realizados demuestra que se generan elementos tóxicos y un incremento en las emisiones contaminantes, el presente estudio determina que con una buena limpieza por medio del oxihidrogeno se baja las emisiones contaminantes producto de esta sedimentación en la parte interna del motor. Se puede afirmar que motor mientras más caliente trabaje en condiciones normales de funcionamiento el proceso de la combustión es más completo dejando un pequeño margen para la formación de estos residuos.

## **2.0 MARCO TEÓRICO**

El estudio se enfoca en el sector automotriz y la necesidad de bajar los niveles contaminantes producto de la quema de combustibles fósiles, la investigación en contexto estudia al hidrogeno como un fuente de limpieza en las cámaras de combustión por medio externos, con un análisis comparativo entre algunas fuentes de energía que permite visualizar los parámetros físico químicos de los compuestos, un estudio comparativo - deductivo de las emisiones del motor antes del proceso de limpieza en un vehículo con un recorrido de más de 100.000 km para efectos de pruebas en condiciones óptimas de funcionamiento, comparar los datos obtenidos con los datos posterior a la limpieza determinando que las emisiones decrecen por efectos de la limpieza interna del motor. Adicional hay un enfoque para que los vehículos cumplan la certificación anual de las normas requeridas por el distrito metropolitano de Quito basado en la norma Inen 2204, en ella se describen los estándares máximos de generación de polución para motores de combustión interna a gasolina N1, el estudio determina la incidencia que hace el oxihidrogeno con un equipo de limpieza para reducir los niveles de contaminación en motores que han trabajado por un tiempo, este estudio define a los motores de gasolina como un fuente de generación de energía, sus procesos de funcionamiento basados en libro “Motores del automóvil de Jovaj” quien define de forma clara cada uno de los proceso del motor en especial en enfoque fuerte el de combustión y sus forma de generación de energía, El libro Motores de Combustión Interna Alternativos de F Paire, articulo “Factores que determinan la emisión de contaminantes gaseosos y particulado por la combustión de combustibles fósiles de Gómez Macías, como el documento de línea base “Aplicación del hidrogeno en motores de combustión interna”, permite hacer estudio a profundidad de como generamos un proceso de combustión sus características principales, la generación de energía, los factores de delimitan un perdida o ganancia de la misma.

Las características del hidrogeno y como este puede ser una combustible con emisiones cero en un proceso de combustión, una mirada sobre la limpieza de las cámaras de combustión por medio de un sistema de hidrogeno que restablece un sistema de emisiones más bajo pos limpieza, para la cual se necesita de un equipo que permite ingresar el oxihidrogeno con volúmenes que pueden ejercer el efecto deseado de la limpieza, permitir por medio de herramientas tecnológicas tomar lecturas del motor antes de su proceso de limpieza y luego del proceso para validad por medio de datos numéricos si el procedimiento genera resultas positivos. Llevar estos datos como parámetro de comparación con los permitidos por la Revisión Técnica Vehicular que se basa en las normas Inen 2204 y generar un diagnostico que permita a los usuarios validar este procedimiento como uno más de los mantenimientos de rutina para mantener el vehículo funcionando dentro de los límites que el fabricante certifico, como dato hay que entender que esto también depende de la calidad del combustible, en el caso

Específico de la ciudad de Quito también hay que tener en consideración la altura que sobrepasa los 2800 metros sobre el nivel del mar. Como líneas de estudio de segundo piso se toma datos referentes al combustible y su calidad, así como los accidentes geográficos en con ello las afectaciones que se producen a los automotores por estas casusas que de una u otra manera tiene afectación por la mala combustión a la generación de carbonillas y los efectos ya mencionados.

El equipo de limpieza produce HHO que ingresa a la cámara de combustión, este hidrogeno al tomar en contacto con los depósitos de carbón forma hidrocarburos que se combustiona con el oxígeno con la ayuda de la presencia del combustible que puede ser gasolina o diésel dependiendo el tipo de motor, después de tiempo de servicio el carbón es eliminado de la parte interna del motor, adicional a ello forma una capa protectora de las partes internas del motor sin causar efectos colaterales o daños a las partes internas.

## 2. MATERIALES

### 2.1 Volkswagen Saveiro 1.8 L 2004.

La investigación para su desarrollo requiere de un vehículo marca Volkswagen modelo Saveiro de 1781cm<sup>3</sup> tipo pick up (camioneta) del año 2004, es una de las marcas que se comercializan dentro del todo el país con un posicionamiento de marca que lleva ya muchas décadas con gran acogida por los usuarios, Volkswagen para el año 2021 se posicionada en el décimo lugar según la AEADE de las preferencias de los consumidores entre todas las marcas que se comercializan en el Ecuador, este estudio tiene lugar entre enero y junio del año en mención.

Fichatécnicamotor VW Saveiro.

<b>MOTOR SAVEIRO</b>	
<b>Modelo</b>	Saveiro
<b>Cilindrada</b>	1.781 cm <sup>3</sup>
<b>Potencia (cv / rpm)</b>	99 / 5.250
<b>Distribución</b>	4 cilindros en línea 8 válvulas
<b>Relación de compresión</b>	9.9
<b>Relación consumo (km/l)</b>	10,8
<b>Par máximo (kgfm / rpm)</b>	15,5 / 3.000

Tabla #2 Fuente Volkswagen

El vehículo con un recorrido de 256000 Km en condiciones de funcionamiento normales con un alto nivel de emisiones es sometido al estudio para probar la teoría que la limpieza de cámaras de combustión con inclusión de oxihidrógeno permite bajar los niveles de emisiones, las pruebas realizadas en el estudio se las realiza sin catalizador para determinar el impacto real en los gases expulsados y posterior con catalizador para poder determinar los parámetros dentro de la norma.

### 2.2 Norma Inen 2204.

La norma Inne 2204 es utilizada por la Revisión Técnica Vehicular (RTV) para delimitar los niveles máximos permitido de emisiones contaminantes que producen los vehículos en el



distrito metropolitano de Quito, la norma utilizada por la RTV acoge pruebas estáticas para determinar los niveles emitidos. “Esta norma establece los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) que emplean gasolina” (Norma Inen 2204, segunda revisión 2017). En la norma es acogida por la RTV y se diferencia tres grupos con mayores rangos permitidos que dependen de los años de fabricación de los automotores más no por las certificaciones que esto tengan, esto da lugar a que vehículos con mucha tecnología no cumplan los parámetros de la RTV y la responsabilidad siempre termina siendo del motor y no de otros elementos como la calidad del combustible.

**Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralenti (prueba estática)**

Año modelo	% CO <sup>a</sup>		ppm HC <sup>a</sup>	
	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

<sup>a</sup> Volumen  
<sup>b</sup> Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

**Tabla #3 Fuente Norma Inen 2204**

La revisión técnica vehicular es el ente regulador donde se aplica la norma y se realizan las revisiones anuales de los vehículos para su certificación, la tabla adjunta es la base para que los motores de los distintos años de fabricación puedan certificar anualmente.

**Parámetros permitidos por la Revisión Técnica Vehicular.**

VEHÍCULOS GASOLINA (EXCEPTO MOTOS) RALENTI Y ALTAS RPM					
AÑO	HC en PPM	CO en %	O <sub>2</sub> en %	TIPO FALTA	RESULTADO
DEL 2000 EN ADELANTE	0 ≤ X < 160	0 ≤ X < 0,6	0 ≤ X < 3	0	APROBADO SIN FALTAS
	160 ≤ X < 180	0,6 ≤ X < 0,8	3 ≤ X < 4	1	APROBADO CON FALTA TIPO 1
	180 ≤ X < 200	0,8 ≤ X < 1	4 ≤ X < 5	2	APROBADO CON FALTA TIPO 2
	X ≥ 200	X ≥ 1	X ≥ 5	3	RECHAZADO
DE 1990 A 1999	0 ≤ X < 650	0 ≤ X < 3,5	0 ≤ X < 3	0	APROBADO SIN FALTAS
	650 ≤ X < 700	3,5 ≤ X < 4	3 ≤ X < 4	1	APROBADO CON FALTA TIPO 1
	700 ≤ X < 750	4 ≤ X < 4,5	4 ≤ X < 5	2	APROBADO CON FALTA TIPO 2
	X ≥ 750	X ≥ 4,5	X ≥ 5	3	RECHAZADO
DE 1989 Y ANTERIORES	0 ≤ X < 950	0 ≤ X < 6	0 ≤ X < 3	0	APROBADO SIN FALTAS
	950 ≤ X < 1100	6 ≤ X < 6,5	3 ≤ X < 4	1	APROBADO CON FALTA TIPO 1
	1100 ≤ X < 1200	6,5 ≤ X < 7	4 ≤ X < 5	2	APROBADO CON FALTA TIPO 2
	X ≥ 1200	X ≥ 7	X ≥ 5	3	RECHAZADO

**Tabla #4 Fuente Revisión Técnica Vehicular**

## 2.3 ANALIZADOR DE GASES

El analizador de gases es la herramienta indispensable para la toma de datos, permite cuantificar los diferentes comportamientos de las emisiones contaminantes de acuerdo a las

Condiciones de funcionamiento del motor, es una herramienta que cumple con “Certificaciones para MID (Directiva sobre instrumentos de medición) 2004/22/CE NMI 0122 B+D” ficha técnica del equipo, 2022. El analizador de gases marca BRAIN BEE, las características constructivas descritas por el fabricante se las encuentra en la ficha técnica del equipo mismo que cumple con los requerimientos de la RTV para la toma de datos y hacer su posterior análisis de resultados. El equipo está fabricado para hacer pruebas continuas lo que permite hacer las pruebas en forma diligente sin tener que hacer paros innecesarios.

**Ficha técnica Analizador BRAIN BEE AGS - 690**

<b>ANALIZADOR DE GASES</b>	
<b>Marca</b>	Brain bee
<b>Modelo</b>	AGS-690
<b>Características técnicas</b>	VALORES
<b>CO</b>	De 0 A 9.99 %vol.
<b>CO2</b>	De 0 A 19.9 %vol.
<b>O2</b>	De 0 A 25 %vol.
<b>HC</b>	De 0 A 9999 ppm vol.
<b>LAMBDA</b>	De 0.5 A 5
<b>REVOLUCIONES</b>	De 300 A 9990 rpm
<b>TEMPERATURA</b>	De 10 a 150 C

**Tabla #5, Fuente, Globaltech, 2022**

La utilización de un equipo de hidrogeno que permite hacer la limpieza de las cámaras de combustión mientras el motor está funcionando agregando hidrogeno, “**El limpiador de carbón HHO** es un equipo para limpiar el carbón del motor de automóviles, SUV, furgonetas, autobuses, camiones, etc. La máquina limpiadora de carbón del motor de la marca HHO es desarrollada y producida por China Hunan Kingkar Eco-Technologies Co., Ltd. También es el primero en el mundo, en hacer una doble limpieza y proteger las piezas del motor, utilizando gas HHO y agente limpiador de carbón HHO” (Fuente Carbon Cleaner, 2022).

**Ficha técnica Maquina de HHO Carbon Cleaner**

<b>Voltaje de entrada</b>	110V/220V/380V, ( 50-60) HZ ± 10%
<b>Capacidad nominal (KVA)</b>	7.5
<b>Consumo de agua (L / h)</b>	0.8
<b>Presión de trabajo (Mpa)</b>	≤ 0.08
<b>Modo de enfriamiento</b>	Aire fresco
<b>Nivel de aislamiento</b>	F
<b>Grado de protección de la fuente de alimentación</b>	IP21S
<b>Medio de trabajo</b>	<u>Descarbonizador</u>
<b>Método de trabajo</b>	Continuo
<b>Temperatura ambiental (°C)</b>	0 ~ 40
<b>Peso neto (kg)</b>	140
<b>Agente limpiador de carbón (ML)</b>	68ML
<b>Tiempo de limpieza de carbón</b>	20 minutos

**Tabla # 6, Fuente Carbon Cleaner, 2022**

## **2.4 GASOLINA**

La gasolina Súper es la utilizada para el estudio, es una gasolina que se la puede encontrar en cualquier parte del país y según los datos gubernamentales debe tener 95 octanos según norma INEN 935, se utilizó un mismo número de lote de combustible para no tener variantes por efectos de combustible.

### **3. TOMA DE DATOS.**

#### **3.1 Calibración de equipo analizador de gases.**

Para la toma de datos en primera instancia se debe hacer una calibración de equipo de toma de datos:

- Paso 1.

Encender el equipo de diagnosis conectado al computador, con el software de Omni Bus 800 correspondiente, con el programa funcionando seleccionar la opción de (análisis gases de escape)

- Paso 2.

Colocar función de análisis de gases de escape, ingresar la información solicitada, datos del vehículo y con la información completa ir al paso siguiente.

- Paso 3.

Se despliega una página solicitando los RTV para ingresar los valores permitidos por la RTV basados en la normativa INEN 2204.

- Paso 4.

El instrumento indica CALENTAMIENTO tomar en cuenta que la sonda de medida tiene que está expuesta al ambiente.

- Paso 5.

Una vez caliente el equipo para determinar que no existan factores externos que puedan alterar la medición previo a la toma de lecturas se realiza la prueba de estanqueidad de instrumento. Una vez que seleccionamos la opción de (prueba de estanqueidad) aparece PRUEBA DE ESTANQUEIDAD EN CURSO, esta prueba es necesaria para saber si la línea de la sonda se encuentra sin ningún daño que pueda ingresar aire y modificar las lecturas, una vez que el equipo realiza la prueba aparece un mensaje (prueba de estanqueidad acabado) e informa el resultado de esta prueba, a paso seguido se coloca ok o seleccionar ENTER.

- Paso 6.

Terminada la prueba de estanqueidad el paso siguiente es realizar la prueba, ubicar la opción de (test HC residual), observar la pantalla ESPERE POR FAVOR TEST HC RESIDUAL EN CURSO. Terminado el test residual en curso, aparecerá TEST HC RETIRE LA SONDA,retira la sonda y se procede a comenzar con las pruebas de obtención de datos.

- Paso 7.

Para hacer las mediciones es necesario que el vehículo se encuentre a la temperatura de operación, la pantalla indica un mensaje (llevar el motor a una temperatura superior a 80 grados centígrados).

- Paso 8.

Una vez que se culminó todos los pasos de calibración y descontaminación del equipo, con el vehículo a temperatura de operación se coloca la sonda teniendo en cuenta su seguro alojado en el interior del tubo de escape, antes de realizar tomar datos de prueba se debe

esperar unos segundos que se estabilice los valores que se proyectan en el equipo AGS 690.

#### **Colocación de instrumento de medida y toma de lecturas en el vehículo.**



**Figura#4, Fuente autores**

### **3.2 Procedimiento de ingreso de HHO**

- Paso 1.

Para iniciar con el procedimiento de limpieza de las cámaras de combustión del interior del motor se asegura que el vehículo no presente códigos de falla, de ser así, corregir los códigos de falla.

- Paso 2.

En motores de gasolina identificar la toma de vacío del colector de admisión para poder colocar el adaptador del equipo de HHO.

- Paso 3.

Con el motor encendido se prepara el equipo de HHO, se coloca el aditivo de limpieza en el equipo de limpieza, para ello el volumen que se ingresara en vehículo depende de la cilindrada del motor en el presente caso de la pick up debe ingresar 1200 Lb/h, recordar que el equipo no funciona si no se introduce el aditivo.

- Paso 4.

Con el vehículo encendido, poner a funcionar el equipo de HHO, para iniciar con el proceso luego de encender el equipo oprimir la tecla SED, a paso seguido la tecla SED PLUS para seleccionar el tiempo, oprimir SED y luego la tecla ON para finalmente la tecla STAR para seleccionar el caudal con las teclas + o - y fijar.

- Paso 5

Ajustado el flujo se debe recordar que no se acelera el motor mientras dura el proceso de eliminación de carbonilla, el equipo con HHO más el aditivo es capaz de retirar todo residuo del sistema de escape formado por el funcionamiento normal depositados en todos los componentes incluido el filtro de partículas.

- Paso 6

Cuando el proceso a terminado se debe dejar el motor funcionado por un minuto o dos.

- Paso 7

Apagar el motor y conectar las mangueras de colector de admisión, y de ser el caso otros elementos que se pudieron haber retirado como tapas u otros.

- Paso 8.

Instalado todo, por último, encender el motor acelerado de 3000 RPM a 3500 RPM mantenerlo por unos segundos, dejar que el motor baje a sus revoluciones de ralentí bajo por unos segundos volver acelerarlo de 3000 RPM a 3500 PRM mantenerlo por unos segundos, vejarlo que baje a ralentí bajo por unos segundos, repetir este procedimiento por tres minutos y el automóvil está listo.

Los datos obtenidos en las mediciones del proceso se los obtuvo en dos escenarios principales de medición sin catalizador, antes de la limpieza de la carbonilla y sistema de escape y posterior a la misma, a su vez estos dos escenarios se los sub dividió en dos partes, la mediadas a ralentí bajo es decir a 750 rpm y las medidas con ralentí alto 2500 rpm para poder identificar con precisión el desempeño del sistema de limpieza por HHO.

El primero escenario cuando el vehículo no se ha realizado ningún tipo de mantenimiento correctivo, se asegura que no presente códigos de falla, para eliminar cualquier error se cambia filtros de aire, filtros de combustible, bujías de encendido, cables de bujías, se asegura que las bobinas estén dentro de los parámetros de ohmios correctos y verificar que el funcionamiento sea el correcto sin fallos.

Para efecto de resultados se sigue un procedimiento ANOVA que es una herramienta estadística para la tabulación de los datos obtenidos.

Las primeras pruebas del vehículo es la toma de datos donde el vehículo está colocado el catalizador, los datos obtenidos son utilizados por medio de la herramienta ANOVA para procesamiento de datos estadísticos que minimizan las desviaciones de los datos, es por ello el número de muestras tomadas.

**Datos tomados de pruebas en ralentí (750 rpm) sin catalizador.**

**DATOS TOMADOS A 750 RPM CON TEMPERATURA SUPERIOR 80°C**

Prueba	1	2	3	4	5	6	7
CO % vol	0,88	0,8	0,71	0,85	0,7	0,79	0,82
CO2 % vol	13,1	13,1	13,23	12,9	13,31	12,6	12,7
O2 % vol	3,01	2,94	2,34	3,1	2,96	1,21	2,97
HC ppm	1395	1386	1454	1430	1327	1225	1415
LAMBDA (-)	1,059	1,048	1,031	1,061	1,024	1,024	1,019

**Tabla #7, Fuente autores**

El análisis de los datos obtenidos se determina por la varianza de un factor, donde de los resultados obtenido determinamos el promedio y la varianza.

**Resumen de la varianza de un factor a 750RPM, Sin catalizador.**

<b>RESUMEN</b>				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
CO % Vol	7,00	5,55	0,7928571	0,004524
CO2 % Vol	7,00	90,94	12,9914286	0,071414
O2 % Vol	7,00	18,53	2,6471429	0,464057
HC ppm	7,00	9632,00	1376,000000	6030,666667
LAMBDA (-)	7,00	7,27	1,038000	0,000312

**Tabla #8, Fuente autores.**

Los resultados determinan que el vehículo sin catalizador no pasa los parámetros de la RTV, por lo que se requería hacer ajuste en el motor para bajar las emisiones.

**Resultado de datos tomados.**

<b>Resultados 750 RPM</b>	
CO % Vol	0,793
CO2 % Vol	12,991
O2 % Vol	2,647
HC ppm	1376,000
LAMBDA (-)	1,038

**Tabla #9, Fuente autores**

**Datos tomados de pruebas a 2500 RPMsin Catalizador.**

<b>DATOS TOMADOS A 2500 RPM A TEMPERATURA SUPERIOR 80°C</b>							
<b>Prueba</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
CO % vol	1,86	1,91	1,93	1,87	0,96	1,15	1,75
CO2 % vol	12,3	12,4	12,45	12,78	13,24	12,2	12,2
O2 % vol	3,15	3,11	3,07	2,95	3,02	1,32	3,12
HC ppm	1828	1788	1754	1886	1742	1654	1742
LAMBDA (-)	1,015	1,021	1,019	1,018	1,01	1,008	1,008

**Tabla #10, Fuente autores.**

**Resumen de la varianza de un factor a 2500 RPM, sin catalizador.**

<b>RESUMEN</b>				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
CO % Vol	7	11,430	1,633	0,1621
CO2 % Vol	7	87,570	12,510	0,1430
O2 % Vol	7	19,740	2,820	0,4421
HC ppm	7	12394,000	1770,571	5403,6190
LAMBDA (-)	7	7,099	1,014	0,0000

**Tabla #11, Fuente autores**

Los resultados obtenidos de las pruebas sin catalizador arrojan resultados que no permite certificar la norma de la RTV por lo que habría que realizar ajuste en el motor.

**Resultados de las pruebas realizadas a 2500 RPM sin catalizador.**

<b>Resultados 2500 RPM</b>	
CO % Vol	1,630
CO2 % Vol	12,510
O2 % Vol	2,820
HC ppm	1771,000
LAMBDA (-)	1,014

**Tabla #12, Fuente autores**

Las pruebas obtenidas después de realizar la limpieza del motor y sin catalizador se las describe en las siguientes tablas.

**Datos tomados de pruebas a 750 RPM sin Catalizador después de la limpieza del motor con HHO.**

<b>DATOS TOMADOS A 750 RPM A TEMPERATURA SUPERIOR 80°C POSTERIOR A LA LIMPIEZA CON HHO</b>							
<b>Prueba</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
CO % vol	0,64	0,58	0,67	0,62	0,69	0,65	0,63
CO2 % vol	14	13,94	14	13,96	13,85	14,02	13,96
O2 % vol	1,1	1,5	2,1	1,4	1,7	1,8	1,6
HC ppm	310	295	246	325	324	315	294
LAMBDA (-)	1,019	1,003	1,004	1,02	1,003	1,004	1,19

**Tabla #13, Fuente autores.**

Los valores obtenidos se procesan por medio de la herramienta ANOVA misma que tabula los datos obtenidos para generar un promedio de datos de la toma de datos, así genera un dato de varianza de los mismos datos.

**Resumen análisis de la varianza de un factor a 750 RPM posterior a la Limpieza con HHO, sin catalizador.**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
CO %	7	4,48	0,64	0,001266667
CO2 %	7	97,73	13,96142857	0,003214286
O2	7	11,2	1,6	0,1
HC ppm	6	1794	299	854,4
LAMBDA (-)	7	7,243	1,034714286	0,004745905

**Tabla #14, Fuente autores**

**Resultados pruebas a 750 RPM posterior a la limpieza de HHO, sin catalizador.**

CO %	0,64	%/Vol
CO2 %	13,96	%/Vol
O2	1,6	%/Vol
HC ppm	299	ppmVol
LAMBDA (-)	1,03	-

**Tabla #15, Fuente autores.**

Los datos obtenidos a revoluciones altas a 2500 RPM en el vehículo posterior a la limpieza de la carbonilla en el interior del motor nos da como resultados los siguientes, cabe destacar que los resultados son tomados sin catalizador.

**Datos tomados de pruebas a 2500 RPM sin Catalizador después de la limpieza del motor con HHO.**

**DATOS TOMADOS A 2500 RPM A TEMPERATURA SUPERIOR 80°C  
POSTERIOR A LA LIMPIEZA CON HHO**

<b>Prueba</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
CO % vol	0,96	0,85	1,05	0,94	0,98	1,1	0,98
CO2 % vol	13,8	13,77	13,8	13,65	13,65	13,84	13,84
O2 % vol	1,07	1,9	2,6	1,8	2,2	2,6	1,9
HC ppm	307	305	298	348	352	348	310
LAMBDA (-)	1,008	1,004	1,006	1,024	1,006	1,09	1,006

**Tabla #16, Fuente autores**

**Resumen análisis de la varianza de un factor a 2500 RPM posterior a la Limpieza con HHO**



**RESUMEN**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
CO % Vol	7	6,86	0,980	0,006
CO2 % Vol	7	96,35	13,764	0,007
O2 % Vol	7	14,07	2,010	0,281
HC ppm	7	2268	324,000	576,333
LAMBDA (-)	7	7,144	1,021	0,001

**Tabla #17, Fuente autores.**

**Resultados pruebas a 2500 RPM posterior al limpieza de HHO.**

<b>Resultados 2500 RPM</b>	
CO % Vol	0,980
CO2 % Vol	13,760
O2 % Vol	2,010
HC ppm	324,000
LAMBDA (-)	1,021

**Tabla #18, Fuente autores**

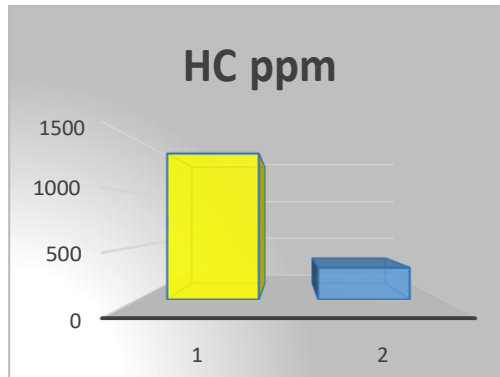
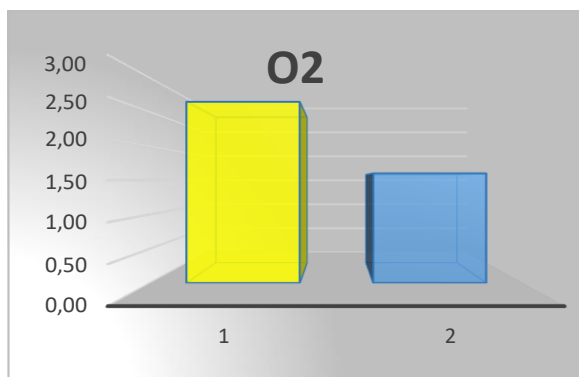
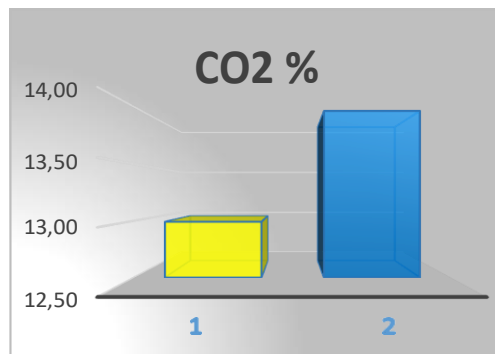
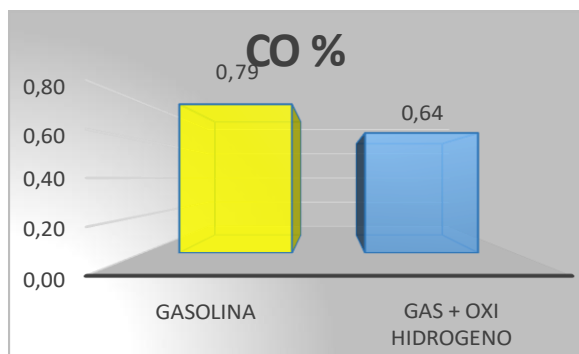
Datos comparativos de los resultados tomados entre los que tienen que ver a datos con el motor sin catalizador y datos obtenidos después de que el motor fue sometido al sistema de limpieza con HHO y determinar el efecto.

**Porcentaje de variación a 750 rpm sin catalizador.**

	750 RPM	GASOLINA	GAS + OXI HIDROGENO	PORCENTAJES	
CO % Vol	0,79	0,79	0,64	-19,00%	19,28
CO2 % Vol	12,99	12,99	13,96	7,00%	-7,47
O2 % Vol	2,65	2,65	1,6	-39,00%	39,56
HC ppm	1376	1376	299	-78,00%	78,27
LAMBDA (-)	1,038	1,038	1,03	-0,31%	0,32

**Tabla #19, Fuente autores**

**Gráficos del comportamiento de los gases a 750 rpm.**



**Figura#5, Fuente autores.**

Los datos obtenidos demuestran que a 750 RPM el comportamiento del motor presenta una reducción en la generación de CO en un 19%, del O<sub>2</sub> en un 39% y en HC de 78%, mientras que un incremento del CO<sub>2</sub> en 7%. Los resultados son alentadores por la reducción en especial de HC, sin dejar de ser un inconveniente el incremento de CO<sub>2</sub> si bien es cierto no es directamente contaminante, su producción afecta al equilibrio del planeta.

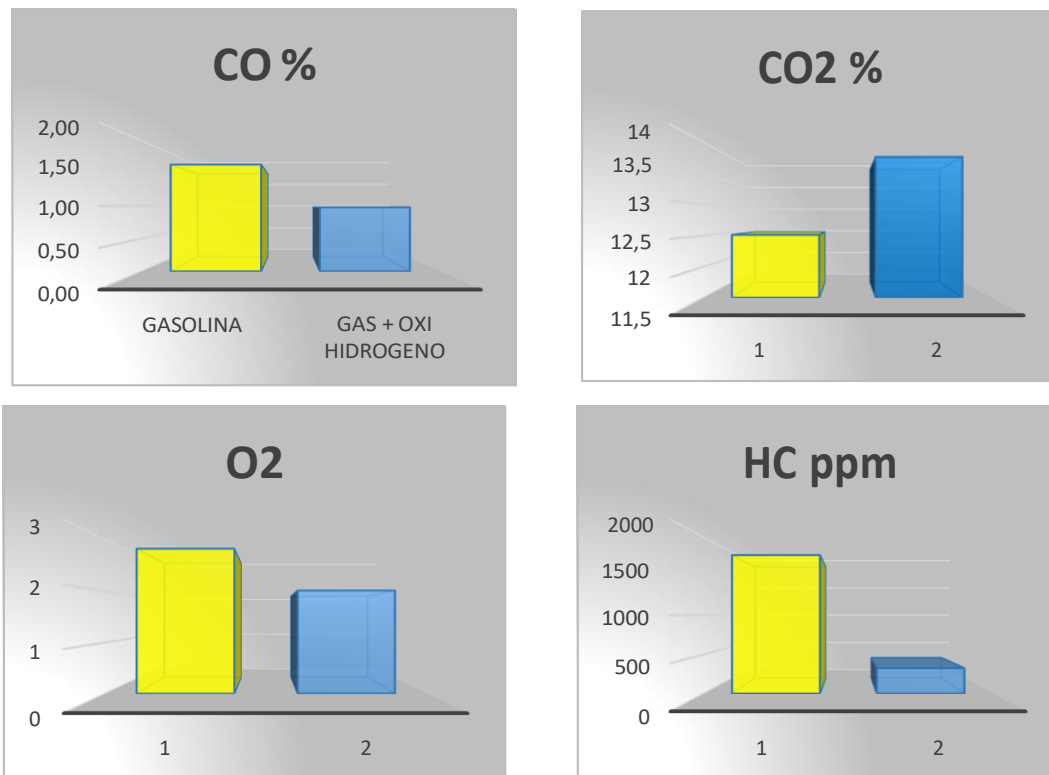
Datos comparativos de los resultados de las medidas a 2500 RPM tomados del motor sin catalizador y después de la limpieza con HHO.

**Porcentaje de variación a 2500 rpm, sin catalizador.**

Porcentajes de variación a 2500rpm			
2500 RPM	GASOLINA	GAS + OXI HIDROGENO	PORCENTAJES
CO % Vol	1,63	0,98	-40%
CO2 % Vol	12,51	13,76	10%
O2 % Vol	2,82	2,01	-29%
HC ppm	1771	324	-81%
LAMBDA (-)	1,014	1,021	1

**Tabla #20, Fuente autores**

**Gráficos comparativos del comportamiento de los gases a 250 rpm.**



**Figura #6, Fuente autores.**

Los datos obtenidos a 2500 rpm, mantienen una tendencia a la baja de emisiones contaminantes y los porcentajes de reducción son considerables, para establecerlo como una buena práctica de mantenimiento, existe una reducción del CO en un 40%, del O<sub>2</sub> en 29% y los HC en un 81%, mientras que los CO<sub>2</sub> tienen un incremento de 10%, esto en lo que tiene que ver con las emisiones contaminantes.

La lectura de datos antes de la prueba de limpieza con oxígeno y posterior a la misma, pero con el catalizador instalado para verificar si las condiciones actuales permiten certificar la norma dieron como resultado positivo.

**Variación del particulado posterior a la limpieza con oxígeno sin catalizador y con catalizar.**

750 RPM	Gasolina Sin Catalizador	Gasolina con oxígeno	PORCENTAJES
CO % Vol	0,64	0.64	0.00%
CO <sub>2</sub> % Vol	13,96	13.87	0.65%
O <sub>2</sub> % Vol	1,6	1.47	8.12%
HC ppm	299	94	68.56%
LAMBDA (-)	1,03	1.035	0.00%

**Tabla #21 Resultados emisiones finales, fuente autores**

Como datos finales del estudio, se determina que un motor que está funcionando con un nivel de contaminación muy elevado posterior a la limpieza con oxígeno presenta valores que le permiten certificar la Revisión Técnica Vehicular, esta limpieza del sistema permite eliminar impurezas que reaccionan en el proceso de combustión generando más particulado, determinando que este sistema de limpieza puede ser una herramienta no solo para pasar una certificación si no ampliar el estudio para determinar que sería un buen plan de mantenimiento para e incorporarlo para que los motores se mantenga emitiendo emisiones dentro de los parámetros permitidos por la norma.

#### 4. CONCLUSIONES

**4.1** El estudio demuestra de forma significativa que el sistema de limpieza de la carbonilla de las cámaras de combustión y de todo el sistema de escape, ayuda a reducir las emisiones de gases contaminantes en porcentajes elevados, una disminución significativa de los HC, al CO, y al O<sub>2</sub>. En lo que tiene que ver con los HC hay una reducción que en promedio está en el 80% en bajas y altas revoluciones un valor muy importante a considerar, lo referente al CO hay una reducción en bajas revoluciones del 19% y en altas revoluciones un 40%, para el O<sub>2</sub> presenta una reducción en bajas revoluciones del 40% y en altas revoluciones un 29%. Estos datos son obtenidos del estudio realizado en pruebas de laboratorio con instrumentos calibrados y certificados.

**4.2** El estudio demuestra que el motor en primera instancia no pasa los parámetros de la RTV por una diferencia considerable, ya que las medidas distan por mucho a los máximos permitidos pese a que las lecturas son tomadas con el catalizador instalado, posterior al proceso de limpieza del sistema de escape, sin hacer intervenciones en el motor los datos obtenidos de las lecturas permiten resultados de aprobación de la norma y con un margen muy aceptable que garantiza de buen desempeño en emisiones de acuerdo a la RTV.

**4.3** El estudio abre la puerta a la investigación donde se pueda determinar el tiempo de duración de esta limpieza para colocarlo como un plan de mantenimiento preventivo, el mundo en los actuales momentos lucha por mantener los niveles de emisiones contaminantes lo más bajo posible, este sistema de limpieza puede ser un mecanismo de mantener los niveles bajos de emisiones si se lo hace con una frecuencia determinada que debe ser estudiada y canalizada para mejor desempeño en las emisiones.

**4.4** El estudio se rige apegado a la normativa INEN 2203 para pruebas estáticas donde se parametriza el procedimiento para la obtención de datos que determina la concentración de emisiones en vehículos de encendido por chispa cuyo combustible es gasolina.

## **5. BIBLIOGRAFÍA.**

1. Abohamzeh, Elham, Fatemeh Salehi, Mohsen Sheikholeslami, Rouzbeh Abbassi, and Faisal Khan. 2021. "Review of Hydrogen Safety during Storage, Transmission, and Applications Processes." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 72. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104569.
2. Air Resources Board, California. 2019. 2019 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle & Hydrogen Fuel Network Development.
3. Ball, Michael, and Marcel Weeda. 2015. "The Hydrogen Economy - Vision or Reality?" *International Journal of Hydrogen Energy* 40(25):7903–19. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.032. 1665 Pol. Con. (Edición núm. 70) Vol 7, No 10, Octubre 2022, pp. 1645-1667, ISSN: 2550 - 682X Abrahan Mesias Jorque Rea, Ángel Xavier Arias Pérez, Darío Xavier Borja Soto, Andrés Sebastián Moreno Constante
4. Boggs, Bryan K., Rebecca L. King, and Gerardine G. Botte. 2009. "Urea Electrolysis: Direct Hydrogen Production from Urine." *Chemical Communications* (32):4859–61. doi: 10.1039/b905974a.
5. Dave, Chirag D., and K. K. Pant. 2011. "Renewable Hydrogen Generation by Steam Reforming of Glycerol over Zirconia Promoted Ceria Supported Catalyst." *Renewable Energy* 36(11):3195–3202. doi: 10.1016/j.renene.2011.03.013.
6. Deloitte China. 2020. Fueling the Future of Mobility Hydrogen and Fuel Cell Solutions for Transportation Volume 1.
7. Dornoff, Jan, Joshua Miller, Peter Mock, and Uwe Tietge. 2018. The European Commission Regulatory Proposal for Post-2020 CO<sub>2</sub> Targets for Cars and Vans: A Summary and Evaluation BACKGROUND.

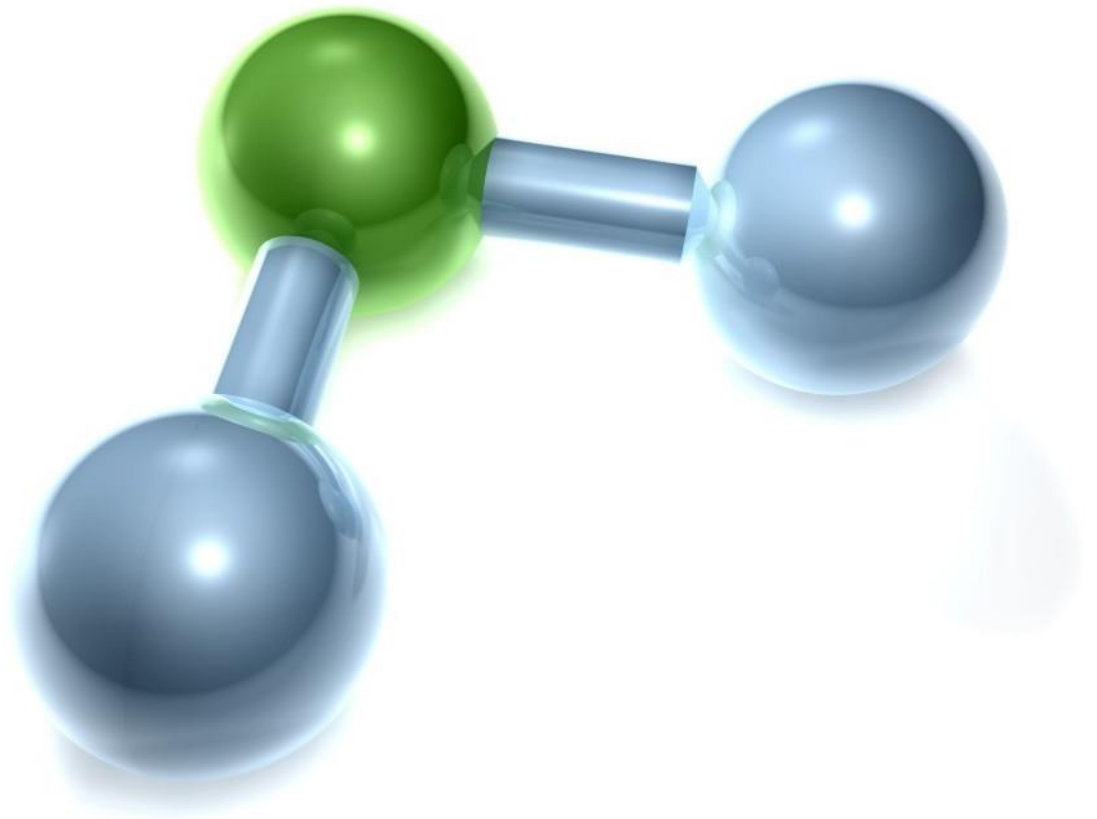
8. Dutta, Suman. 2014. "A Review on Production, Storage of Hydrogen and Its Utilization as an Energy Resource." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20(4):1148–56.
9. Fayaz, H., R. Saidur, N. Razali, F. S. Anuar, A. R. Saleman, and M. R. Islam. 2012. "An Overview of Hydrogen as a Vehicle Fuel." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8):5511–28.
10. González, Rogelio. 2022. *Hidrógeno Pila de Combustible: Gases Del Aire*. Diaz de Santos.
11. Gurz, Mehmet, Ertugrul Baltacioglu, Yakup Hames, and Kemal Kaya. 2017. "The Meeting of Hydrogen and Automotive: A Review." Pp. 23334–46 in *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 42. Elsevier Ltd.
12. Hyundai. 2019. "Hyundai Motor Group Homepage." Retrieved July 16, 2022 (<https://www.hyundaimotorgroup.com/Index.hub>).
13. International Energy Agency. 2019. *The Future of Hydrogen: Report Prepared by the IEA for the G20, Japan*.
14. Iriondo, A., V. L. Barrio, M. el Doukkali, J. F. Cambra, M. B. Güemez, J. Requies, P. L. Arias, M. C. Sánchez-Sánchez, R. Navarro, and J. L. G. Fierro. 2012. "Biohydrogen Production by Gas Phase Reforming of Glycerine and Ethanol Mixtures." Pp. 2028–36 in *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 37.
15. Jain, I. P. 2009. "Hydrogen the Fuel for 21st Century." *International Journal of Hydrogen Energy* 34(17):7368–78. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.093.
16. King, Rebecca L., and Gerardine G. Botte. 2011. "Hydrogen Production via Urea Electrolysis Using a Gel Electrolyte." *Journal of Power Sources* 196(5):2773–78. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.006.
17. Miltner, Angela, Walter Wukovits, Tobias Pröll, and Anton Friedl. 2010. "Renewable Hydrogen Production: A Technical Evaluation Based on Process Simulation." *Journal of Cleaner Production* 18(SUPPL. 1). doi: 10.1016/j.jclepro.2010.05.024.
18. Ren, Guizhou, Guoqing Ma, and Ning Cong. 2015. "Review of Electrical Energy Storage System for Vehicular Applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:225–36.
19. Rodríguez, Rafael. 2020. "Análisis de Sistemas de Propulsión Para Automoción Basados En Pilas de Combustible y Estimación de Costes." Universidad de Sevilla, Sevilla.
20. Toyota. 2021. "Outline of the Mirai Key Specifications." Toyota Mot. Corp. Retrieved July 16, 2022 (<http://newsroom.toyota.co.jp/en/download/4224903>).
21. Walker

## **Anexo 1**

# **HIDRÓGENO APLICACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

# **HIDRÓGENO**

**APLICACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**



**MARC FÀBREGA RAMOS**



# PROYECTO FINAL DE CARRERA

## HIDRÓGENO

### APLICACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Autor del proyecto: Marc Fàbrega Ramos

Director del proyecto: Manuel Rodríguez Castillo

Titulación: Ingeniería Técnica Naval (Propulsión y Servicios del Buque)

Centro: Facultat de Nàutica de Barcelona

Curso: 2008 – 2009

Cuatrimestre: Primavera





# ÍNDICE

Prólogo	6
1. Introducción	7
2. Situación actual del petróleo	9
2.1. Oferta	10
2.1.1. Comercio exterior	10
2.2. Precios	11
3. Energías alternativas	13
3.1. Energía solar térmica	14
3.1.1. Diseño de las centrales solares térmicas	14
3.1.2. Tipos de centrales solares térmicas	14
- Centrales con colectores distribuidos (DCS, <i>Distributed Collector System</i> )	15
- Centrales de discos parabólicos	16
- Centrales de torre central (CRS, <i>Central Receiver System</i> )	17
3.2. Energía solar fotovoltaica	18
3.2.1. Sistemas para la utilización de la energía solar fotovoltaica	19
- Sistemas autónomos	19
- Sistemas conectados a la red	20
3.2.2. Energía solar fotovoltaica	20
3.3. Energía eólica	21
3.3.1. Parques eólicos	22
- Parques en el mar	22
3.3.2. Producción de hidrógeno a partir del viento (caso real)	24
3.4. Energía geotérmica	25
3.4.1. Producción de electricidad	26
- Plantas de aprovechamiento de vapor seco	26
- Plantas de agua a alta temperatura	26
- Centrales de ciclo binario	27
3.5. Energía mareomotriz	27
3.5.1. Sistemas de obtención de la energía de las olas	28
- Péndulo	31
- Rectificador Russell	32
- Rectificador Belfast	33
- “Mighty Whale” (Ballena Poderosa)	34
- Convertidor N.E.L.	35
- “Wave Plane”	37
- Paleta oscilante Salter	37
- “Pelamis”	37
- “Archimedes Wave Swing” (AWS)	38
- Cilindro oscilante de Bristol	39
- “TAPCHAN” (Tapered Channel – Canal estrechado)	40
- “Wave Dragon” (Dragón de olas)	41
3.5.2. La energía térmica de los océanos (energía mareotérmica)	41
3.6. Biomasa	42



3.6.1. Fuentes de biomasa para fines energéticos	43
- Biomasa natural	43
- Biomasa residual	43
- Excedentes de cosechas agrícolas	44
- Cultivos energéticos (agroenergía)	44
3.6.2. Procesos de obtención	44
- Procesos físicos	44
- Procesos termoquímicos	45
- Procesos bioquímicos	45
3.6.3. Producción de energía eléctrica	46
3.6.4. masa	46
3.7. Tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU)	47
3.7.1. Recuperación del biogás en los vertederos	48
4. Propiedades del hidrógeno	50
4.1. Características	50
4.2. Propiedades físicas	50
4.2.1. Estado	50
4.2.2. Olor, color y gusto	51
4.2.3. Toxicidad	51
4.2.4. medidas relacionadas	52
- Densidad	52
- Volumen específico	52
- Relación de expansión	52
- Fugas	53
4.3. Características químicas	54
4.3.1. densidad	54
4.3.2. Energía	55
- Contenido en energía	55
- Densidad de la energía	55
4.3.3. inflamabilidad	56
- Punto de inflamación (o "flashpoint")	56
- Rango de inflamabilidad	57
- Temperatura de autoencendido	59
- Número de octano	60
- Energía de ignición	60
- Velocidad de quemado	61
- Distancia de apagado	61
- Características de la llama	62
4.3.4. Fragilización por hidrógeno	64
5. Obtención de hidrógeno	66
5.1. Fuentes	67
5.2. Reformado de hidrocarburos	70
5.2.1. combustibles potencialmente reformables	71
- Metano (Gas natural)	71
- Metanol	71
- Gasolina y Diesel	71
- Carbón	72
5.2.2. métodos	72



- Reformadores de vapor	72
- Reformadores de oxidación parcial. Oxidación parcial de hidrocarburos	74
- Reformadores autotérmicos	75
- Reformadores por descomposición térmica	76
5.2.3. Armado	77
- Reacción de cambio agua/gas	78
- Oxidación selectiva	79
- Metanaje	80
- Adsorción por oscilación de presión	81
- Membranas separadoras de metal	82
5.3. Descomposición termoquímica del agua	83
5.4. Fotoelectrólisis	84
5.4.1. Producción fotobiológica	85
5.5. Producción a partir de biomasa	86
5.5.1. Gasificación de la biomasa	86
5.5.2. Pirolisis	86
5.6. Procesos industriales	86
6. Almacenaje de hidrógeno	88
6.1. Gas a alta presión (CGH <sub>2</sub> )	89
6.1.1. s	91
6.2. Hidrógeno líquido (LH <sub>2</sub> )	93
6.3. Almacenaje	95
6.3.1. metálicos	95
- Ventajas de los hidruros metálicos	95
- Teoría de los hidruros metálicos	96
- Problemas técnicos de almacenamiento por hidruros	97
6.3.2. Adsorción al carbono	97
6.3.3. Microesferas de cristal	98
6.3.4.	98
7. Transporte de hidrógeno	99
7.1. Transporte de hidrógeno en forma gaseosa	99
7.1.1. mpuestos para tuberías de hidrógeno	100
7.2. Transporte de hidrógeno en forma líquida	100
7.3. Hidrogeneras	102
8. Motores de hidrógeno	106
8.1. sobre los motores de hidrógeno	106
8.2. Combustibles del hidrógeno	108
8.2.1. amplia gama de inflamabilidad	109
8.2.2. n	119
8.2.3. Pequeña distancia de apagado	110
8.2.4. mperatura de autoignición elevada	110
8.2.5. Alta velocidad de llama	111
8.2.6. Alta difusividad	111
8.2.7. Baja densidad	111
8.3. Combustible	111
8.4. Problemas y soluciones del preencendido	114
8.5. motores de gasolina a hidrógeno	116



8.5.1. Control de aceite del motor	116
8.5.2. Culata y refrigeración	117
8.5.3. Sistemas de ignición	117
8.5.4. Cambios estructurales	118
8.5.5. Sistemas de suministro de combustible	118
- Carburación	118
- Sistemas de inyección por conducto (PIF, <i>Port Injection Fuel</i> )	118
- Inyección directa (DI, <i>Direct Injection</i> )	120
8.5.6. motor	121
8.5.7. ma de escape	122
8.5.8. Aceite lubricante	123
⌘ mica	123
⌘ misiones	124
⌘ . Potencia obtenida	126
⌘ motores de hidrógeno	127
8.9.1. Motor de cuatro tiempos	127
8.9.2. Motor rotativo (Wankel)	129
9. Aplicación en el sector naval	132
⌘ Hydrogen Oceanjet 600	132
9.1.1. Diseño del buque	133
9.1.2. ma de combustible	133
9.1.3. Seguridad	134
Conclusiones	135
Recursos utilizados	136
Anexos	138
Anexo I: Primeras imágenes del hidrógeno quemándose en un motor de combustión interna	139
Anexo II: Método para almacenar hidrógeno a temperatura ambiente	140
Anexo III: Prevención y extinción de incendios de hidrógeno	141



## 4. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

### 4.1. Estructura atómica

El hidrógeno es en gran medida el elemento más abundante del universo, componiendo el 75% de la masa de toda la materia visible en estrellas y galaxias.

El hidrógeno es el más simple de todos los elementos. Se puede visualizar un átomo de hidrógeno como núcleo central denso con un solo electrón orbitando a su alrededor, algo parecido a un planeta orbitando alrededor del Sol.

En la mayoría de átomos de hidrógeno, el núcleo está formado por un único protón, aunque existe una variante extraña (o “isótopo”) del hidrógeno que contiene un protón y un neutrón. Ésta forma de hidrógeno se denomina deuterio o hidrógeno pesado.

Existen otros isótopos de hidrógeno, como el tritio, con dos neutrones y un protón, pero son más inestables.

La mayor parte de la masa de un átomo de hidrógeno se concentra en su núcleo.

Los protones, como es sabido, tienen carga eléctrica positiva, mientras que los electrones tienen carga eléctrica negativa. Juntas, las cargas asociadas al protón y el electrón de cada átomo de hidrógeno se cancelan la una a la otra, de modo que los átomos individuales de hidrógeno son eléctricamente neutros.

La masa atómica del hidrógeno es de 1,007940 kg/kmol; mientras que su masa molecular es de 2,01588 kg/kmol.

### 4.2. Propiedades físicas

#### 4.2.1. Estado

El hidrógeno es el segundo elemento de la tabla periódica que dispone de los puntos de ebullición y de fusión más bajos, después del helio.

Se encontrará en estado líquido por debajo de su punto de ebullición, a  $-252,77\text{ °C}$ , y se encontrará en estado sólido por debajo de su punto de fusión, a  $-259,2\text{ °C}$  y presión atmosférica.





Como puede observarse, estas temperaturas son extremadamente bajas. Hablaremos de temperaturas criogénicas cuando éstas se encuentren por debajo de  $-73^{\circ}\text{C}$ , con lo que todos aquellos líquidos que se encuentren a esas temperaturas serán denominados líquidos criogénicos.

El punto de ebullición de un combustible es un parámetro crítico, ya que define la temperatura a la cual debe ser enfriado para almacenarlo y poderlo utilizar en su estado líquido. Los combustibles que se encuentren en estado líquido ocuparán menos espacio de almacenaje que los combustibles gaseosos, además de ser más fáciles de transportar. Por esta razón, los combustibles que se encuentren en estado líquido en condiciones atmosféricas (como puedan ser la gasolina, el diesel, metanol, o el etanol) son particularmente interesantes. Por otro lado, todos aquellos combustibles que en condiciones atmosféricas se encuentren en estado gaseoso (como puedan ser el hidrógeno o el gas natural) son menos convenientes ya que deberán ser almacenados como gas presurizado o bien como líquido criogénico.

El punto de ebullición de una sustancia pura aumenta a medida que se eleva la presión. Desafortunadamente, el punto de ebullición del hidrógeno puede aumentarse únicamente hasta un máximo de  $-240^{\circ}\text{C}$  aplicando aproximadamente 13 bar<sub>g</sub>.

En cuanto a la capacidad calorífica específica del hidrógeno, éste tiene un calor específico a presión constante ( $c_p$ ) de 28,623 kJ/kmol·K; y un calor específico a volumen constante ( $c_v$ ) de 20,309 kJ/kmol·K.

Tal y como se verá más adelante, el hidrógeno usado para la combustión en motores, puede ser almacenado como un gas a alta presión o bien como líquido criogénico.

#### 4.2.2. Olor, color y gusto

El hidrógeno puro es inodoro, no tiene color y es insípido. Si se produjese un escape de hidrógeno, éste resultaría casi invisible en la luz del día.

El hidrógeno obtenido a partir de otros combustibles fósiles viene acompañado generalmente por nitrógeno, bióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases. Todos ellos son también en la mayoría de casos inodoros, descoloridos e insípidos.

#### 4.2.3. Toxicidad

El hidrógeno en sí no resulta tóxico, pero puede actuar como asfixiante ya que desplaza el oxígeno que se encuentra en el aire.

Los niveles de oxígeno por debajo del 19,5% resultan insuficientes para los seres humanos. Los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden incluir la hiperventilación, una disminución de las capacidades mentales, coordinación muscular deteriorada, falta de juicio, depresión, inestabilidad emocional y fatiga. Con concentraciones inferiores al 12% de oxígeno, se produce inconsciencia inmediata, sin síntomas de alerta anteriores.





Es por eso que se debe tener precaución en caso de manipular hidrógeno en recintos pequeños y cerrados, ya que una fuga podría llegar a causar la muerte por asfixia.



**¡Atención!** → El hidrógeno inhalado puede dar lugar a una mezcla inflamable dentro del cuerpo. La inhalación de hidrógeno puede producir inconsciencia y asfixia.

Debe tenerse en cuenta, además, que el resto de gases que puedan encontrarse mezclados con el hidrógeno, al haber sido éste extraído de otros combustibles fósiles, como por ejemplo nitrógeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono y otros, pueden también actuar como asfixiadores desplazando el oxígeno. Además, el monóxido de carbono es un gas venenoso, con lo que se presenta como un elemento peligroso para la salud.

#### 4.2.4. Densidad y medidas relacionadas

El hidrógeno dispone de un peso atómico más bajo que cualquier otra sustancia, y por lo tanto tendrá una densidad muy baja tanto en estado líquido como gaseoso.

- ***Densidad***

La densidad es medida como la cantidad de masa contenida por volumen de unidad. El valor de la densidad tendrá significado únicamente en una temperatura y presión especificadas, ya que ambos parámetros afectan a la compacticidad del enlace molecular, especialmente en los gases. La densidad de un gas se denomina densidad de vapor, mientras que la densidad de un líquido se denomina densidad líquida.

El hidrógeno dispone de una densidad en estado gaseoso (a 20°C y 1 atm) de 0,08376 kg/m<sup>3</sup>; y una densidad líquida de 0,0708 kg/l.

- ***Volúmen específico***

El volumen específico es el inverso de la densidad y expresa la cantidad de volumen por unidad de masa. Así, el volumen específico de gas de hidrógeno (con unas condiciones de 20°C y 1 atm) es de 11,9 m<sup>3</sup>/kg, mientras que el volumen específico del hidrógeno líquido (a – 253°C y 1 atm) es de 0,014m<sup>3</sup>/kg.

- ***Relación de expansión***

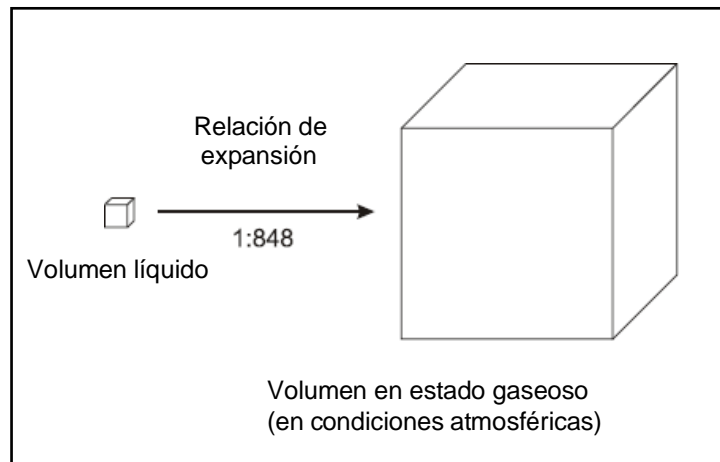
Cuando el hidrógeno se almacena como un líquido, se evapora durante su expansión a condiciones atmosféricas, con un aumento correspondiente en su volumen.







La relación de expansión del hidrógeno es de 1:848, y significa que el hidrógeno, en su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que cuando se encuentra en estado líquido.



*Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gas*

Cuando el hidrógeno se almacena como un gas a alta presión (250 bar<sub>g</sub>) a temperatura atmosférica, su relación de expansión a presión atmosférica es de 1:240.

#### ▪ **Fugas**

Las moléculas del gas de hidrógeno son mucho más pequeñas que las del resto de gases, con lo que pueden difundirse a través de muchos materiales considerados herméticos o impermeables a otros gases. Esta característica hace del hidrógeno un elemento más difícil de contener que otros gases.

Si se produce un escape de hidrógeno, la fuga se evaporará muy rápidamente, ya que el punto de ebullición del hidrógeno es, como ya se ha dicho anteriormente, extremadamente bajo.

Las fugas de hidrógeno son peligrosas, ya que con ellas existe el riesgo de que se produzca fuego al mezclarse con el aire. No obstante, el pequeño tamaño de la molécula que aumenta la probabilidad de que se produzca una fuga, también da lugar a que el hidrógeno que haya escapado del lugar donde estaba almacenado se diluya rápidamente, especialmente si nos encontramos al aire libre.

Cuando el hidrógeno se utiliza como combustible, el hecho de que pueda producirse una fuga hace necesario prestar una especial atención en el diseño del sistema de carburante, para asegurarse de que cualquier fuga pueda dispersarse y diluirse de la forma más fácil posible.



**¡Atención!** → Los escapes de hidrógeno plantean un riesgo de incendio potencial.





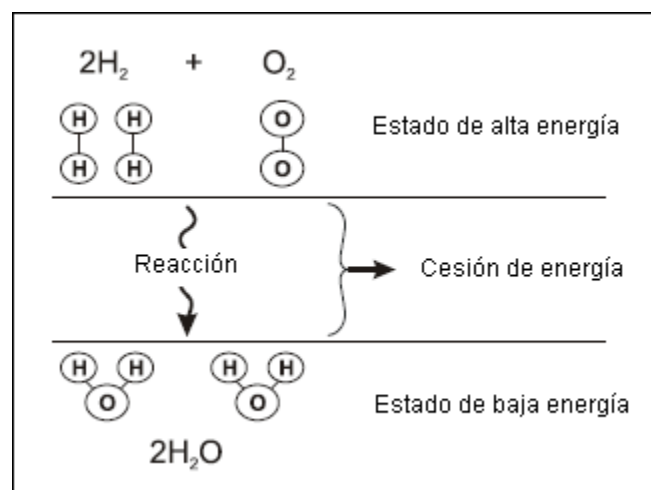
## 4.3. Propiedades químicas

### 4.3.1. Reactividad

La alta reactividad es una característica de todos los combustibles químicos. En cada caso, se produce una reacción química cuando las moléculas de combustible forman enlaces con el oxígeno que hay en el aire, de modo que al final, las moléculas que han reaccionado dispondrán de menor energía que cuando se encontraban en su estado inicial, sin reaccionar.

Cuando las moléculas reaccionan, el cambio producido en el estado de su energía va acompañado de una cesión de energía que podremos utilizar para producir trabajo útil.

Esta cesión de energía es análoga a lo que ocurre cuando el agua fluye de un alto nivel hasta un nivel inferior. Cuando se encuentra en el alto nivel dispone de una cierta energía potencial, que disminuye a medida que disminuye también el nivel del agua. Esta pérdida de energía potencial podrá ser aprovechada para realizar trabajo útil, por ejemplo, moviendo una turbina.



*Estados de la energía química*

Las reacciones químicas de este tipo, para que se produzcan, requieren a menudo una cierta cantidad de energía de activación.

Cuando se proporciona una cantidad pequeña de energía de activación a una mezcla de hidrógeno y oxígeno, por ejemplo en forma de chispa, las moléculas reaccionan de forma vigorosa, lanzando una cantidad considerable de calor, y obteniendo agua como producto final.

La formación de agua mediante la reacción de hidrógeno y oxígeno es reversible, es decir, que si disponemos de agua en un estado de baja energía, si aplicamos una cierta cantidad de energía podremos obtener hidrógeno y oxígeno. Éste





es el principio en el que se basa la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua.

En términos de reducción de la contaminación, el hidrógeno se convierte en un combustible casi ideal, ya que no contiene elementos carbonosos o sulfurosos, con lo que no se producirá CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> ni hollín durante su combustión.

#### 4.3.2. Energía

- ***Contenido en energía***

Todo combustible es capaz de liberar una cierta cantidad de combustible cuando reacciona con el oxígeno para formar agua. Esta cantidad de energía se mide experimentalmente y se cuantifica como el poder calorífico superior de un combustible (HHV; que son las siglas anglosajonas de *Higher Heating Value*), y como el poder calorífico inferior (LHV; *Low Heating Value*). La diferencia entre el HHV y el LHV es el “calor de la evaporación” y representa la cantidad de energía requerida para vaporizar un combustible líquido en un combustible gaseoso.

En el caso del hidrógeno, éste dispone de un HHV de 141,86 kJ/g (a una temperatura de 25°C y una presión de 1 atm.); y de un LHV de 119,93 kJ/g (en las mismas condiciones anteriores).

El hidrógeno dispone de la relación peso – energía más alta que cualquier combustible, al ser el elemento más ligero y ya que no dispone de ningún átomo de carbón pesado. Es por esta razón que el hidrógeno se ha utilizado extensivamente en los diferentes programas espaciales, donde el peso resulta un elemento crucial.

La cantidad de energía liberada durante la reacción del hidrógeno, es cerca de 2,5 veces el calor producido en la combustión de los hidrocarburos más comunes (gasolina, diesel, metano, propano, etc.)

- ***Densidad de la energía***

Mientras que el contenido en energía nos informa de la cantidad de energía que hay en un determinado peso de combustible, la densidad de energía nos informa de la cantidad de energía que hay en un cierto volumen de combustible. Así, la densidad de energía es el producto del contenido en energía (LHV) y de la densidad de un combustible determinado.

La densidad de la energía es en realidad una medida que nos informa sobre lo compactados que se encuentran los átomos de hidrógeno en un combustible.

La densidad de la energía del hidrógeno es bastante pobre (ya que este elemento dispone de una densidad muy baja), aunque su relación peso – energía es la mejor de todos los combustibles, precisamente al ser tan ligero.





A continuación se ofrece una tabla donde se compara la densidad de la energía de varios combustibles.

Combustible	Densidad de la energía (LHV)
Hidrógeno	10050 kJ/m <sup>3</sup> ; gas a 1 atm. y 15°C
	1825000 kJ/m <sup>3</sup> ; gas a 200 bar <sub>g</sub> y 15°C
	4500000 kJ/m <sup>3</sup> ; gas a 690 bar <sub>g</sub> y 15°C
	8491000 kJ/m <sup>3</sup> ; líquido
Metano	32560 kJ/m <sup>3</sup> ; gas a 1 atm. y 15°C
	6860300 kJ/m <sup>3</sup> ; gas a 200 bar <sub>g</sub> y 15°C
	20920400 kJ/m <sup>3</sup> ; líquido
Propano	86670 kJ/m <sup>3</sup> ; gas a 1 atm. y 15°C
	23488800 kJ/m <sup>3</sup> ; líquido
Gasolina	31150000 kJ/m <sup>3</sup> ; líquido
Diesel	31435800 kJ/m <sup>3</sup> ; líquido
Metanol	15800100 kJ/m <sup>3</sup> ; líquido

La densidad de la energía de un combustible variará si éste se almacena como un líquido o como un gas y, en el caso de almacenarse en estado gaseoso, influirá también a qué presión se ha efectuado.

#### 4.3.3. Inflamabilidad

Son necesarias tres cosas para que se produzca fuego o una explosión: combustible (hidrógeno, por ejemplo), comburente (oxígeno, mezclado con el combustible en cantidades apropiadas) y una fuente de ignición (generalmente una chispa).

- **Punto de inflamación (o “flashpoint”)**

Todos los combustibles queman únicamente cuando se encuentran en estado gaseoso o de vapor. Combustibles como el hidrógeno o el metano se encuentran ya en estado gaseoso en condiciones atmosféricas, mientras que otros combustibles, como la gasolina o el diesel, se encuentran en estado líquido, por lo que resulta necesario evaporarlos antes de quemarlos. La característica que describe la facilidad de evaporar los combustibles es su punto de inflamación o *flashpoint*. Éste se define como la temperatura mínima a la cual el combustible desprende vapores inflamables suficientes a la presión atmosférica, es decir, que arden al entrar en contacto con una fuente de ignición, pero sin propagarse la combustión a la masa líquida del combustible.

Si la temperatura del combustible se encuentra por debajo de su punto de inflamación, no será capaz de producir la cantidad suficiente de vapores para quemarse, puesto que su proceso de evaporación será demasiado lento. Siempre que un





combustible se encuentre en ó por encima de su punto de inflamación, los vapores que desprende estarán presentes.

No debe confundirse el punto de inflamación con la temperatura a la cual el combustible estalla en llamas, esto es la temperatura de auto ignición.

El punto de inflamación es siempre más bajo que el punto de ebullición del combustible. Para los combustibles que se encuentren en estado gaseoso en condiciones atmosféricas (como el hidrógeno, el metano y el propano), el punto de inflamación se encuentra muy por debajo de la temperatura ambiente y tiene poca importancia, puesto que el combustible ya se encuentra totalmente vaporizado.

El punto de inflamación es el momento más propicio para el peligro de incendio de los combustibles líquidos y su conocimiento es de suma importancia.

A continuación se ofrece una tabla en la que se muestra el punto de inflamación de algunos combustibles.

Combustible	Punto de inflamación
Hidrógeno	< - 253°C
Metano	- 188°C
Propano	- 104°C
Gasolina	Aproximadamente a - 43°C
Metanol	11°C

#### ▪ **Rango de inflamabilidad**

El rango de inflamabilidad de un gas se define como aquel rango comprendido entre los límites superior (UFL; *Upper Flammability Limit*) e inferior (LFL; *Lower Flammability Limit*) de inflamabilidad del mismo. El límite inferior de inflamabilidad de un gas es la mínima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga al ser mezclada con el aire y encendida, para seguir quemando. Por debajo del límite inferior de inflamabilidad no hay suficiente combustible como para permitir la combustión, la mezcla de aire/combustible es muy pobre.

El límite superior de inflamabilidad de un gas es la máxima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga después de haberse mezclado con el aire y haber sido encendida, para poder seguir quemando. Por encima de este límite, hay una deficiencia de oxígeno que no permite continuar la combustión, es decir, que ocurre lo contrario al caso anterior: la mezcla de aire/combustible es demasiado rica. Entre estos dos límites encontraremos la gama inflamable en la cual el gas y el aire disponen de unas proporciones correctas para permitir la combustión una vez se haya encendido.

Una mezcla estequiométrica ocurre cuando las moléculas del oxígeno y del hidrógeno están presentes en la cantidad necesaria exacta para completar la reacción de la combustión. Si hay más hidrógeno que oxígeno, la mezcla será rica, de modo que una parte del combustible no reaccionará mientras que todo el oxígeno será consumido. Si





lo que tenemos es menor cantidad de hidrógeno que de oxígeno, la mezcla será pobre, de manera que se consumirá todo el combustible pero no todo el oxígeno.

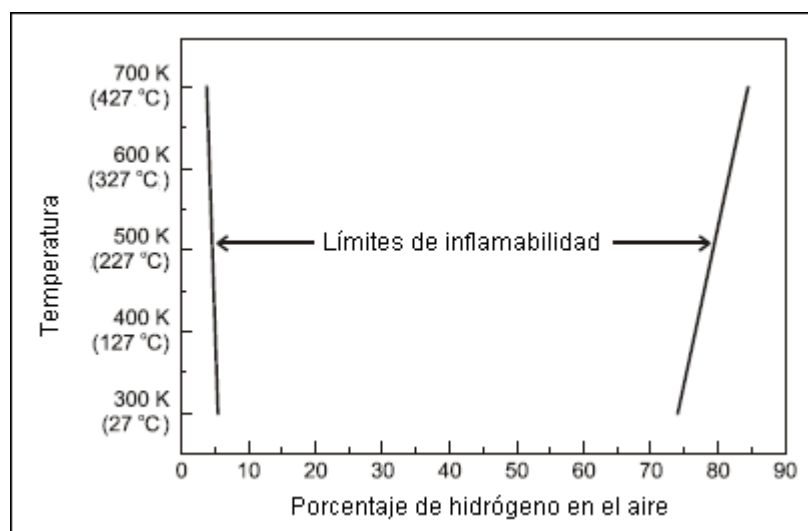
Una consecuencia del límite superior de inflamabilidad es que el hidrógeno almacenado (ya sea gaseoso o líquido) no será inflamable debido a la ausencia de oxígeno en los cilindros. El combustible únicamente será inflamable en la periferia de alguna fuga, donde la mezcla del combustible con el aire alcance las proporciones adecuadas.

Dos conceptos relacionados son el límite inferior explosivo (LEL; *Lower Explosive Level*) y el límite superior explosivo (UEL; *Upper Explosive Level*). Estos dos términos se usan frecuentemente junto con los límites superior e inferior de inflamabilidad, aunque no son exactamente lo mismo. Como ya se ha dicho anteriormente, el límite inferior de inflamabilidad de un gas es la mínima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga al ser mezclada con el aire y encendida, para seguir quemando. Parecido, el UEL es la máxima concentración de gas que ayudará a una explosión cuando entre en contacto con el aire y se encienda.

El hidrógeno es inflamable en una gama muy amplia de concentraciones en el aire (4% - 75%) y resulta explosivo sobre una también amplia gama de concentraciones (15% - 59%) en una temperatura atmosférica estándar. Tal y como se muestra en la siguiente figura, los límites de inflamabilidad aumentan con la temperatura. Como consecuencia, incluso las pequeñas fugas de hidrógeno corren el peligro de incendiarse o estallar. Si además nos encontramos en un recinto cerrado, la fuga de hidrógeno puede concentrarse, de tal modo que se aumenta el riesgo de combustión y explosión.

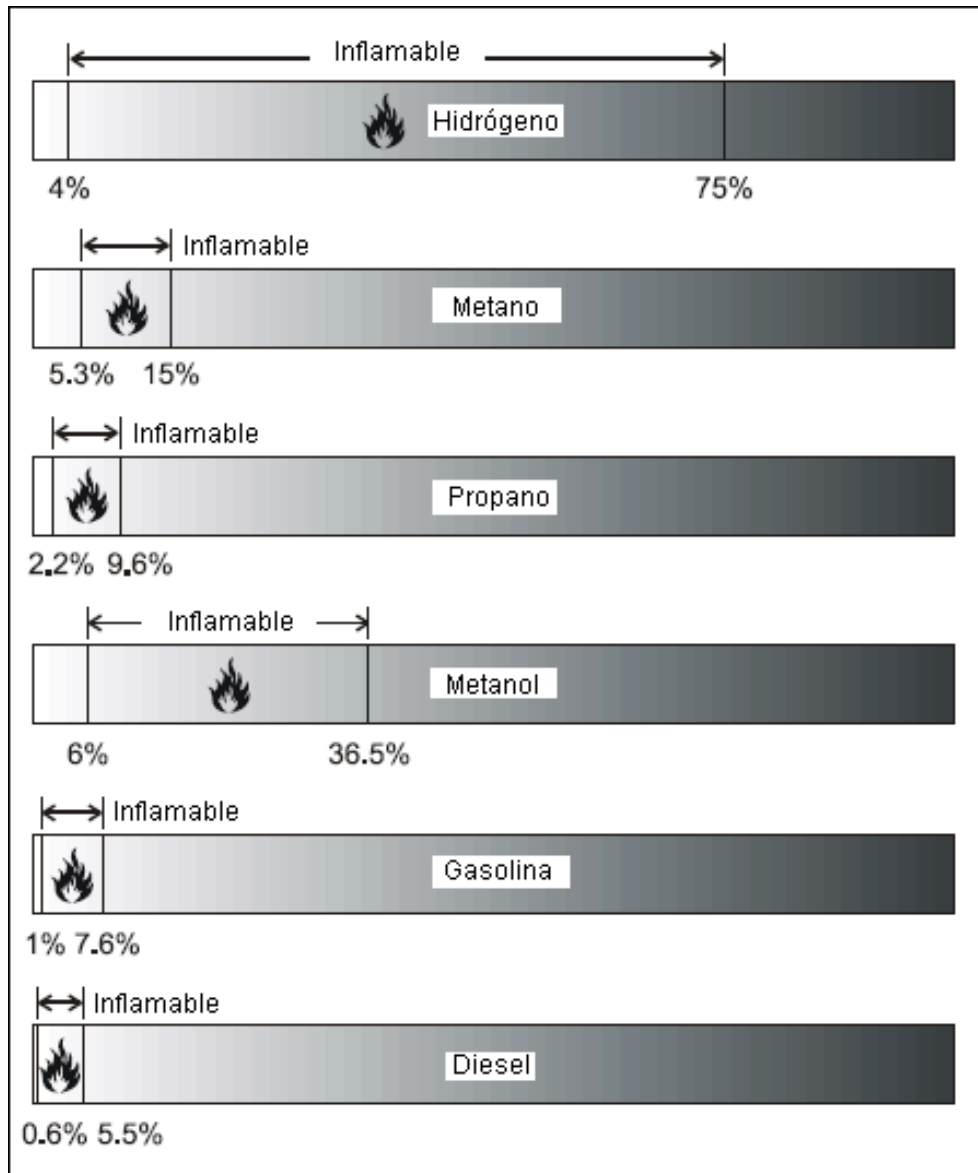


**¡Atención!** → Las mezclas de hidrógeno y aire resultan potencialmente inflamables y explosivas.



Variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno, en relación a la temperatura





*Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente*

- ***Temperatura de autoencendido***

La temperatura de autoencendido es la mínima temperatura necesaria para iniciar la combustión de una mezcla de combustible en ausencia de fuente de ignición. Dicho de otra manera, el combustible se calienta hasta que se inflama.

Para el hidrógeno, la temperatura de autoencendido es relativamente alta (unos 585°C). Esto hace que sea difícil prender una mezcla de aire/hidrógeno únicamente con calor, sin una fuente adicional de ignición (una chispa por ejemplo).





A continuación se ofrece una tabla en la que se muestra el valor de la temperatura de autoencendido de diversos combustibles.

Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	585°C
Metano	540°C
Propano	490°C
Metanol	385°C
Gasolina	Entre 230°C y 480°C

#### ▪ *Número de octano*

El número de octano describe las características antidetonantes de un combustible cuando se utiliza en un motor de combustión interna. Los golpeteos o picados son detonaciones secundarias, que ocurren después de la ignición del combustible debido a la acumulación de calor en ciertas zonas de la cámara de combustión. Cuando la temperatura local excede de la temperatura de autoencendido ocurren estos golpeteos.

El hidrógeno posee un elevado número de octano, con lo que es especialmente resistente a golpeteos, aún cuando se realizan combustiones con mezclas muy pobres.

A continuación se muestra una tabla con el número de octano de diferentes combustibles.

Combustible	Número de octano
Hidrógeno	130
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Diesel	30

#### ▪ *Energía de ignición*

La energía de ignición es la cantidad de energía externa que se debe aplicar para encender una mezcla de combustible. La energía de una fuente externa debe ser mayor que la temperatura de autoencendido y durar lo suficiente como para poder calentar el vapor del combustible hasta su temperatura de ignición. Las fuentes más comunes de ignición en motores de combustión interna son las bujías (chispas).

Aunque el hidrógeno tenga una temperatura más elevada de autoencendido que el metano, el propano o la gasolina, su energía de ignición de 0,02 mJ es mucho más baja y resulta por lo tanto más propenso a inflamarse. Incluso una chispa invisible o una descarga de electricidad estática procedente del cuerpo humano (en condiciones secas) pueden tener la suficiente energía como para provocar su ignición. No obstante, debe







tenerse en cuenta que la energía de ignición de todos estos combustibles es muy baja, con lo que las mismas condiciones que puedan prender a un combustible pueden servir para prender a cualquiera de los otros.

Además, el hidrógeno tiene la característica agregada de la baja electroconductividad, de modo que el flujo o la agitación del gas o líquido de hidrógeno puede generar cargas electrostáticas que pueden dar lugar a chispas. Por esta razón, el equipo que transporta el hidrógeno debe disponer de una toma de tierra.



**¡Atención!** → Las mezclas inflamables de hidrógeno y aire pueden ser encendidas fácilmente.

- ***Velocidad de quemado***

La velocidad de quemado es la velocidad a la cual la llama viaja a través de la mezcla del gas combustible.

La velocidad de quemado es diferente de la velocidad de llama. La velocidad de quemado indica la severidad de una explosión puesto que las altas velocidades de quemado tienen una mejor tendencia a apoyar la transición desde la deflagración hasta la detonación en largos túneles o tubos. La velocidad de llama es la suma de la velocidad de quemado y la velocidad de desplazamiento de la mezcla del gas que no haya sido quemada.

La velocidad de quemado varía con la concentración y gotas de gas a ambos extremos del rango de inflamabilidad. Tanto por debajo del límite inferior de inflamabilidad como por encima del límite superior de inflamabilidad, la velocidad de quemado es cero.

La velocidad de quemado del hidrógeno varía entre 2,65 m/s y 3,25 m/s. De este modo, una fuga de hidrógeno quemará rápidamente y, consecuentemente, su combustión tenderá a ser de breve duración.

- ***Distancia de apagado***

La distancia de apagado describe las propiedades de extinción de la llama de un combustible cuando éste se usa en un motor de combustión interna. Concretamente, la distancia de apagado se refiere a la distancia a la que se apaga la llama tomando como referencia la pared del cilindro, debido a las pérdidas de calor.

La distancia de apagado del hidrógeno es de 0,064 cm., aproximadamente 3 veces menos que la distancia de apagado de otros combustibles como la gasolina. De este modo, las llamas que produce el hidrógeno al quemarse circulan más cerca de la pared del cilindro antes de extinguirse, con lo que resultan más difíciles de apagar que las llamas que produce la gasolina. Esta menor distancia de apagado puede aumentar también la tendencia al petardeo, ya que la llama de una mezcla de aire/hidrógeno puede





pasar más fácilmente cerca de una válvula entreabierta que en el caso de la combustión de una mezcla de aire/hidrocarburo.

- ***Características de la llama***

Las llamas de hidrógeno presentan un color azul muy claro y resultan casi invisibles a la luz del día debido a la ausencia de hollín. La visibilidad es realzada por la presencia de humedad o impurezas (tales como sulfuro) en el aire. En cambio, las llamas de hidrógeno son fácilmente visibles en la oscuridad o bien con luz artificial. Una combustión de hidrógeno puede ser indirectamente visible al observar la emanación de una especie de “ondulaciones” y la radiación termal, especialmente en los grandes fuegos

En muchas ocasiones, las escobas de maíz son utilizadas por los equipos de emergencia para detectar llamas de hidrógeno, puesto que éstas son prácticamente invisibles a la luz diurna. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de lo expuesto anteriormente.



Los incendios de hidrógeno ocurrirán únicamente en aquellas zonas donde se haya producido una fuga y el hidrógeno se mezcle con el aire en las concentraciones suficientes.

En muchos aspectos, los incendios de hidrógeno resultan ser más seguros que los de gasolina. El gas de hidrógeno se eleva más rápidamente debido a sus altos valores de difusividad y flotabilidad. De esta manera, los incendios de hidrógeno son verticales y altamente localizados. Cuando el cilindro que contiene el hidrógeno en un automóvil alimentado con este combustible se rompe y se produce la ignición, el fuego arderá lejos del coche y su interior no alcanzará elevadas temperaturas.

En la página siguiente se ofrece una secuencia de imágenes donde se observa la diferencia de comportamiento del fuego en caso de producirse un incendio en un coche alimentado por hidrógeno (coche de la izquierda) y en otro alimentado por gasolina (coche de la derecha).





*Tiempo = 0 s*



*Tiempo = 3 s*



*Tiempo = 1 min*





El hidrógeno quemará de forma más intensa que la gasolina, pero durante un período de tiempo más corto. Además, mientras que de la combustión de la gasolina se generarán humos tóxicos, al quemarse el hidrógeno, éste no emitirá ningún tipo de elemento nocivo al ambiente.

#### 4.3.4. Fragilización por hidrógeno

La exposición constante al hidrógeno causa un fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno en muchos materiales. La fragilización por hidrógeno ha sido definida como la pérdida de resistencia y ductilidad inducida por el hidrógeno que puede derivar en la iniciación o propagación de fracturas mecánicas.

La fragilización por hidrógeno es especialmente devastadora debido a la naturaleza del fallo originado. Dicho fallo sucede a tensiones muy pequeñas (en comparación a las que serían necesarias en ausencia del hidrógeno), es bastante frágil y tiene un periodo de “incubación” tan variable que lo hace prácticamente impredecible.

Los mecanismos que causan los efectos de la fragilización por hidrógeno no están del todo bien definidos. Los factores conocidos que influyen en el índice y la severidad del fenómeno incluyen: la concentración de hidrógeno, su presión, temperatura, pureza, tipos de impurezas, composición del metal, nivel de fatiga, medida de grano, historia sobre su microestructura y tratamiento térmico. La existencia de humedad en el gas de hidrógeno puede conducir a la fragilización del metal debido a la formación de grietas como consecuencia de la fatiga.

El problema de la fragilización por hidrógeno afecta a los tres sistemas básicos de cualquier industria que emplee el hidrógeno:

- Producción.
- Transporte/Almacenamiento.
- Utilización.

La elección de los materiales para el confinamiento del hidrógeno para una aplicación específica dependerá de la fiabilidad y coste que requiera el sistema.

Las aleaciones que son capaces de resistir a la fragilización por hidrógeno son:

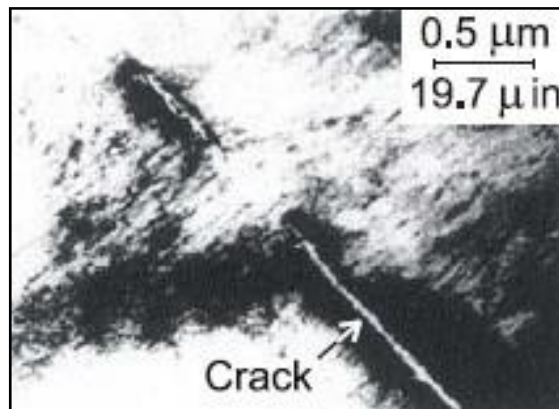
- Acero inoxidable (austenita)
- Aleaciones de cobre
- Aleaciones de aluminio





Por otro lado, las aleaciones que no se recomiendan utilizar con hidrógeno, por resultar poco resistentes a la fragilización son:

- Aleaciones de hierro (ferrita, martensita y bainita)
- Titanio y aleaciones de titanio
- Algunas aleaciones de níquel



*Ejemplo de fragilización por hidrógeno*





## 5. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Una vez hemos visto las propiedades del hidrógeno, lo conveniente ahora es saber de dónde lo conseguimos. El hidrógeno, a pesar de ser el elemento más abundante en el Universo, en la Tierra no lo encontramos en estado puro con facilidad, pues reacciona muy fácilmente con otros elementos.

Al contrario que el petróleo o el carbón, el hidrógeno no se trata de un recurso natural, y no podrá explotarse de la misma manera, sino que deberá generarse a partir de otros componentes químicos. Es por este motivo que el hidrógeno es considerado un portador secundario de energía, o lo que los expertos denominan como “vector energético”. La mayoría de compuestos orgánicos son una combinación de carbono e hidrógeno, como es el caso del gas natural (metano), las plantas y la biomasa en general.

El proceso de extraer hidrógeno a partir de combustibles fósiles se denomina **reformado de hidrocarburos**. En la actualidad, el reformado de hidrocarburos es el principal y menos costoso método que se utiliza para producir hidrógeno. Desafortunadamente, el reformado de hidrocarburos emite sustancias contaminantes y requiere el consumo de combustibles no renovables.

El proceso de extraer el hidrógeno del agua se denomina **electrólisis del agua**. En principio, el proceso de electrólisis del agua podría ser un proceso en el que no se emiten sustancias contaminantes al medio ambiente, además de renovable, pero tiene el inconveniente de que requiere grandes cantidades de energía eléctrica.

Una forma de determinar las consecuencias que tendrá para el medio ambiente obtener hidrógeno mediante electrólisis del agua o mediante el reformado de hidrocarburos, es comparando la cantidad total de dióxido de carbono emitido.

Existen también otros métodos alternativos de producción de hidrógeno, como:

- Descomposición termoquímica del agua.
- Fotoconversiones.
- Procedimientos biológicos.
- Producción a partir de biomasa.
- Procedimientos industriales.

Aunque algunos de estos métodos se presentan como una gran opción de cara al futuro, siguen siendo en gran parte experimentales y capaces de producir únicamente pequeñas cantidades de hidrógeno.

El hidrógeno puede producirse a gran escala en las plantas dedicadas a la producción de hidrógeno, o bien a pequeña escala en las instalaciones de producción locales. Las ventajas de la producción a gran escala es que las plantas productoras pueden situarse cerca de las fuentes de energía y de agua, pero sufren dificultades en





cuanto al transporte del hidrógeno. Algunos métodos de obtención de hidrógeno, como por ejemplo en la producción de biomasa, pueden realizarse únicamente a gran escala.

La producción a pequeña escala puede reducir los problemas referidos al transporte del producto, pero como desventaja, se tiene el hecho de que el equipamiento requerido para la cantidad de hidrógeno producida es perceptiblemente mayor que en el caso de las grandes instalaciones.

Actualmente, la obtención de la mayor parte del hidrógeno fabricado en todo el mundo origina en los combustibles fósiles, como subproducto en industrias químicas, o a partir de los procesos de refinado del petróleo crudo. La producción de hidrógeno a partir de energías renovables no es todavía factible a gran escala.

La producción de hidrógeno cuesta actualmente entre 3 y 15 veces más que producir gas natural; y entre 1,5 y 9 veces más que la gasolina, dependiendo del método utilizado.

## 5.1. Electrólisis del agua

En la electrólisis del agua, la electricidad se utiliza para descomponer el agua en sus componentes elementales: hidrógeno y oxígeno. La electrólisis del agua es considerada a menudo el método preferido para producir hidrógeno, ya que se trata del único proceso que no necesita basarse en los combustibles fósiles. Utilizando este método, además, obtendremos un producto final de alta pureza, y resulta factible tanto a escalas pequeñas como en grandes.

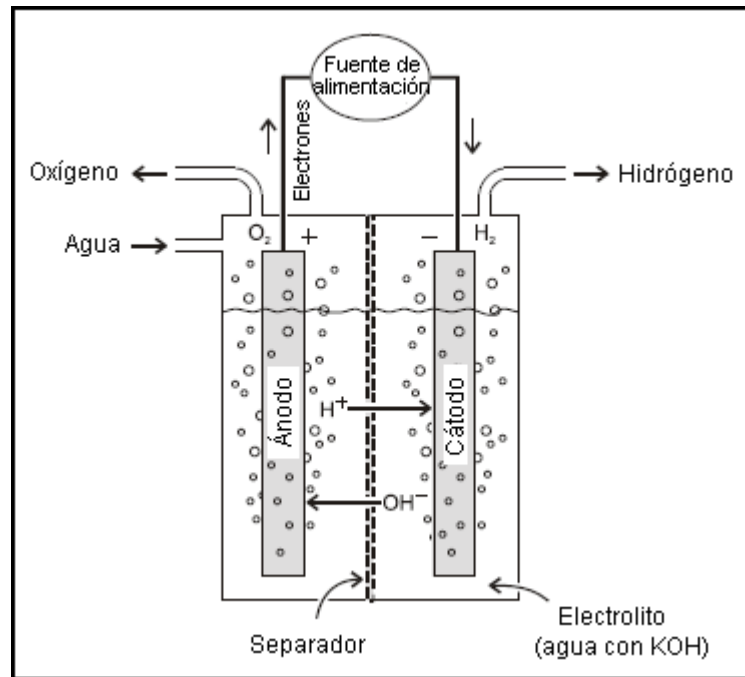
El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo la electrólisis del agua es una cuba electrolítica, que consta de una serie de células, cada una con un electrodo positivo y otro negativo. Los electrodos se sumergen en un electrolito (agua eléctricamente conductora, agregando los iones del hidrógeno, generalmente bajo la forma de hidróxido alcalino de potasio, KOH) para facilitar la migración de los iones.

El ánodo (electrodo positivo) es generalmente de níquel y cobre y está recubierto con óxidos de metales como manganeso, tungsteno y rutenio.

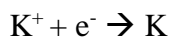
El cátodo (electrodo negativo) es generalmente de níquel, revestido con pequeñas cantidades de platino como catalizador. Sin el catalizador, el hidrógeno activo se acumularía en el electrodo y bloquearía el flujo.

El separador de gas o diafragma se utiliza para evitar que se mezclen el hidrógeno y el oxígeno, aunque permite el paso libre de iones. Está fabricado generalmente de un material basado en el asbesto y tiende a romperse cuando se somete a una temperatura a partir de 80°C.

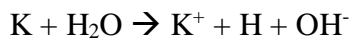


*Célula electrolítica*

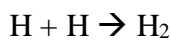
Las reacciones que se producen en el cátodo son:



Se reduce un ión de potasio cargado positivamente.



El ión reacciona con el agua para formar un átomo de hidrógeno y un ión de oxhidrilo.

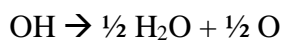


El altamente reactivo átomo de hidrógeno se adhiere al metal del cátodo y se combina con otro átomo de hidrógeno que también se haya adherido, para formar una molécula de hidrógeno, que se desprenderá del cátodo en forma de gas.

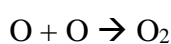
Las reacciones que se producen en el ánodo son:



Se oxida un ión de oxhidrilo cargado negativamente.



El ión reacciona formando agua y un átomo de oxígeno.



El átomo de oxígeno, que es altamente reactivo, se adhiere al metal del ánodo y se combina con otro átomo de oxígeno que también se ha adherido al metal, formando una molécula de oxígeno, que se desprende del metal del ánodo en forma de gas.







El índice de generación de hidrógeno se relaciona con la densidad de corriente (cantidad de corriente dividida por el área del electrodo, medida en amperios por área). Generalmente cuanto más alta es la densidad de corriente, mayor es el voltaje requerido de la fuente de alimentación, y por tanto mayor será el costo de energía por unidad de hidrógeno. No obstante, valores elevados de voltaje disminuyen el tamaño de la cuba electrolítica y por lo tanto dan lugar a un coste menor de la instalación. Las cubas electrolíticas avanzadas son fiables, con rendimientos energéticos entre 65% y 80% y funcionan con densidades de corriente en torno a 2000 A/m<sup>2</sup>.

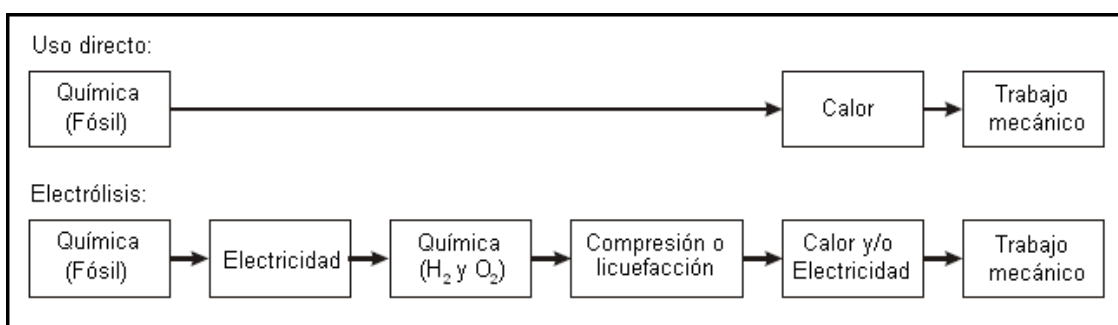
La cantidad de energía eléctrica requerida para la electrólisis del agua puede compensarse algo agregando energía térmica a la reacción. La cantidad mínima de voltaje requerida para descomponer el agua es de 1,23 V a 25°C. A este voltaje, la reacción requiere energía térmica del exterior para producirse. A 1,47 V y la misma temperatura que en el caso anterior, no se requiere ninguna cantidad de calor aportada.

El funcionamiento de la cuba electrolítica a tensiones bajas con calor agregado es más recomendable, puesto que la energía térmica es generalmente más barata que la electricidad, y se puede recircular dentro del proceso. Además, la eficiencia de la electrólisis aumenta a medida que se aumenta la temperatura de funcionamiento.

Para ser verdaderamente limpia, la corriente eléctrica almacenada durante la electrólisis debe derivar de fuentes no contaminantes renovables. Si la energía deriva del gas natural o del carbón, no habremos eliminado el problema de la contaminación. Además, cada transformación de la energía lleva asociada una pérdida de la misma. A parte, el coste de quemar los combustibles fósiles para generar electricidad para la electrólisis es de tres a cinco veces mayor que en el caso de reformado de hidrocarburos para obtener hidrógeno.

Las fuentes de energía renovables no contaminantes incluyen la hidroeléctrica, solar fotovoltaica, solar térmica y eólica. Estos métodos de generación de energía son aplicables únicamente en condiciones geográficas o climatológicas específicas. A pesar del crecimiento en el uso de estas fuentes de energía, proporcionan actualmente un porcentaje muy pequeño del total de energía generada.

No obstante, aunque una fuente de energía renovable conjuntamente con la electrólisis eliminaría por completo la dependencia de los combustibles fósiles, no se reduciría el número de transformaciones requeridas para producir trabajo mecánico usando hidrógeno.



*Procesos de transformación de energía basados en combustibles fósiles*





## 5.2. Reformado de hidrocarburos

El reformado es un proceso químico en el cual reacciona el hidrógeno contenido en algunos de los combustibles con la presencia de vapor, oxígeno o ambos en una corriente de gas rica en hidrógeno. Cuando el reformado se refiere a los combustibles sólidos, el proceso se llama gasificación. La mezcla rica en hidrógeno del gas resultante se llama reformado. El equipo encargado de producir el reformado se conoce como procesador del reformado o del combustible.

La composición específica del reformado depende del combustible fuente y del proceso utilizados, pero siempre contiene otros compuestos tales como nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y un pequeño porcentaje de combustible que no haya sido reformado. Cuando el hidrógeno se extrae del reformado, la mezcla restante de gas se llama refinado.

En esencia, el reformado de hidrocarburos consiste en los pasos siguientes:

- 1- Purificación de la materia base (incluyendo la eliminación de sulfuros).
- 2- Reformado del vapor u oxidación de la materia base para formar los óxidos de hidrógeno y del carbón.
- 3- Purificación primaria – conversión del monóxido de carbono a bióxido de carbono.
- 4- Reducción secundaria del monóxido de carbono.

Las ventajas del proceso de reformado de hidrocarburos para producir hidrógeno son:

- Pueden aprovecharse las actuales infraestructuras de carburantes.
- Reduce la necesidad de transportar y almacenar el hidrógeno.
- No necesita la ayuda de grandes energías externas como en el caso de la electrólisis.
- Resulta menos costoso que otros métodos de producción de hidrógeno.

Los inconvenientes de los reformadores son:

- Pueden tener tiempos de calentamiento relativamente elevados.
- Son de difícil aplicación al motor de un vehículo debido a la demanda irregular de energía (respuesta transitoria).
- Complejos, grandes y costosos.





- Introduce pérdidas adicionales en el proceso de la conversión de energía, especialmente en los que tengan una masa térmica reducida.
- Es necesario basar su funcionamiento en combustibles fósiles no renovables.
- Genera contaminación.

La contaminación generada por los reformadores puede ser de tres tipos:

- Emisiones de dióxido de carbono.
- Reacciones incompletas, dejando monóxido de carbono y algo de combustible en el reformado.
- Producción de agentes contaminantes con la combustión, tales como óxidos nitrosos.

### 5.2.1. Combustibles potencialmente reformables

Teóricamente, cualquier hidrocarburo o alcohol puede servir como materia base al proceso de reformado. Naturalmente, los combustibles con infraestructuras de distribución existentes son los de uso más extendido.

#### ▪ *Metano (Gas natural)*

El gas natural dispone de una ya establecida infraestructura y es el combustible base más económico para el reformado. El gas natural tiene unos niveles de compuestos sulfurosos muy bajos, que deberán ser eliminados de todas formas, purificando el combustible antes de someterlo al reformado.

#### ▪ *Metanol*

El metanol se encuentra fácilmente disponible y puede ser reformado a temperaturas relativamente bajas (entre 200°C y 300°C). Sin embargo, sus contenidos en energía y densidad de energía son más bajos que en el caso de los hidrocarburos líquidos.

#### ▪ *Gasolina y Diesel*

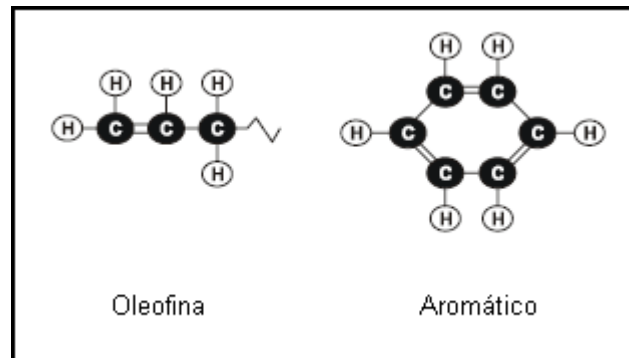
La gasolina y el diesel disponen de un gran número de infraestructuras establecidas pero disponen de un cociente hidrógeno – a – carbono menor que otras materias base. Esto tiene como consecuencia una menor producción de hidrógeno en relación a la cantidad de gas desechable. Por lo general, los hidrocarburos más pesados





contienen además sulfuro atrapado en largas cadenas y compuestos cíclicos que generalmente requieren presiones más elevadas para ser eliminados (de 6 a 45 bar<sub>g</sub>).

Además, los productos petrolíferos incluyen compuestos llamados oleofinas y compuestos aromáticos resultantes de los procesos de refinación. Las oleofinas resultan altamente reactivas y tienden a formar gomas de polímero y carbón. Los compuestos aromáticos son muy estables y difíciles de reformar y pueden formar carbones. Las formaciones de gomas y carbón pueden bloquear zonas activas del catalizador y su formación depende en gran medida de la temperatura del proceso. La presencia de compuestos sulfurosos, oleofinas y compuestos aromáticos, requiere la purificación del combustible antes de su reformado.



- **Carbón**

El carbón tiene un potencial enorme como fuente de suministro, pero sufre de los altos niveles de impurezas y baja producción de hidrógeno. Actualmente el reformado de carbón es el proceso más costoso.

### 5.2.2. Tipos de reformadores

Existen tres tipos básicos de reformadores: reformadores por vapor, reformadores por oxidación parcial y reformadores por descomposición térmica. Podemos encontrar también un cuarto tipo de reformador, que se obtiene a partir de la combinación de los reactores de oxidación parcial y de los reformadores de vapor en un único reactor, este tipo se denomina reformador autotérmico.

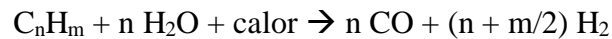
- **Reformadores de vapor**

Los reformadores de vapor son actualmente los más eficientes, económicos y la técnica más ampliamente utilizada para la producción de hidrógeno. El reformado mediante vapor se basa en el principio de que el contenido en hidrógeno de los combustibles se descompone ante la presencia del vapor excedente en catalizadores níquelosos para producir una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono.

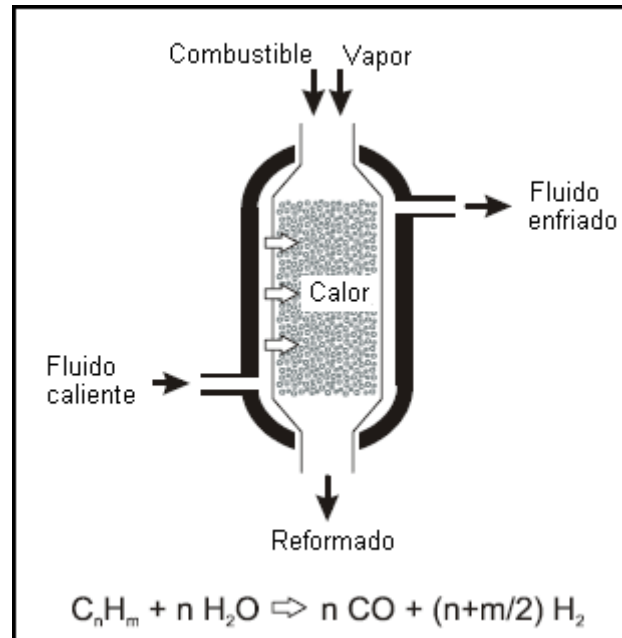




La reacción total para los hidrocarburos genéricos es:



A continuación se muestra una figura donde se ilustra esquemáticamente el proceso de reformado mediante vapor.



Los productos obtenidos a la salida del reformador, en ocasiones pueden contener restos de combustible y de agua que no hayan reaccionado. Además, únicamente los hidrocarburos ligeros pueden ser totalmente vaporizados sin dejar ningún tipo de residuo carbonoso. El monóxido de carbono deberá convertirse en dióxido de carbono utilizando procesos suplementarios.

Una gran ventaja del reformado mediante vapor es que el hidrógeno presente en el agua será desprendido durante la reacción, con lo que contribuirá a la producción total de hidrógeno.

El proceso de reformado mediante vapor requiere temperaturas de entre 450°C y 925°C, y presiones entre 20 y 35 bar<sub>g</sub>. Estas temperaturas de la llama son demasiado pequeñas para formar óxidos nitrosos, que se comienzan a formar a temperaturas en torno a los 1480°C.

Puesto que la reacción en el reformado con vapor es endotérmica (se utiliza calor), una gran parte de la energía puede ser recuperada e introducida de nuevo en el proceso. La cantidad de energía térmica que podremos recuperar nos determinará la eficacia térmica del reformador, que puede llegar hasta el 85%. Y es precisamente esta alta eficacia térmica la principal característica que determina a un reformador de vapor.

La eficiencia térmica de los reformadores de vapor puede llegar hasta el 90% en los casos en que el combustible a reformar sea metanol. Esto es debido a que la reacción





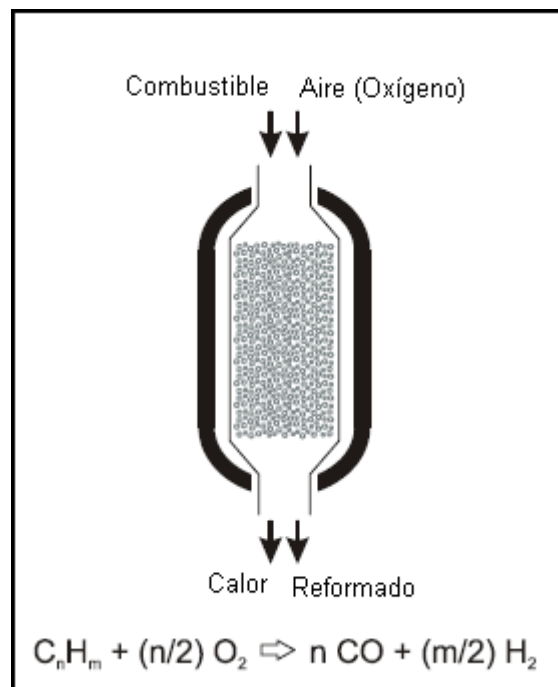
de la descomposición ocurre a temperaturas mucho más bajas (entre 200 y 300°C), y por consiguiente disminuyendo las pérdidas por calor.

▪ **Reformadores de oxidación parcial. Oxidación parcial de hidrocarburos**

Los reformadores de oxidación parcial (o reformadores POX; *Partial Oxidation Reformers*) hacen reaccionar una mezcla pobre de oxígeno (aire) con el combustible para producir una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. La reacción total para los hidrocarburos genéricos es:



El proceso de la oxidación parcial se muestra de forma esquemática en la siguiente figura.



Puesto que los reformadores de oxidación parcial utilizan el oxígeno del aire, el nitrógeno circula a través del reactor junto con los productos de la reacción, de tal modo que diluye la corriente de combustible. Los productos obtenidos a la salida también pueden contener en ocasiones una cierta cantidad de combustible que no haya reaccionado. El monóxido de carbono se debe convertir en bióxido de carbono utilizando unos procesos suplementarios.

Al contrario que los reformadores mediante vapor, los reformadores de oxidación parcial se usan normalmente para reformar hidrocarburos más pesados, tales como gasolina, diesel o aceite pesado. Una variante de la oxidación parcial se usa para gasificar el carbón, aunque la presencia de sulfuro y las grandes cantidades de cenizas, que deben ser eliminadas, complican el proceso. Este tipo de procesos no utilizan catalizadores, y se producen a temperaturas de entre 1150°C y 1315°C, a presiones del





orden de 60 bar<sub>g</sub>. Hidrocarburos más ligeros como el metano pueden oxidarse parcialmente usando catalizadores a temperaturas de unos 590°C.

Los reformadores de oxidación parcial presentan una serie de ventajas y desventajas comparándolos con los reformadores mediante vapor. Las principales desventajas que presentan los reformadores de oxidación parcial son las altas temperaturas y presiones de funcionamiento, una eficacia térmica menor y una menor producción de hidrógeno.

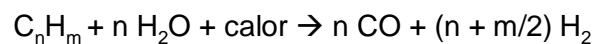
La menor eficacia térmica es debida sobretodo al hecho de que el proceso de la oxidación es exotérmico (cede calor). Esto significa que una parte significativa de la energía que entra acaba transformándose en calor. La menor producción tiene su explicación en el hecho de que el hidrógeno adicional no es agregado a la reacción bajo la forma de agua.

Los reactores exotérmicos de oxidación parcial de hidrocarburos hacen frente siempre a una desventaja total en lo que se refiere a eficacia entre el 5% y el 10% comparándolos con los reformadores endotérmicos de vapor.

Una de las principales ventajas de este tipo de reformadores es que, debido a que la oxidación parcial es una reacción exotérmica no hace falta utilizar quemadores para mantenerla.

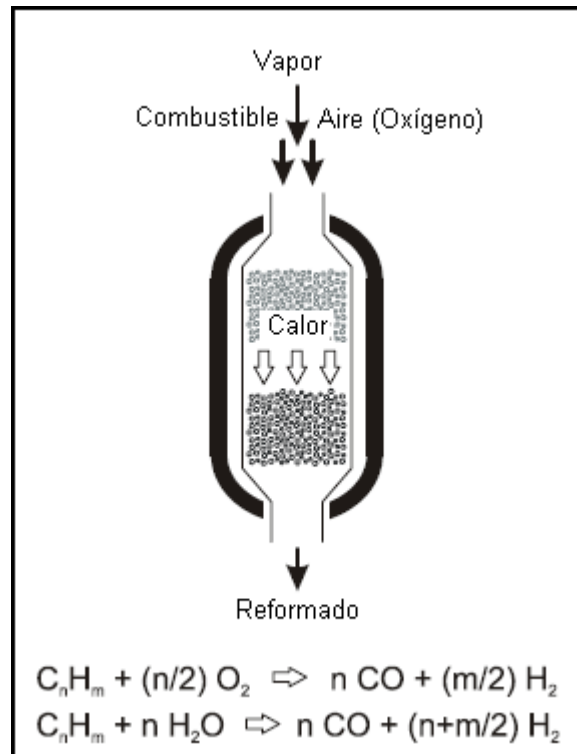
- **Reformadores autotérmicos**

Los reformadores autotérmicos tratan de combinar la compacticidad y capacidad de carga de los reformadores de oxidación parcial con la eficiencia de los reformadores por vapor, combinando ambos tipos en una sola unidad. Las reacciones que se producen para los hidrocarburos genéricos son:



En la figura de la página siguiente se puede observar el proceso autotérmico de manera esquemática:





En un reformador autotérmico el combustible, el vapor y el oxígeno se alimentan de forma conjunta a un catalizador que admita tanto reacciones de oxidación parcial como de reformado por vapor. El calor generado por la reacción de oxidación parcial proporciona el calor necesario para el reformado por vapor, eliminando así la necesidad de disponer de una fuente externa de calor.

Mientras que este tipo de reformadores superan algunas de las limitaciones en la eficiencia de los reformadores por oxidación parcial, siguen teniendo eficiencias menores que en el caso de los reformadores por vapor. Además, los reformadores autotérmicos son los menos desarrollados de todos los sistemas de reformado y requieren todavía un gran avance en ingeniería para convertirse en prácticos.

- **Reformadores por descomposición térmica**

Los reformadores por descomposición térmica (o *crackers* catalíticos) utilizan el calor para “romper”, descomponer el combustible, produciendo hidrógeno de elevada pureza (>95%) y carbón sólido.

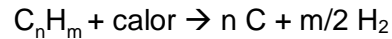
No obstante, la eficiencia térmica de este sistema de reformado es la más baja de todos los que se han explicado hasta ahora, ya que una gran parte de la energía del combustible primario queda atrapada en los productos carbonosos (en las formas de monóxido y dióxido de carbono). Se podría mejorar la eficiencia térmica si se quemaran los productos carbonosos para generar calor, pero aumentarían las emisiones de óxidos nitrosos y se elevaría la complejidad de la instalación.



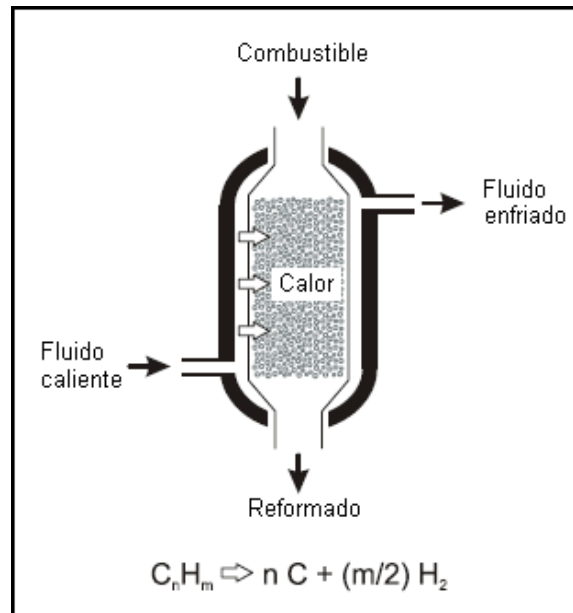




La reacción total para los hidrocarburos genéricos es:



En la siguiente figura se muestra de forma esquemática el proceso de reformado por descomposición térmica.



### 5.2.3. Purificación del reformado

Los reformadores por vapor, por oxidación parcial y autotérmicos convierten todo el carbón que contiene el combustible fuente (primario) en monóxido de carbono. Dependiendo de la materia base, el reformado puede incluir compuestos sulfurosos, metanol líquido u otros contaminantes.

La purificación del reformado es un proceso que se divide en dos etapas. En la primera etapa la mayor parte del monóxido de carbono es convertido en dióxido de carbono usando una reacción de cambio agua/gas. En la segunda etapa, el monóxido de carbono se reduce más a fondo usando reacciones de oxidación selectiva o de metanaje, o bien el hidrógeno es extraído del gas resultante usando un sistema de membranas separadoras (PSA, *Pressure Swing Adsorption*).



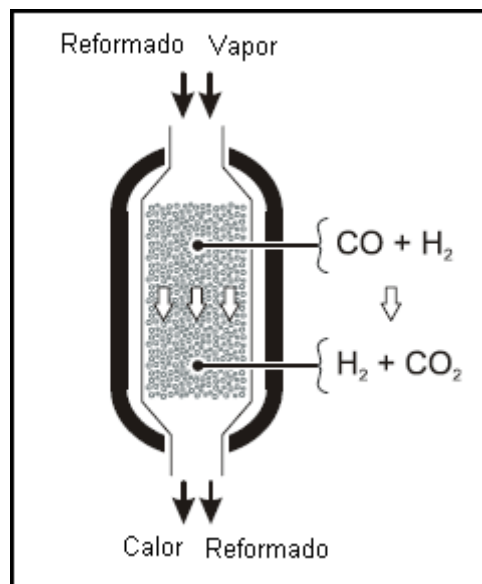


### ▪ *Reacción de cambio agua/gas*

La reacción de cambio agua/gas hace reaccionar el monóxido de carbono con vapor en un catalizador para producir una mezcla de dióxido de carbono y de hidrógeno. La reacción total es la siguiente:



En la siguiente imagen se ilustra el proceso, de forma esquemática, de la reacción de cambio agua/gas.



La reacción de cambio agua/gas se puede realizar utilizando catalizadores de altas temperaturas, produciéndose la reacción a los 300°C aproximadamente; o bien utilizando catalizadores de baja temperatura, realizándose a 150°C aproximadamente.

La reacción de cambio agua/gas es un proceso exotérmico; éste calor puede recuperarse y utilizarlo en otras partes del proceso de reformado y mejorar así la eficiencia térmica total. Algunos catalizadores usados en la reacción de cambio pueden oxidar de manera exotérmica cuando se exponen al aire. Esto puede dar lugar a temperaturas elevadas, con lo que puede plantear un riesgo de incendio y/o dañar el catalizador.

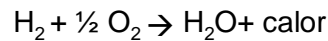
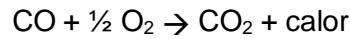
El método de la reacción de cambio agua/gas resulta eficiente para eliminar la mayor parte del monóxido de carbono del gas resultante del reformado. El monóxido de carbono se encuentra presente en el producto final en proporciones de entre el 15% y el 60%, dependiendo del combustible base utilizado. Con la reacción de cambio agua/gas pueden reducirse estos valores hasta niveles inferiores al 1%.



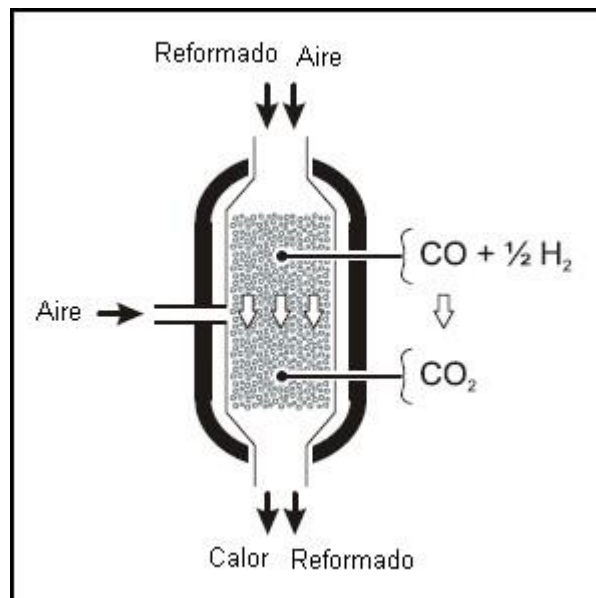


### ▪ Oxidación selectiva

La oxidación selectiva, o “selox” (abreviatura del inglés *selective oxidation*) es un proceso químico en el que se hace reaccionar el monóxido de carbono con el oxígeno (aire) en un catalizador para producir dióxido de carbono. Con el catalizador se consiguen las siguientes reacciones:



El proceso de oxidación selectiva se muestra de forma esquemática en la siguiente imagen.



Las temperaturas demasiado elevadas favorecen la reacción de producción de agua mientras que las temperaturas demasiado bajas dan lugar a condensaciones.

La reacción de oxidación selectiva es un proceso exotérmico; éste calor puede recuperarse y utilizarse en otras partes del proceso de reformado y mejorar así la eficiencia térmica total del proceso.

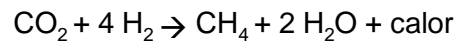
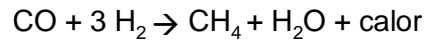
El método de oxidación selectiva es el más compacto de todos los métodos de purificación vistos hasta ahora, y es capaz de reducir el contenido de monóxido de carbono hasta niveles tan bajos como entre 5 y 10 ppm. El principal inconveniente de los oxidantes selectivos es que requieren complejos sistemas de control, especialmente para mantener unos niveles de emisión de monóxido de carbono bajos.



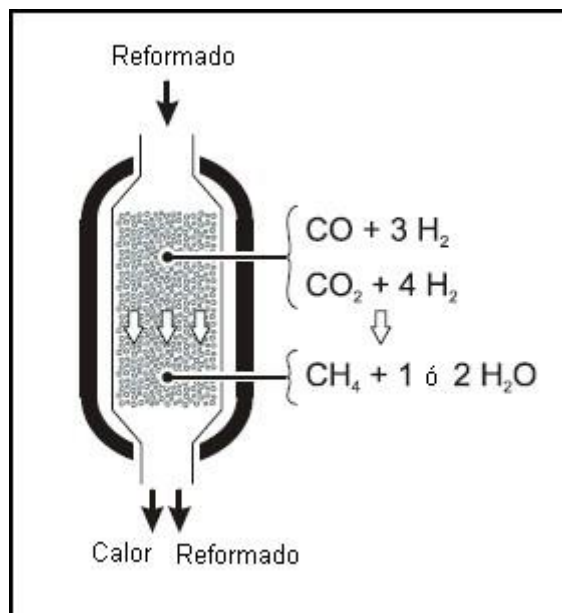


### ▪ *Metanaje*

El metanaje es un proceso químico en el que se hace reaccionar el monóxido de carbono y el dióxido de carbono con hidrógeno para producir metano y agua. Las reacciones que se producen durante el metanaje son:



El proceso del metanaje se ilustra de forma esquemática en la siguiente figura.



Las reacciones ocurridas durante el metanaje son las contrarias a las que ocurren durante el reformado por vapor del metano, con lo que están invirtiendo la producción de hidrógeno lograda inicialmente.

Si este proceso se realizara directamente en el reformado obtenido, virtualmente todo el hidrógeno producido sería consumido, no produciendo consumo neto. No obstante, si el dióxido de carbono se elimina antes del metanaje usando otros medios (como por ejemplo un sistema PSA), el monóxido de carbono restante se podría reducir con éxito hasta niveles muy bajos, y la pérdida en la producción total de hidrógeno sería muy pequeña.





### ▪ **Adsorción por oscilación de presión**

La adsorción por oscilación de presión (ó PSA) es un método industrial utilizado comúnmente para separar una mezcla de gases en sus varios componentes. Esta tecnología se ha usado extensivamente en combinación con los reformadores por vapor para extraer hidrógeno a escalas industriales. La pureza que se puede alcanzar con este sistema es muy elevada (99,99%) mientras que recupera hasta el 85% del hidrógeno disponible.

En el “corazón” del proceso de la adsorción por oscilación de presión, encontramos unos materiales llamados zeolitas. Una zeolita es un mineral con una superficie cristalina muy estructurada que atrae las moléculas de gas hasta su superficie y las retiene mediante la adsorción física (*adsorber* significa “fijarse a la superficie de”). Esto es diferente de *absorber*, que significa “penetrar en la superficie de”).

Existen diferentes tipos de zeolitas fabricadas comercialmente, cada una de ellas capaces de adsorber selectivamente una serie de gases o grupos de gases específicos. Se puede por tanto combinar zeolitas para formar “tamices moleculares” capaces de adsorber los gases que se deseen desechar mientras que dejan pasar al resto de gases. Los dispositivos de adsorción por oscilación de presión se construyen normalmente para separar el oxígeno del aire de la misma manera en que el hidrógeno se separa del combustible.

La adsorción física implica unas fuerzas de Van der Waals y electrostáticas relativamente débiles. Estos enlaces se rompen fácilmente cuando se someten a variaciones de flujo y de presión. Este principio se utiliza para limpiar los gases no deseados que hayan quedado atrapados en las zeolitas una vez se haya extraído el producto purificado.

El proceso de la adsorción por oscilación de presión implica cuatro fases primarias que, de manera conjunta, forman un ciclo completo.

Durante la primera fase, o fase de “presurización del suministro”, el gas del reformado se introduce en el área de la zeolita a presión elevada.

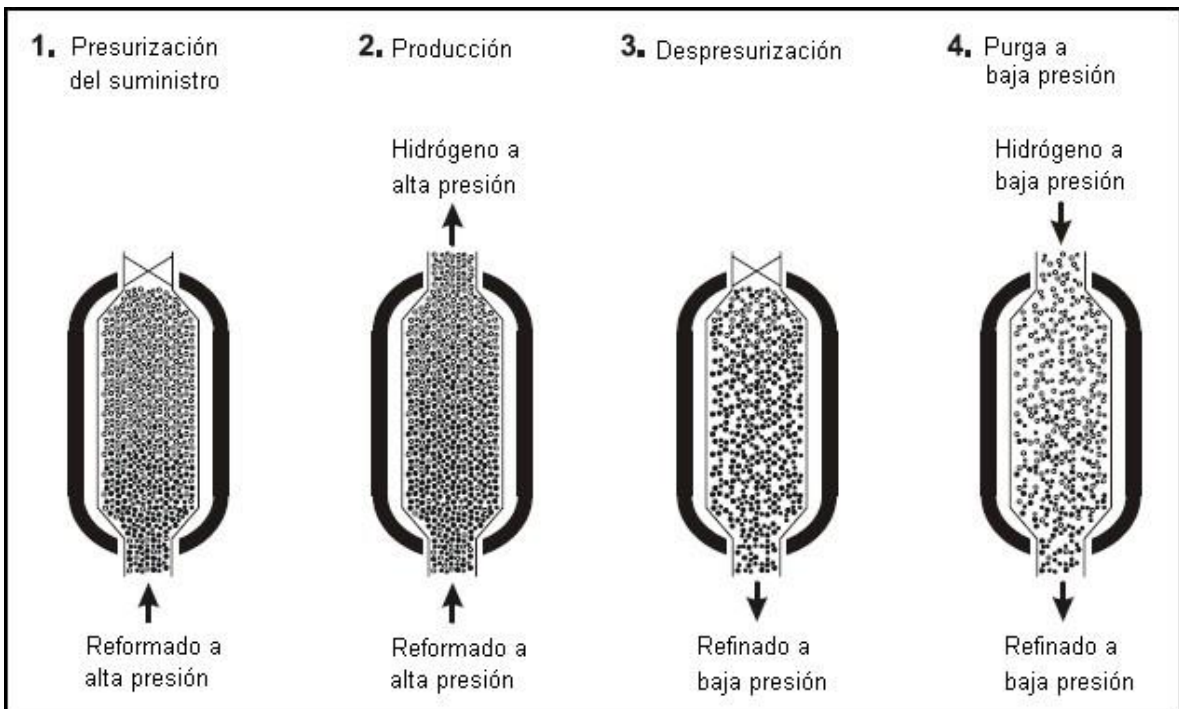
Durante la segunda fase, o fase de “producción” los gases no deseados son retenidos mediante adsorción por las zeolitas mientras que el hidrógeno purificado se va concentrando y es extraído. En la tercera fase, o fase de “descompresión”, se disminuye la presión y algunos de los gases no deseados se expelen.

Durante la última fase, o fase de “purga a baja presión”, una parte del gas de hidrógeno puro retorna hacia el dispositivo a baja presión para purgar los restos de gases no deseados.





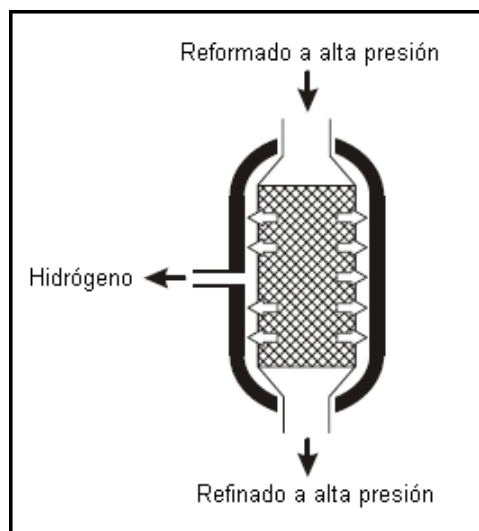
En la figura siguiente se muestra el proceso de adsorción por oscilación de presión de manera esquemática:



▪ **Membranas separadoras de metal**

Las membranas separadoras de metal se presentan como una barrera física impermeable a todos los gases excepto al hidrógeno.

Para funcionar, el reformado debe ser introducido en la membrana a través de un gradiente de presión. Hasta el 85% del hidrógeno pasa de encontrarse en un estado de presión elevada (20 bar<sub>g</sub>) a un estado de menor presión (2 bar<sub>g</sub>) y muy elevada pureza (>99,999%). El proceso se ilustra de forma esquemática en la siguiente imagen.





La principal ventaja de utilizar membranas separadoras de metal es que proporcionan hidrógeno de una elevada pureza, como ya se ha comentado anteriormente.

El principal inconveniente de utilizar este sistema es que los costes del material y de su construcción son muy elevados.

### 5.3. Descomposición termoquímica del agua

En la descomposición termoquímica del agua, el calor se usa únicamente para descomponer el agua. Se trata de un procedimiento similar al de la electrólisis, con la diferencia de que toda la energía agregada es en forma de calor y no en forma de electricidad. La eficiencia máxima teórica para este procedimiento está cerca del 50%.

El agua se descompone directamente cuando se somete a elevadísimas temperaturas (unos 2500°C), lo cual resulta un valor demasiado elevado para ser práctico.

No obstante, los reactivos químicos se utilizan para descomponer el agua mediante varias reacciones siguiendo la secuencia siguiente:

- Producción de oxígeno.
- Producción de hidrógeno
- Regeneración de los materiales.

Estas reacciones toman la siguiente forma genérica:



En esencia, se trata de una reacción de oxidación – reducción donde A y B son compuestos químicos que normalmente contienen hierro, oxígeno y clorina. El proceso tiene lugar a aproximadamente 700°C.





La selección de compuestos específicos para la serie de reacciones depende de los siguientes factores:

- Cantidad de energía necesaria para cada paso.
- Estabilidad de los reactivos en cada paso.
- Capacidad de que cada producto de una secuencia, sea fácilmente reaccionado en la siguiente.
- Tiempo de reacción.
- Cantidad de reacción.
- Temperatura individual de cada reacción.
- Requerimientos de presión y flujo.
- Número de pasos.
- Composición de los residuos.

Además, como en cualquier otro proceso químico, la recuperación del calor, la transferencia de masa y los materiales afectan al diseño de la totalidad del sistema.

La descomposición termoquímica del agua, como en la electrólisis, será tan limpia medioambientalmente y renovable como su fuente de energía. Si el calor no aprovechable se utiliza en otros procesos, el hidrógeno resultante aumentará la eficacia total del proceso de generación de calor primario. Si el calor se obtiene mediante la combustión de combustibles fósiles, el hidrógeno resultante habrá generado probablemente más contaminación que la que se hubiese generado quemando directamente el combustible fuente.

## 5.4. Foelectrólisis

La foeelectrólisis es un proceso de electrólisis en el que la electricidad necesaria para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno es generada directamente usando energía solar.

El agua no puede absorber la energía solar directamente, ya que resulta transparente para las longitudes de onda requeridas.

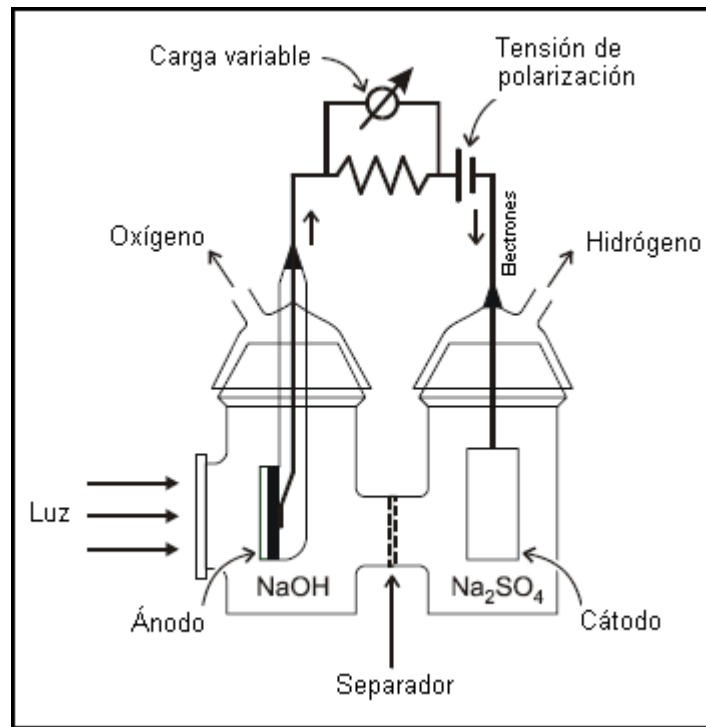
El proceso más común utiliza una serie de células, cada una de ellas con un par de foeelectrodos semiconductores sumergidos en un electrolito acuoso y separados por una membrana que permite la transferencia de iones pero evita la mezcla de gases. El







cátodo, está realizado con un material semiconductor con un exceso de protones, mientras que el ánodo se realiza de un material semiconductor con un exceso de electrones.



*Célula semiconductor de fotoelectrólisis*

Cuando el ánodo recibe la radiación solar, los electrones absorben la energía luminosa y la hacen pasar a través de un circuito externo al cátodo. Esto crea un par de “huecos de electrones”. El hueco positivo reacciona posteriormente con el agua para crear los iones de hidrógeno positivos y oxígeno gaseoso. Los iones de hidrógeno pasan a través de la membrana para recombinarse con los electrones en el cátodo, dando como resultado gas de hidrógeno.

Este tipo de sistema alcanza eficacias máximas de entre el 8% y el 12%.

#### 5.4.1. Producción fotobiológica

También se puede producir hidrógeno mediante la energía luminosa con procesos fotobiológicos, usando sistemas biológicos tales como algas verdes, cianobacterias. Estos procesos tienen una eficacia muy reducida, generalmente inferior al 1%.





## 5.5. Producción a partir de biomasa

El hidrógeno también se puede producir a partir de la descomposición de la biomasa. Es el combustible energético que se obtiene directa o indirectamente a partir de recursos biológicos.

El interés por producir hidrógeno a partir de la biomasa resulta obvio si tenemos en cuenta la abundancia de materiales de desecho y su consecuente potencial de proveer grandes cantidades de hidrógeno.

La producción de hidrógeno con biomasa compite con la producción de biocombustibles que resultan más sencillos de introducir en el mercado. En este sentido el uso de biomasa resulta atractivo combinado con la captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, pues en este caso resultan unas emisiones de CO<sub>2</sub> negativas.

Utilizando la biomasa como fuente de producción de hidrógeno, éste se puede producir por dos procedimientos: gasificación de la biomasa o pirolisis.

A continuación recordamos dichos procedimientos, ya descritos en el capítulo de energías renovables.

### 5.5.1. Gasificación de la biomasa

Se trata de someter a la biomasa a un proceso de combustión incompleta a temperaturas entre los 700°C y los 1200°C. El producto resultante es un gas combustible compuesto fundamentalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono.

El contenido en hidrógeno en el gas resultante vendrá determinado por las temperaturas y presiones del proceso, y puede llegar a constituir hasta un 20% del total de la mezcla.

### 5.5.2. Pirolisis

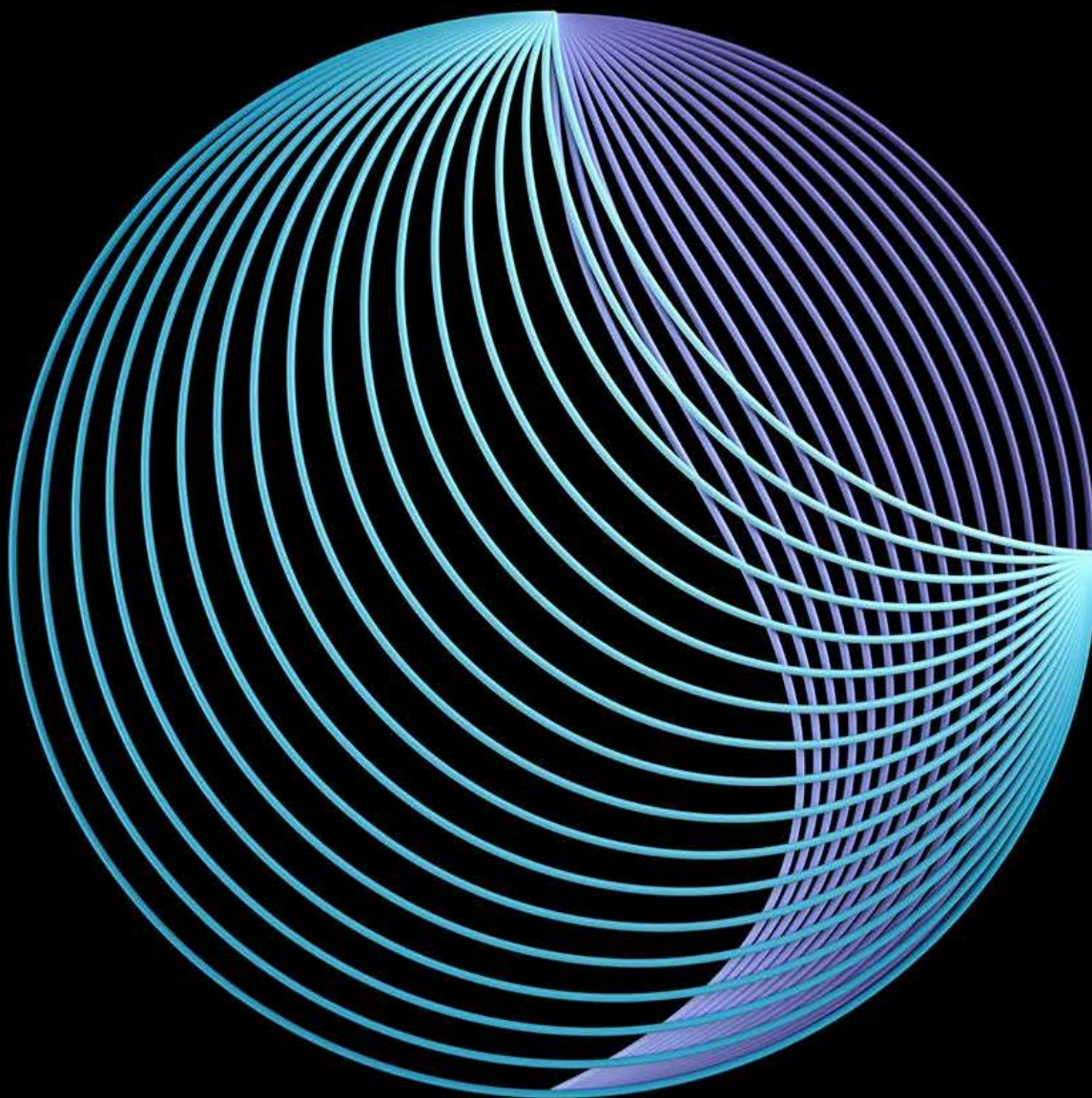
Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500°C. De esta combustión se obtiene carbón vegetal y una mezcla de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.

## 5.6. Procesos industriales

Por último, el hidrógeno puede obtenerse también como subproducto de algunos procesos industriales convencionales. El hidrógeno es:

- Un subproducto de la producción de clorina y de policloruro de vinilo.





**Fueling the Future of Mobility**  
Hydrogen and fuel cell solutions for  
transportation

Volume 1  
Deloitte China

Financial Advisory



# Executive summary

*Jointly written and published by Deloitte and Ballard, this white paper seeks to introduce the wondrous technology of fuel cell vehicles, as well as their commercial applications. Through in depth research and analysis, this paper provides answers to the most pertinent questions from industry executives and laypeople alike - how economically viable are fuel cell vehicles, and what is their impact on the environment?*

Hydrogen is the single most abundant substance in the universe. Perhaps due to this abundance, we sometimes forget how useful hydrogen is. From being used in the very first internal combustion engines as an inflammable fuel, to powering flight by airships, hydrogen has once again taken center stage in mankind's quest for energy sources, in the form of fuel cell applications.

In this three-part series, we take a comprehensive look at hydrogen and its role to power the future of mobility. This first paper focuses on an introduction of hydrogen and fuel cell technology, as well as a deep dive into a total cost of ownership view of fuel cell, battery-electric, and traditional internal combustion engine vehicles. We took a bottom-up approach of a Total Cost of Ownership ("TCO") analysis across the regions of US, China, and Europe, across a 13-year timespan. Our approach looks not only at detailed build costs for a Fuel Cell ("FC")

vehicle, down to the nuts and bolts of drivetrain, fuel system, and others, but also at operational costs such as fuel, infrastructure, maintenance, and so forth. We believe that this approach is not only unique in the marketplace, but also offers our readers a perspective that can be applied to almost any operational business model. Indeed, we applied our model to 3 specific case scenarios of Fuel Cell Electric Vehicle ("FCEV") use today - focusing on an logistics operator in Shanghai, a drayage truck operator in California, and a bus operator in London.

Our TCO analysis shows consistent and highly encouraging results. Even when ignoring qualitative benefits of hydrogen (i.e. zero-emission at the use end, among others), FCEVs are forecasted to become cheaper from a TCO perspective compared to Battery Electric Vehicles ("BEV")s and Internal Combustion Engine ("ICE") commercial vehicles over the next 10 year period in all use cases. This is driven by a combination of vehicle build cost declines as technology matures and economies of scale improve, as well as other factors such as hydrogen fuel costs, infrastructure, and so forth. It is unsurprising, then, to also find that major governments across the world are focusing their efforts on these pieces to drive hydrogen technology and use forward into the future. In our high-level TCO analysis, our

results show that, in 2019, FCEVs are approximately 40% and 90% more expensive than BEVs and ICE vehicles, on a per 100km basis considering acquisition and operational costs together. From an acquisitions cost perspective, the higher cost is primarily due to high cost of the fuel cell system, as well as a markup on other components due to lower economies of scale. From an operational cost perspective, the higher cost is primarily driven by the cost of hydrogen fuel.

However, the TCO of FCEVs is forecasted to be less than BEVs by 2026, and less than that of ICE vehicles around 2027. Overall, we estimate that the TCO of FCEVs will decline by almost 50% in the next 10 years. This is driven by several factors. From an acquisition cost perspective, fuel cell systems are forecasted to decrease in cost by almost 50% in the next 10 years. The fuel cell system is relatively light in terms of materials cost but high in manufacturing costs, due to high technological requirements. For example, contrary to common thinking, the cost of platinum makes up less than 1% of cost of the fuel stack system. This is compared to battery vehicles, in which commodity-type raw materials, such as lithium and cobalt, makes up a significant portion of total costs. The relative raw-materials-light fuel cell system leaves significant

room for cost improvements in the future, together with dramatic improvements in economies of scale. Another large factor in terms of decrease in operational cost is the cost of hydrogen, which is forecasted to decrease significantly across all geographies in the future. This is due to the increased usage of renewable energies to produce hydrogen (which is less than 5% of hydrogen production today), as well as build-out of supporting infrastructure and transport mechanisms.

Our TCO forecast is furthermore relatively conservative in several aspects. For example, as history would show with emerging technologies, production costs often decrease much more dramatically than forecasted. We have also not included any government subsidies and incentives (acquisition, infrastructure, or operational) in the TCO model. When looking at the specific case scenarios in Shanghai, California, and London, the cross-over of FCEVs with BEVs and ICE vehicles are much faster, due to a variety of subsidies on FCEVs in each geography, or additional taxes on ICE vehicles or fuel. Indeed, we have also been quite conservative on pricing pressure on ICE vehicles in the future, which could be driven up significantly from quantitative (cost of fuel, higher emission standards), or qualitative (restrictions on entering city areas, or planned banning of pure ICEs)

perspectives. Therefore, it is likely that FCEVs will become cheaper than BEVs and ICE vehicles from a TCO perspective sooner than 2026.

Finally, we also cover in this paper some of the energy efficiency, hydrogen production, greenhouse gas and other environmental impacts of fuel cell technology today and going forward. Although this is not a highlight of this paper, but rather Volume 3\* where we shall explore the hydrogen value chain in more detail, our high level analysis in this paper can allow the reader to start garnering some insights into the incredible complexity of the hydrogen value chain and possibilities for improvements in the next years to come. For example, today, the subsidies and incentives of FCEVs are higher than ICE vehicles, but lower than BEVs today due to inefficiencies in the hydrogen production process. In the future, where renewables energies such as wind and solar play more part in the hydrogen production process, the energy efficiency of FCEVs will see dramatic improvement. For example, renewable energies (or even nuclear energy) are affected by seasonality and peak usage cycles, resulting in overcapacity of electricity production which is often wasted. The marginal cost of renewable energies is near zero, which results in their being priced below prevailing market – even negatively priced in certain countries

in Europe. This wasted energy can be captured by hydrogen as a clean and efficient alternative.

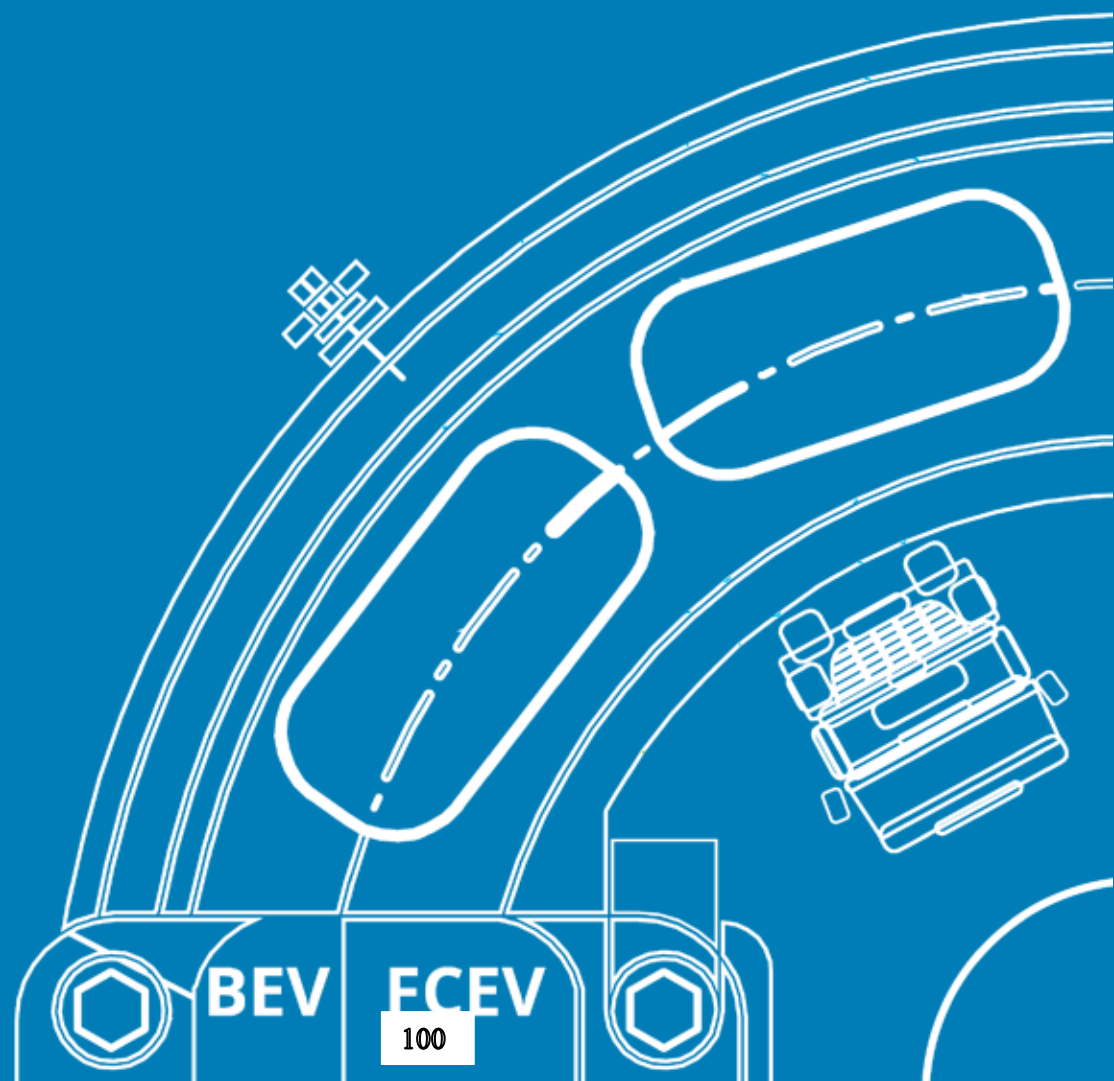
From a lifetime emissions and environmental impact perspective, FCEVs are also cleaner than BEVs and ICE vehicles, with even more room for improvement as hydrogen production and delivery matures. The production of FCEVs are also significantly cleaner than BEVs due to very low requirements on raw materials, compared to the mining and heavy usage of heavy metals such as lithium and cobalt for BEVs. At the end of life process, FCEVs are also easier (and more economically attractive) to recycle than BEVs.

As Bill Gates famously said, “We always overestimate the change that will occur in the next two years and underestimate the change that will occur in the next ten. Don't let yourself be lulled into inaction.” We hope this white paper series proves useful for our readers, and that our efforts, however small, may prove as part of catalyst for change for a more economically sound business model for businesses, and a greener world for all of us.

Note: \*The three volume series include: 1) Hydrogen and fuel cell solutions for transportation; 2) Hydrogen and fuel cell applications now and future; 3) Evolution and future of hydrogen supply chain

# Content

Introduction to fuel cell technology	5
Overview of fuel cell vehicle applications	22
Total cost of ownership analysis	35
Comparison of energy efficiency and environmental impacts	67
Conclusion and looking ahead	89
Reference	91
Contact Us	101



BEV

ECEV

# Introduction to fuel cell technology

## 1.1 What are fuel cells?

Broadly speaking, a fuel cell is an electrochemical reactor that converts the chemical energy of a fuel and an oxidant directly to electricity <sup>1</sup>. More recently, the word fuel cell has been used almost exclusively to describe such a reactor using hydrogen as the primary source of energy <sup>2</sup>.

Hydrogen has a long history of being used as fuel for mobility. More than 200 years ago, hydrogen was used in the very first internal combustion engines by burning the hydrogen itself,

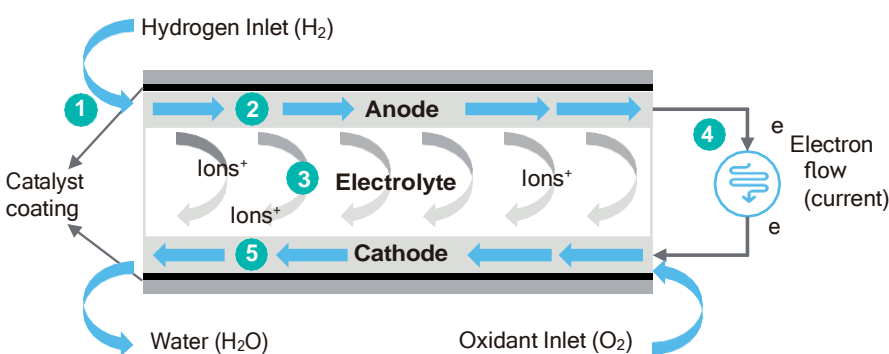
similar to burning gasoline today <sup>3</sup>. However, this did not prove to be quite successful, due to safety concerns as well as low energy density <sup>7</sup>. Rather, in a modern fuel cell, hydrogen is a carrier of energy, by reacting with oxygen to form electricity <sup>4</sup>.

The reaction between hydrogen and oxygen is astoundingly simple, and can be represented by the following formula:  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ . <sup>5</sup> In a fuel cell, hydrogen and oxygen are introduced separately with hydrogen supplied to one electrode of the fuel cell and

oxygen to the other (Figure 1). The two electrodes are separated by a material called the electrolyte, which acts as a filter to both stop the cell reactants mixing directly with one another and to control how the charged ions created during the partial cell reactions are allowed to reach each other.

Hydrogen molecules first enters the hydrogen electrode (called the anode) of the fuel cell (step 1). The hydrogen molecules then react with the catalyst coating the anode, releasing electrons to form a positively charged hydrogen ion (step 2). These ions cross the electrolyte and reach the oxygen at the second electrode (called the cathode) (step 3). The electrons, however, cannot pass the electrolyte. Instead, they flow into an electrical circuit, generating the power of the fuel cell system (step 4). At the cathode, the catalyst causes the hydrogen ions and electrons to bond with oxygen from the air to form water is the only byproduct of the process (step 5) <sup>6</sup>

Figure 1: Operating principle of the fuel cell stack



v  
a  
p  
o  
r  
,  
w  
h  
i  
c  
h



Fuel cells are typically categorized by the type of electrolyte used. Typical types of fuel cells electrolytes include Proton Exchange Membrane (“PEM”), Alkaline fuel cell (“AFC”), Phosphoric Acid Fuel cell (“PAFC”), Solid Oxide Fuel Cells (“SOFC”) and Molten Carbonate

Fuel cell (“MCFC”). Figure 2 below shows a high-level comparison of the different technologies, without diving into too much technical detail of how each technology works. Of these, PEM is the most commercialized type today, due to its low operating temperature









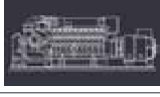




(50-100°C), short start time and ease of use of its oxidant (atmospheric air)<sup>8</sup>. These characteristics make PEM ideal for mobility solutions, and is part of the reason for the rapid development of FCEVs starting from the 1990s<sup>10</sup>.

**Figure 2: High-level comparison of 5 typical fuel cell types<sup>9</sup>**

Fuel cell type	Electrolyte type	Operating temperature (°C)	Catalyst type	Key advantages	Key weaknesses	Areas of application
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane	50-100	Platinum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quick start</li> <li>• Work at room temperature</li> <li>• Air as oxidant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensitive to CO</li> <li>• Reactants need to be humidified</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vehicle power</li> <li>• Portable power</li> </ul>
<b>AFC</b>	Alkaline	90-100	Nickel /Silver	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quick start</li> <li>• Work at room temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Need pure oxygen as oxidant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerospace</li> <li>• Military</li> </ul>
<b>PAFC</b>	Phosphoric Acid	150-200	Platinum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insensitive to CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensitive to CO</li> <li>• Slow start</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distributed generation<sup>1</sup></li> </ul>
<b>SOFC</b>	Solid Oxide	650-1,000	LaMnO3/LaCoO3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Air as oxidant</li> <li>• High energy efficiency<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High operating temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large distributed generation</li> <li>• Portable power</li> </ul>
<b>MCFC</b>	Molten Carbonate	600-700	Nickel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Air as oxidant</li> <li>• High energy efficiency<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High operating temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large distributed generation</li> </ul>

Note: 1. electrical generation and storage performed by a variety of small, grid-connected or distribution system connected devices referred to as distributed energy resources; 2. 85% overall with combined heat and power, or 60% pure electricity

**Figure 3: Major applications & examples of hydrogen fuel cell usage**

Category	Major applications	Example
<b>Transportation</b>	Passenger vehicles	
	Trucks	
	Forklifts	
	Buses	
	Logistic vehicles	
	Aviation	
	Marine	
	E-bikes	
<b>Stationary power</b>	Combined heat and power (“CHP”)	
	Uninterruptible power systems (“UPS”) <sup>1</sup>	
	Distributed Power Generation	
<b>Other application</b>	Portable power	
	Unmanned Aerial Vehicles (“UAVs”)	

Being a carrier of energy, hydrogen fuel cells can be applied in a variety of use cases. Typical applications of fuel cell can be categorized into three major types: transportation, stationary power and other application such as portable power (Figure 3) <sup>11</sup>

Note: 1. An uninterruptible power supply (UPS) system provides power to a critical load when the main input power source fails

### 1.2 History and Evolution of Fuel cell and fuel cell vehicles

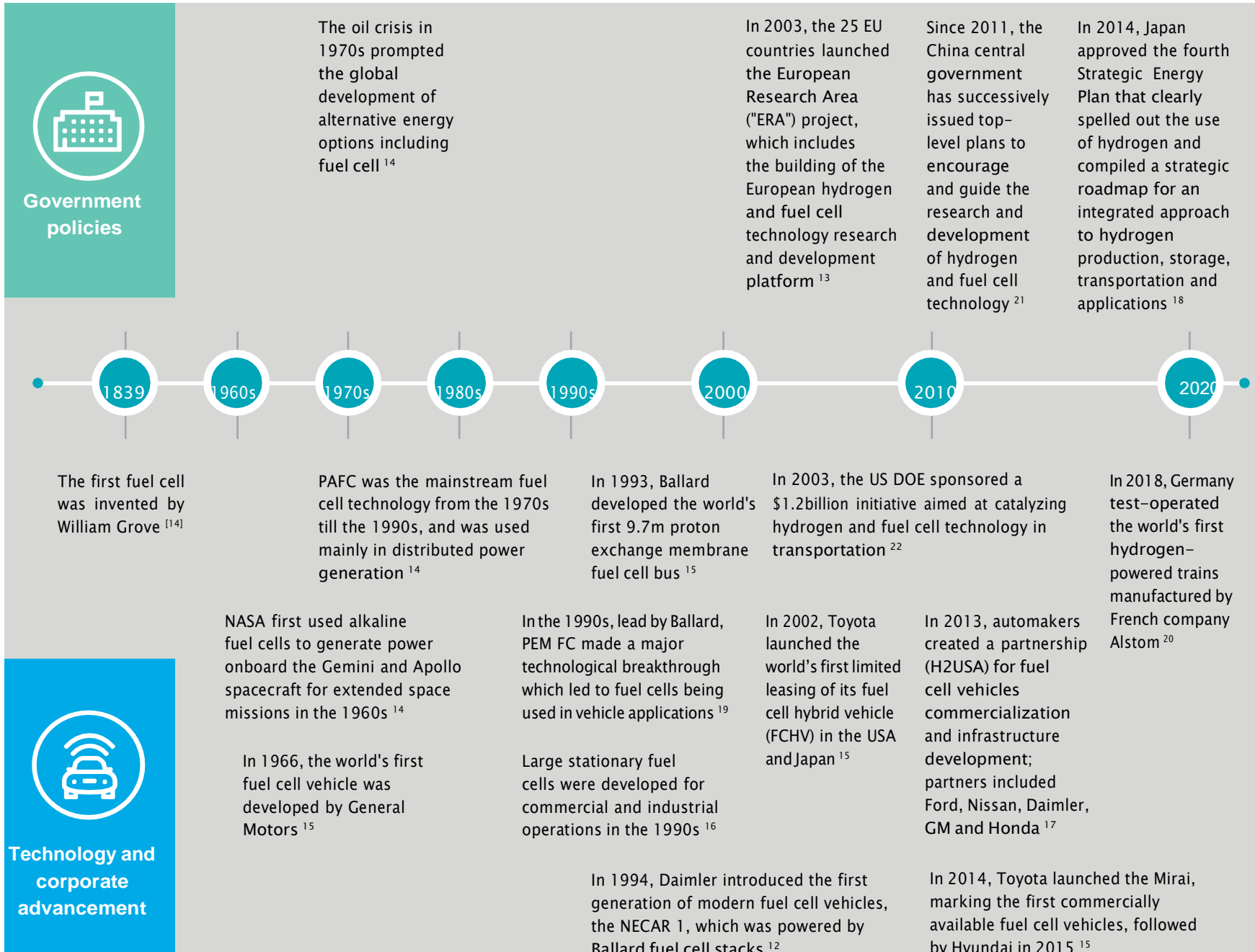
Fuel cell is not a new topic. It can be traced back to 1839 when it was firstly invented by a Welsh scientist by the name of William Grove<sup>12</sup>. However, the first time fuel cell vehicles were in the international spotlight was during the oil crisis in the 1970s<sup>14</sup>. In the next few decades, carmakers from different countries spent various degrees of efforts developing fuel cell

vehicles<sup>14</sup>. The year 2014 was marked by the world's first commercialized fuel cell vehicle by Toyota, representing a culmination of years of R&D efforts. From then on, in the eyes of the public, fuel cell vehicles were no longer experimental, but were recognized as one of the key driving technologies of the future of mobility. In the next 5 years (till now), countries such as China, US, Japan, and various countries in Europe focused their

efforts on driving this technology forward<sup>14</sup>. A brief history of fuel cell advancement can be seen below in Figure 4. Through a combination of governmental policy, technology advancement and industrial involvement, fuel cell applications are now entering into a golden era of advancement.



9 **Figure 4. Brief History and Evolution of fuel cell and fuel cell vehicles**







### 1.3 Hydrogen development overview by geography

As with most technologies, the initial development and deployment phases of fuel cell technology is heavily dependent on government policies and incentives. To various extents and for various reasons, governments of

China, US, European nations and Japan have promoted the development of the fuel cell industry, investing heavily in the core technology research and establishing subsidy policies and medium/long-term strategic plans. By analyzing various countries' government policies, as well as

industrial development, insights can be drawn from the development of hydrogen and fuel cell in each country. Figure 5 below provides an overview of the policy focus of each country, which we will dive into in further detail in the following pages.

Figure 5. Policy overview across major markets

	US	China	Europe	Japan
National strategy	<ul style="list-style-type: none"> <li>As early as in 1990, the US government published the Hydrogen Research, Development And Demonstration Act, formulating 5-year plan for hydrogen energy R&amp;D <sup>13</sup></li> <li>Due to the long period of hydrogen development, the United States has formed a systematic basket of laws, policies and scientific research plans to promote hydrogen energy <sup>30</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Although comparatively late in development compared to other nations, China is putting a strong focus on hydrogen</li> <li>Hydrogen was listed as one of the 15 key focus areas of China's energy strategy and technology innovation plan in 2016 <sup>25</sup></li> <li>During the 2019 Two Sessions (a public national meeting to discuss governmental results), hydrogen was written into the government work report for the first time <sup>26</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2003, the 25 EU nations launched the European Research Area ("ERA") project, which includes the building of the European hydrogen and fuel cell technology research and development platform <sup>13</sup></li> <li>In 2019, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking ("FCHJU") released the Hydrogen Roadmap Europe, which proposed a roadmap for hydrogen energy development towards 2030 and 2050 <sup>34</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrogen was established as a "national energy" of Japan, and the government has committed to make Japan a hydrogen society <sup>30 31 32</sup></li> <li>In 2014, Japan launched the fourth Strategic Energy Plan and published the Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells, outlining an integrated approach to hydrogen production, storage, transportation and applications <sup>33</sup></li> </ul>
Hydrogen production & distribution	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2019 DOE issued a funding opportunity announcement for up to \$31 million in funding to advance the H2@Scale<sup>2</sup> concept, including innovative concepts for hydrogen production, and an integrated production, storage, and fueling H2@Scale pilot system <sup>35</sup></li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>No clear nation-wide subsidies or policies on hydrogen production &amp; distribution <sup>27</sup></li> <li>The current classification of hydrogen as a Hazardous Material is one of the major policy barriers to be overcome <sup>27</sup></li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relative high focus on clean production of hydrogen going forward</li> <li>Hydrogen Roadmap Europe: a transition to one-third ultra-low carbon hydrogen production by 2030 <sup>34</sup></li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Building up a commercial-based domestic system for efficiently distributing hydrogen by mid-2020s <sup>24</sup></li> <li>Full-fledged operation of manufacturing, transportation and storage of zero-carbon emission hydrogen by 2040 <sup>24</sup></li> </ul> </li> </ul> 

Note: 1. Harvey balls represent focus/completeness of policies in each area, and are illustrative for comparison purposes only 2. H2@Scale is a concept that explores the potential for wide-scale hydrogen production and utilization in the United States to enable resiliency of the power generation and transmission sectors, while also aligning diverse multibillion dollar domestic industries, domestic competitiveness, and job creation.

	US	China	Europe	Japan
<b>Hydrogen Infrastructure</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The DoE launched H2USA – a public-private partnership with FCEV OEMs, focusing on advancing hydrogen infrastructure <sup>36</sup></li> <li>The California Fuel Cell Partnership (“CaFCP”) has outlined targets for 1,000 hydrogen refueling stations by 2030 <sup>37</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No clear nation-wide subsidies or policies on hydrogen infrastructure<sup>27</sup></li> <li>Several city-level government like Foshan, and Zhongshan city are setting local subsidy policies <sup>25</sup></li> <li>However, approval procedures for hydrogen stations are still unclear <sup>27</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2009, Germany established H2 Mobility, investing in world’s first nationwide network of hydrogen filling stations <sup>39</sup></li> <li>Hydrogen Roadmap Europe: 3,700 hydrogen refueling stations are expected by 2030 <sup>34</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>From 2016-2018, the Ministry of Economy, Trade and Industry has provided ~\$88million budget on R&amp;D and ~\$539million budget on construction subsidies of hydrogen fueling stations <sup>23</sup></li> </ul>
<b>Support for passenger vehicles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The US government clarified the leading role of hydrogen energy in transportation transformation in the all-of-the-above Energy Strategy in 2014 <sup>13</sup></li> <li>The California Fuel Cell Partnership has outlined targets for 1,000,000 FCEVs by 2030 <sup>37</sup></li> <li>In 2018, the California Air Resources Board (“CARB”) has preliminarily awarded \$41 million for the ‘shore to store’ project, developing 10 FC class 8 drayage trucks <sup>38</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Subsidies to consumers on each FCEV sold are expected to last at least until 2025 <sup>28</sup></li> <li>Similar to BEVs, the government is focusing first on commercial applications of FCEVs, which is easier to regulate and deploy on a large scale <sup>28</sup>; this is not written into policy per-se, but more from a implementation perspective <sup>28</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrogen Roadmap Europe: 3.7 million fuel cell passenger vehicles on road by 2030 <sup>34</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Japan’s hydrogen fuel cell vehicles are mainly passenger vehicles <sup>29</sup>, starting from the R&amp;D by OEMs which led to the release of the Toyota Mirai in 2014 <sup>40</sup></li> <li>Target of 800,000 FCEVs by 2030 “Hydrogen Strategy 2017” <sup>23</sup></li> </ul>
<b>Support for commercial vehicles</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrogen Roadmap Europe: 500,000 fuel cell LCVs, 45,000 fuel cell trucks and buses on road by 2030 <sup>34</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Target of 1,200 FC buses and 10,000 forklifts by 2030 “Hydrogen Strategy 2017” <sup>23</sup></li> </ul>

Note: 1. Harvey balls represent focus/completeness of policies in each area, and are illustrative for comparison purposes only

## US

The United States is the first country to establish hydrogen and fuel cell technology as part of its national energy strategy<sup>31</sup>. Initiated due to the oil crisis, the US government has funded research sponsorship on hydrogen since 1970s<sup>41</sup>. As early as in 1990, the US government published the Hydrogen Research, Development And Demonstration Act, formulating 5-year plan for hydrogen energy R&D<sup>13</sup>. In 2002, the US DOE issued the National Hydrogen Energy Development Roadmap, provides a blueprint for the coordinated, long-term, public and private efforts required for hydrogen energy development.<sup>13</sup> In 2012, the US congress rewrote the hydrogen fuel cell policy, increasing the tax credit for hydrogen refueling properties from 30% to 50%, and creating a tiered investment tax credit to reward highly efficient fuel cells utilizing combined heat and power (CHP) systems.<sup>51</sup> In 2014, the US government promulgated the all-of-the-above Energy Strategy, which clarified the leading role of hydrogen energy in transportation transformation.<sup>13</sup> The 8th of October was chosen to be the national hydrogen and fuel cell day by the Fuel Cell and Hydrogen Energy Association in 2015, and was designated in Senate Resolution 217 in the same year, signifying increased important places by the federal government.<sup>49</sup> As demonstrated below in Figure 6, years of efforts by various US organizations has created policies that comprehensively cover almost all parts of the hydrogen industry.

The R&D of hydrogen and fuel cell in US was mainly led by the DOE, which has established a framework on a R&D system led by the national lab of DOE and supplemented by universities, research institutes and enterprises through allocating funds on key technical challenges.<sup>31</sup> Due to the long period of hydrogen development, the United States has formed a systematic basket of laws, policies and scientific research plans to promote hydrogen energy research, development and deployment.<sup>30</sup> A Timeline of major government policies/initiatives can be seen below in Figure 6. In March 2019, the DoE announced intentions to spend up to \$31 million on H2@scale<sup>1</sup>, focusing on economic scale hydrogen production, transportation, storage and utilization in multiple sectors in the US.<sup>34</sup>

To further promote wide adoption and address infrastructure challenges, the DoE launched H2USA – a public-private partnership with FCEV OEMs, focusing on advancing hydrogen infrastructure to support more transportation energy options for U.S. consumers.<sup>36</sup> The years of investment definitely shows in practice. In terms of commercial applications, the US has the largest number of fuel cell passenger cars in the world - number of FC cars sold and leased in US reached 7,271 by August 2019<sup>44</sup>. In addition, there are over 30,000 fuel cell forklifts in US as of April 2019<sup>335</sup>, which are widely used in the United States by companies such as Walmart and Amazon.<sup>50</sup>

California represents the highest level of commercialization of hydrogen fuel cell vehicles in the United States, due to a level of government support and public support for renewable energies not found in other states.<sup>46</sup> There are 6,830 FCEV operating in California as of June 2019, which far outstrips that of any other state<sup>37</sup>. Since June 2010, when the California Energy Commission's first grant was released, 35 retail hydrogen refueling stations have opened, with another 29 stations in development.<sup>45</sup> The California Air Resources Board and the California Fuel Cell Partnership played a major role in advancing the commercialization process.<sup>47</sup> With a complete "planning-subsidiary-evaluation" system, California has become the most active and demonstrative market for hydrogen and fuel cell development and deployment in the United States.<sup>48</sup> Looking forward, the California Fuel Cell Partnership has outlined targets for 1,000 hydrogen refueling stations and 1,000,000 FCEVs by 2030.<sup>37</sup>

Note: 1. H2@Scale is a concept that explores the potential for wide-scale hydrogen production and utilization in the United States to enable resiliency of the power generation and transmission sectors, while also aligning diverse multibillion dollar domestic industries, domestic competitiveness, and job creation.

Figure 6. Timeline and coverage of major government policies/initiatives

		Hydrogen production & distribution	Hydrogen Infrastructure	Support for passenger vehicles	Support for commercial vehicles
1974	<ul style="list-style-type: none"> <li>Miami University organized The Hydrogen Economy Miami Energy (THEME) Conference</li> </ul>	✓	✓		
1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States Department of Energy - "Hydrogen Research, Development And Demonstration Act"<sup>54</sup></li> </ul>	✓			
1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States Department of Energy - "Hydrogen Future Act of 1996"<sup>55</sup></li> </ul>	✓	✓		
2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States Department of Energy - "National Hydrogen Energy Development Roadmap"<sup>53</sup></li> </ul>	✓	✓	✓	✓
2003	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States Department of Energy - "Hydrogen Fuel Initiative"<sup>56</sup></li> </ul>	✓	✓	✓	✓
2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States Department of Energy &amp; United States Department of Transportation - "Hydrogen Posture Plan"<sup>57</sup></li> </ul>	✓	✓	✓	✓
2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States Congress - "The Fuel Cell and Hydrogen Infrastructure for America Act"<sup>51</sup></li> </ul>	✓	✓		
2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>The DoE launched H2USA – a public-private partnership with FCEV OEMs, focusing on advancing hydrogen infrastructure and enabling the large scale adoption of FCEVs<sup>36</sup></li> </ul>	✓	✓	✓	✓
2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>Executive Office of the President of the United States - "All-of-the-above Energy Strategy"<sup>52</sup></li> </ul>			✓	✓
2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>DOE issued a funding opportunity announcement for up to \$31 million<sup>34</sup></li> <li>The California Fuel Cell Partnership has outlined targets for 1,000 hydrogen refueling stations and 1,000,000 FCEVs by 2030<sup>37</sup></li> </ul>	✓	✓	✓	✓



## China

The first Chinese fuel cell vehicle was developed in 1999[60]. Since then, China has developed into one of the world's largest hydrogen markets - both in production and consumption. The country has the largest hydrogen production volume worldwide, with existing industrial hydrogen production capacity of 25 million tons / year<sup>31</sup>. On the consumption side, China sold more than 3,000 FCEVs accumulated from 2017 to 2019 (all of which were commercial vehicles), making it one of the world's largest markets for FC deployment.<sup>64</sup>

The achievement of developing such a huge market was the culmination of decades of government policy and initiatives. Since 2011, the central government has successively issued top-level plans to encourage and guide the research and development of hydrogen and fuel cell technology, such as the "13th Five-Year Plan for Strategic Emerging Industry Development", "Energy Technology Revolution and Innovative Action Technology (2016-2030)", "Energy Conservation and New Energy Vehicle Industry Development Plan (2012-2020)" and "Made in China 2025".<sup>21</sup> Also, in order to promote NEVs development, a "Dual Credit Management System", has been applied to passenger vehicles production<sup>188</sup>. This refers to positive credits given for NEV production and negative credits for ICE production<sup>188</sup>. This system may be also applied to commercial vehicles in the future<sup>189</sup>. Hydrogen was listed as one of the 15 key focus areas of China's energy strategy and technology innovation plan in 2016<sup>25</sup>. As China is in a nation-wide effort to transition to renewable energy, hydrogen is seen as an important part of this initiative.<sup>63</sup> Hydrogen can help alleviate

many outstanding problems existing in China's energy system, such as security and sustainability concerns.<sup>65</sup> During the 2019 Two Sessions (a public national meeting to discuss governmental results), hydrogen was written into the government work report for the first time, signifying increasing importance placed upon by the central government<sup>26</sup>

In terms of FCEVs, China has devoted significant efforts in the hydrogen fuel cell vehicle industry since 2014, which drove technology maturation, decrease hydrogen cost, and drove the application of hydrogen in various areas. It is important to note that hydrogen is not the only type of renewable energy being focused on, with BEV initiatives being carried out in parallel<sup>28</sup>. Similar to BEVs, the government focused first on commercial applications of FCEVs, which is easier to regulate and deploy on a large scale.

Subsidies from central and local governments are key drivers of fuel cell vehicles industry, and subsidies were mainly developed covering 3 aspects:

- Subsidies to consumers on each FCEV sold. Though subsidies on battery electric vehicle are being reduced yearly, subsidies on FCEVs are expected to last at least until 2025. Based on expert interviews, it is likely that subsidies on FCEV will be gradually reduced and requirement on technical performance would be higher over time.<sup>28</sup>
- Subsidies on hydrogen refueling station construction. Currently, there is no clear national wide subsidies on hydrogen refueling station, while several city-level government like Foshan, and Zhongshan city are setting local subsidy policies.<sup>25</sup> Foshan

city, one of the most active cities in hydrogen deployment announced that each newly constructed stationary hydrogen refueling station can receive a maximum subsidy of 8 million RMB.<sup>62</sup>

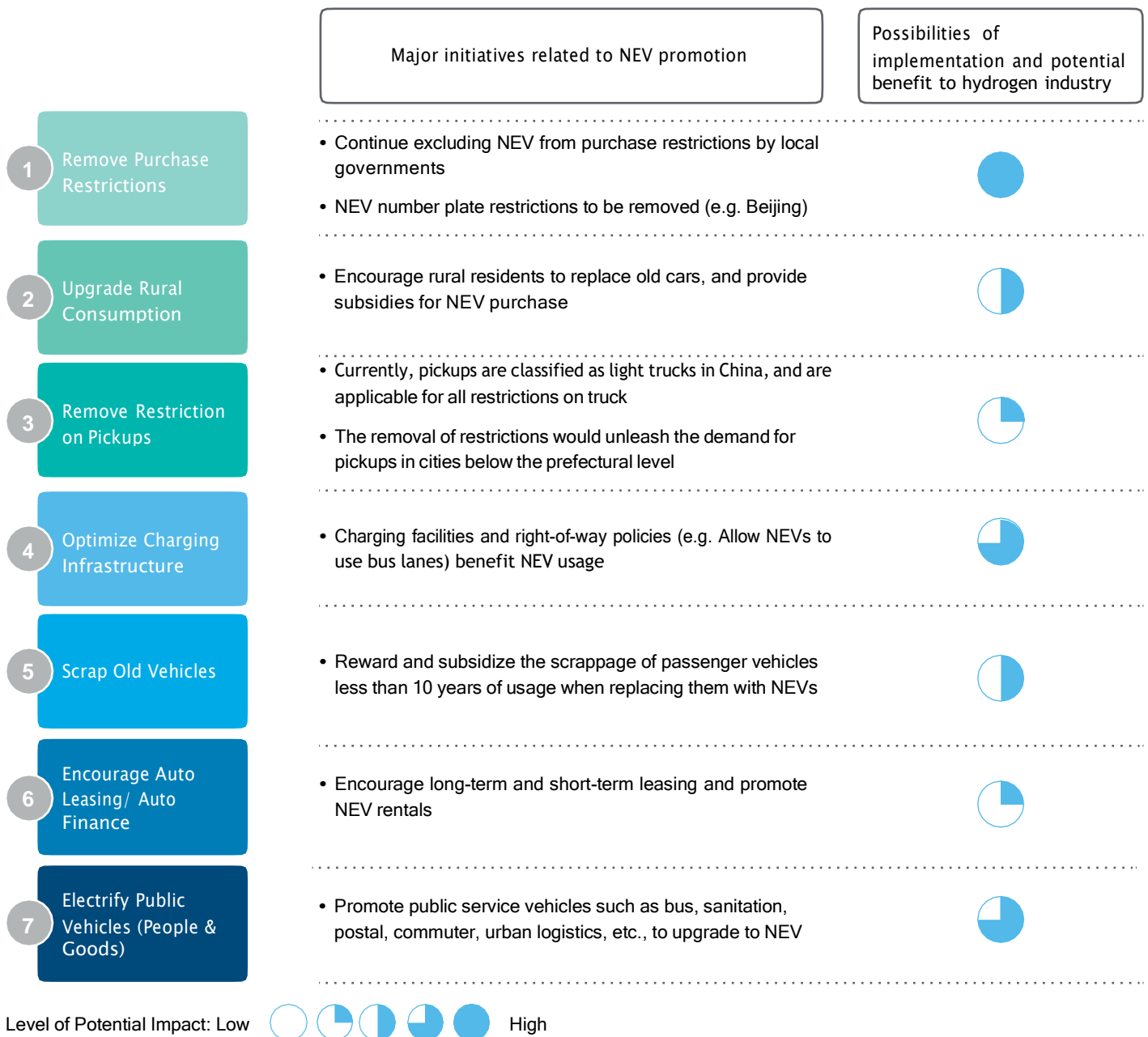
- Subsidies on hydrogen refueling cost. According to government expert interviews, the goal of these subsidies reduce hydrogen cost per 100km to be less than or on par with that of ICE vehicles. However, to whom the subsidies go to is still under discussion, which could be given to the hydrogen station operator or direct to consumers refueling their FCEVs.<sup>28</sup>
- Despite the advancement and political will of the government, the hydrogen industry still have much room for improvement in China. For example, there is still space for improvement of relevant policies and supporting facilities. Based on key expert interviews, improvements that are expected to have the most impact on the industry include<sup>27</sup>:
  - Policies and infrastructure support for hydrogen production and transportation
  - De-classification of hydrogen as part of the Hazardous Chemicals Category
  - Approval procedures of hydrogen stations
  - Increased localization and batch production capacity of core fuel cell components to drive down costs

In June 2019, NDRC's plan "Improving Circular Economy of Automobiles in China" was agreed by key agencies, introducing initiatives to remove NEV from purchase/number plate

restrictions by local government, continue central government subsidies for NEV and accelerate the removal of restrictions on pickups from entering the cities.<sup>66</sup> NDRC's plan is expected

to stimulate the consumption of NEV, including FCEVs, in the near future (Figure 7).

**Figure 7: "Improving Circular Economy of Automobiles in China" 's impact areas for the automotive market**



Note: 1. National Development and Reform Commission

## Europe

The European Union (“EU”) regards hydrogen as an important part of energy security and energy transformation<sup>31</sup>. In 2003, the 25 EU nations launched the European Research Area (“ERA”) project, which includes the building of the European hydrogen and fuel cell technology research and development platform, focusing on key technologies in the hydrogen and fuel cell industries<sup>13</sup>. In 2008, the EU established a public-private partnership called the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (“FCHJU”), which played vital role in development and deployment of hydrogen and fuel cell technologies in Europe<sup>67</sup>.

In February 2019, FCHJU released the Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition, which proposed a roadmap for hydrogen energy development towards 2030 and 2050, paving the way for large-scale deployment of hydrogen power and fuel cells in Europe<sup>34</sup>.

- The roadmap gave an overarching recommendation for all stakeholders:
  - Regulators and industry should jointly set out clear, long-term and realistic decarbonization pathways for all sectors and segments<sup>34</sup>.
  - The European industry should invest in hydrogen and fuel cell technology to remain competitive and positioned to capture emerging opportunities<sup>34</sup>.
- The roadmap also proposed the following concrete milestones across following sectors (Figure 8):
  - In terms of transportation, a fleet of 3.7 million fuel cell passenger vehicles, 500,000 fuel cell LCVs, 45,000 fuel cell trucks and buses are projected to be on the road by 2030. Fuel cell trains could also replace roughly 570 diesel trains by 2030<sup>34</sup>.
  - In terms of infrastructure for fuel cell vehicles, about 3,700 large refueling stations are expected by 2030<sup>34</sup>.
  - In terms of heating, hydrogen could replace an estimated 7% of natural gas (by volume) by 2030, and 32% by 2040, and would cover the heating demand of about 2.5 million and more than 11.0 million households in 2030 and 2040<sup>34</sup>.
  - In terms of industrial applications, a transition to one-third ultra-low carbon hydrogen production by 2030 could be achieved in all applications, including refineries and ammonia production<sup>34</sup>.
  - In terms of power generation, the at-scale conversion of “surplus” renewables into hydrogen, large-scale demonstrations of power generation from hydrogen, and renewable-hydrogen generation plants could also take place by 2030<sup>34</sup>.

Figure 8. Hydrogen Roadmap plan by 2030 in Europe <sup>34</sup>

Hydrogen Roadmap Europe	Roadmap Plan by 2030		
<b>Hydrogen production &amp; distribution</b>		<b>1/3</b> ultra-low carbon hydrogen production in industrial applications, including refineries and ammonia production	 at-scale conversion of “surplus” renewables into hydrogen large-scale demonstrations of power generation from hydrogen renewable-hydrogen generation plants
<b>Hydrogen Infrastructure</b>		~ <b>3,700</b> hydrogen refueling station by 2030	
<b>Support for passenger vehicles</b>		a fleet of <b>3.7 million</b> fuel cell passenger vehicles	
<b>Support for commercial vehicles</b>		<b>500,000</b> fuel cell light commercial vehicles on road	 <b>45,000</b> fuel cell trucks and buses projected to be on the road  Fuel cell trains replace <b>570</b> diesel trains

Germany is one of the key leaders in hydrogen and fuel cell development in Europe. To promote the fuel cell and hydrogen energy strategy, the German federal government set up the National Organization for Hydrogen and Fuel Cell Technology (“NOW”), responsible for the coordination and management of the National Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technology (NIP) and the Electromobility Model Regions programme of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI). <sup>68</sup> In 2006, the Federal Government initiated the National Innovation Program for Hydrogen and Fuel Cell Technology (“NIP”) together with representatives from research organizations as well as from various industry sectors, to

advance the role of hydrogen and fuel cell technology in Germany’s energy system <sup>69</sup>. The 2006-2016 phase of NIP funded ~EUR 1.4 bn in research, development and demonstration projects. <sup>70</sup> In 2009, Germany also established the H<sub>2</sub> Mobility initiative with Air Liquide Group, Linde Group, Shell, TOTAL and other companies, planning to invest 350 million euros in the construction of world’s first nationwide network of hydrogen filling stations in German. <sup>39</sup> By the end of 2018, Europe has 152 hydrogen refueling stations, 41% of which are in Germany <sup>71</sup>.

As the country where hydrogen was first discovered and fuel cell was invented, UK government’ support for

hydrogen and fuel cell market was less consistent and coordinated compared with other European countries such as Germany, and had no overarching strategy for the hydrogen sector until 2016. <sup>72</sup> In 2016, E4tech and Element Energy published a integrated Hydrogen and Fuel Cells roadmap with 11 sectoral ‘mini-roadmaps’, including supply chain roadmaps (e.g. H<sub>2</sub> production and distribution) and end-use roadmaps (e.g. road/non-road transportation), aiming to develop the hydrogen and fuel cell market as a part of the zero emissions strategy. <sup>72</sup> In January 2017, the JIVE project funded by European Union deployed 139 FCEBs in 5 European countries, of which 56 are in UK. <sup>73</sup>

## Japan

Of the countries studied, Japan is perhaps the most dedicated towards becoming a “hydrogen society”. Due to geographical and environmental restrictions, renewable energy is highly valued in Japan<sup>30</sup>. Initially, Japan was expected to achieve its renewable energy vision through nuclear energy. However, the Fukushima nuclear power plant accident forced the government to review its energy strategy<sup>30</sup>. Instead, hydrogen was established as a “national energy”, and the government has committed to make Japan a hydrogen society<sup>30 31 32</sup>.

In 2014, Japan launched the fourth Strategic Energy Plan that clearly spells out the use of hydrogen, and published the Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells, outlining an integrated approach to hydrogen production, storage, transportation and applications<sup>33</sup>. In 2015, NEDO\* issued a white paper on hydrogen energy, positioning hydrogen as the third pillar of domestic power generation<sup>32</sup>. In 2017, Japanese government released the “basic strategy of hydrogen energy”,

which aims to commercialize hydrogen fuel cell power generation by 2030<sup>30</sup>. METI\*\* has funded as much as \$260 million in R&D of hydrogen and fuel cell industry in 2018<sup>75</sup>.

Japan is a leading player in commercial application of fuel cells, with applications such as stationary power generation for household CHP, business/industrial fuel cells and fuel cell vehicles. Fuel cell for household CHP was first applied commercially in 2009, and Japan was the first country to introduce fuel cells for home-use power generation that are capable of producing electricity and hot water<sup>33</sup>. To date, Japan has deployed more than 20,000 stationary combined heat and power fuel cell systems at commercial and residential spaces<sup>78</sup>.

Fuel cell vehicles is another area of key focus for Japan. Since the 1990s, Japan automakers Toyota, Honda and Nissan has been devoted to R&D in fuel cell vehicles. By 2014, Toyota launched the first commercialized car Mirai, which was a milestone in FCEV industry, followed by Honda with Clarity<sup>40</sup>. Unlike

some other countries, Japan's hydrogen fuel cell vehicles are mainly passenger vehicles<sup>75</sup>. As of June 2019, fuel cell cars sold and leased in Japan reached 3,219, according to Japan METI<sup>44</sup>. Besides passenger vehicles, Japan plans to have at least 100 fuel cell buses deployed by the 2020 Olympics<sup>77</sup>.

As expected from such a wide fuel cell vehicle deployment, hydrogen infrastructure is also extremely advanced in Japan, with government funding as well as industry alliances driving hydrogen refueling station density. In 2018, a consortium of 11 companies, including Toyota and Nissan, established Japan H<sub>2</sub> Mobility, which aimed to build 80 hydrogen refueling station by 2021<sup>32</sup>. Currently, Japan has 127 hydrogen fueling stations, which is the most of any nation in the world<sup>42</sup>.

According to the Hydrogen Council, transportation is one of the most critical applications of hydrogen and fuel cell technology<sup>82</sup>. From the perspective of most countries with FC initiatives, FCEVs are seen as a critical pathway to meet goals both in terms of energy strategy as well as decarbonization goals.

Using hydrogen in fuel cells in mobility have been explored since 1966.<sup>79</sup> Like any new technology, nascent development has been slow primarily

due to a lack of existing infrastructure to support wide adoption.<sup>80</sup> However, the very real benefits of fuel cell technology have led governments around the world to continue exploring it as a form of green and emission-friendly energy.

Fuel cells for transportation include a wide range of use cases. Some of these applications, such as trains, unmanned aerial vehicles, and e-bikes are still quite early in development with limited deployments to date.<sup>11</sup>

For the purposes of this paper, most of our analysis will focus on passenger and commercial vehicle applications of fuel cell technology, which is perhaps one of the areas showing highest signs of promise for widespread adoption.<sup>81</sup> Some of these applications can be seen in Figure 9 below. From a policy perspective, the current and future number of FC vehicles by type can be seen below in Figure 10. We shall explore the details behind each vehicle type in Section 2.

**Figure 9: Typical passenger & commercial vehicle applications of hydrogen fuel cell**

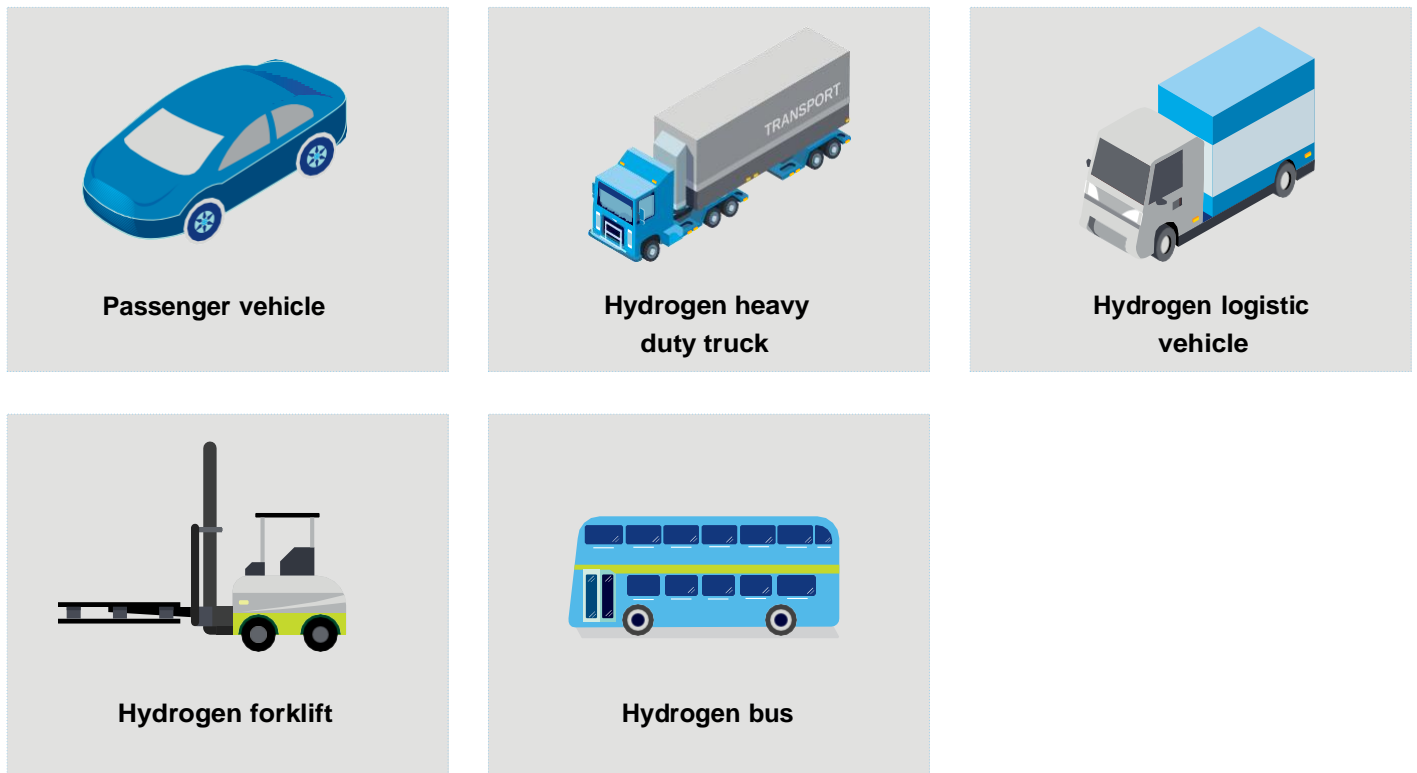





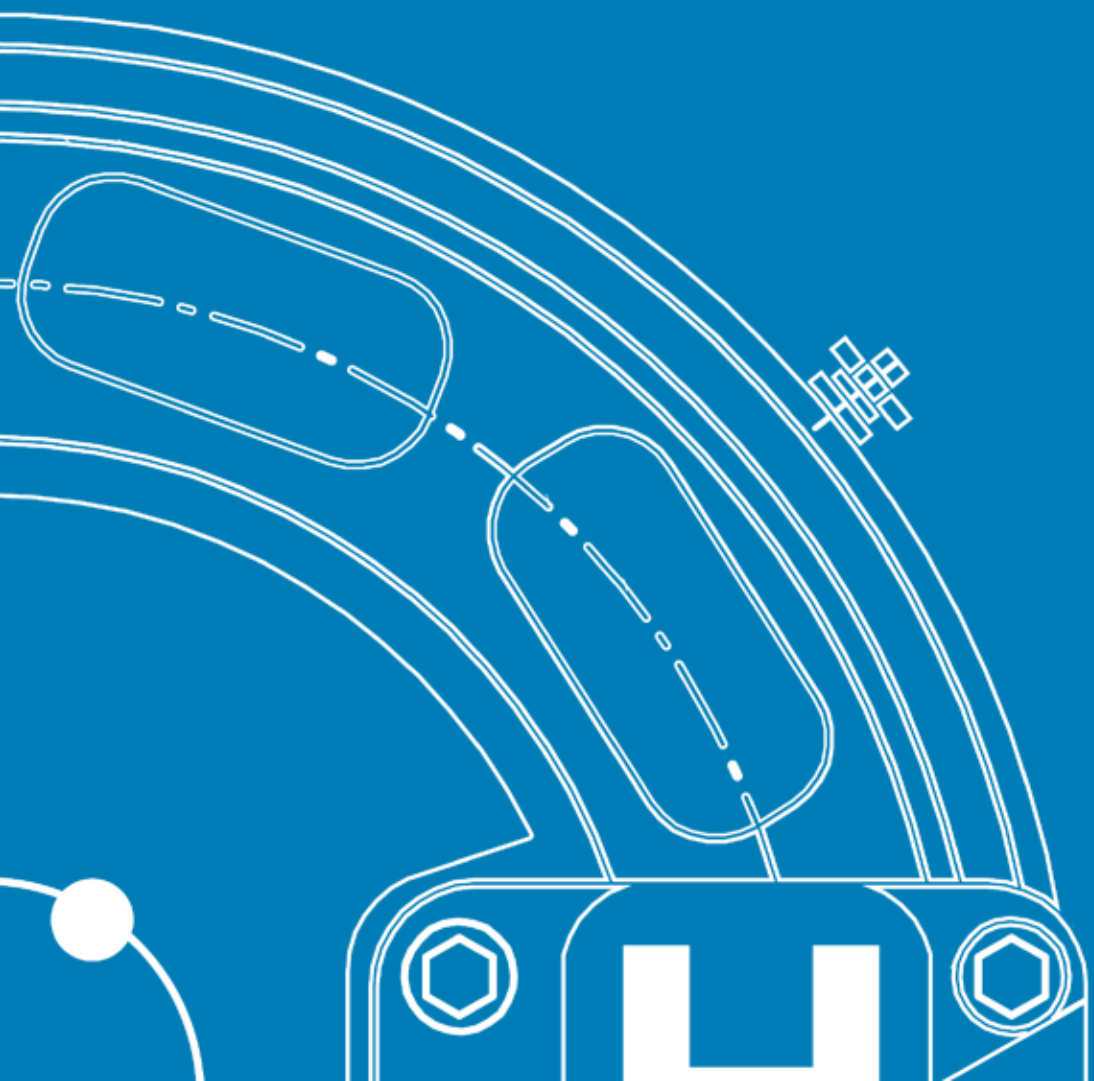


Figure 10. Current and future number of FC vehicles by type and geography\*

						
		Passenger vehicles	Buses and coaches	Trucks**	Forklifts	Refueling stations
<b>US</b>	Current	7,271 <sup>44</sup>	35 active, 39 in development	prototype test	>30,000 <sup>335</sup>	~42 online <sup>37</sup>
	Target		5,300,000 FCEVs on US roads by 2030 <sup>337</sup>		300,000 by 2030 <sup>337</sup>	7,100 by 2030 <sup>337</sup>
<b>China</b>	Current	0	2,000+ <sup>64 83 84 85</sup>	1,500+ <sup>94</sup>	2	23 <sup>89</sup>
	Target	3,000 by 2020 <sup>87</sup> 1,000,000 by 2030 <sup>336</sup>	11,600 commercial vehicles by 2020 <sup>87</sup>			100 by 2020 500 by 2030
<b>Europe</b>	Current	~1000+ <sup>42</sup>	~76 <sup>42 73 86</sup>	~100 <sup>88</sup>	~300 <sup>42</sup>	~152 <sup>71</sup>
	Target	3,700,000 by 2030 <sup>34</sup>	45,000 fuel cell trucks and buses by 2030 <sup>34</sup>			~3,700 by 2030 <sup>34</sup>
<b>Japan</b>	Current	3,219 <sup>44</sup>	18	N/A	160	127; 10 in progress
	Target	40,000 by 2020	100 by 2020		500 by 2020	160 by 2020
		200,000 by 2025 800,000 by 2030 <sup>24</sup>	1,200 by 2030 <sup>24</sup>		10,000 by 2030 <sup>24</sup>	900 by 2030 <sup>24</sup>

Note: \*Japan, United States, and China data updated April 2019; Germany in Europe data updated July 2019; \*\*Due to the different definitions of trucks by sources tabulating total number of vehicles, logistic trucks and heavy trucks are included here together; for detailed analysis and breakdown of vehicle types, kindly review to Section 2.





# Overview of fuel cell vehicle applications

To most consumers, fuel cell vehicles sound incredibly complex and sophisticated. However, when broken down into pieces, fuel cell vehicles are quite simple. Partially because of this simplicity, fuel cell technology is used in a wide variety of vehicle types.

This section provides context for different types of vehicles and potential fuel cell applications. This sets the stage and provides a logical entrance for deeper analysis into certain vehicle types.

First, let us introduce basic components of fuel cell vehicles and explain their simple operation principles. We shall also compare and contrast component differences between fuel cell, battery-electric, and ICE vehicles.

## 2.1 : Basic components of fuel cell vehicles

As shown in Figure 11, similar to the majority of modern day vehicles, fuel cell vehicles are comprised of four basic component categories: propulsion system, chassis, automotive electronics and body<sup>90 96 97</sup>. The

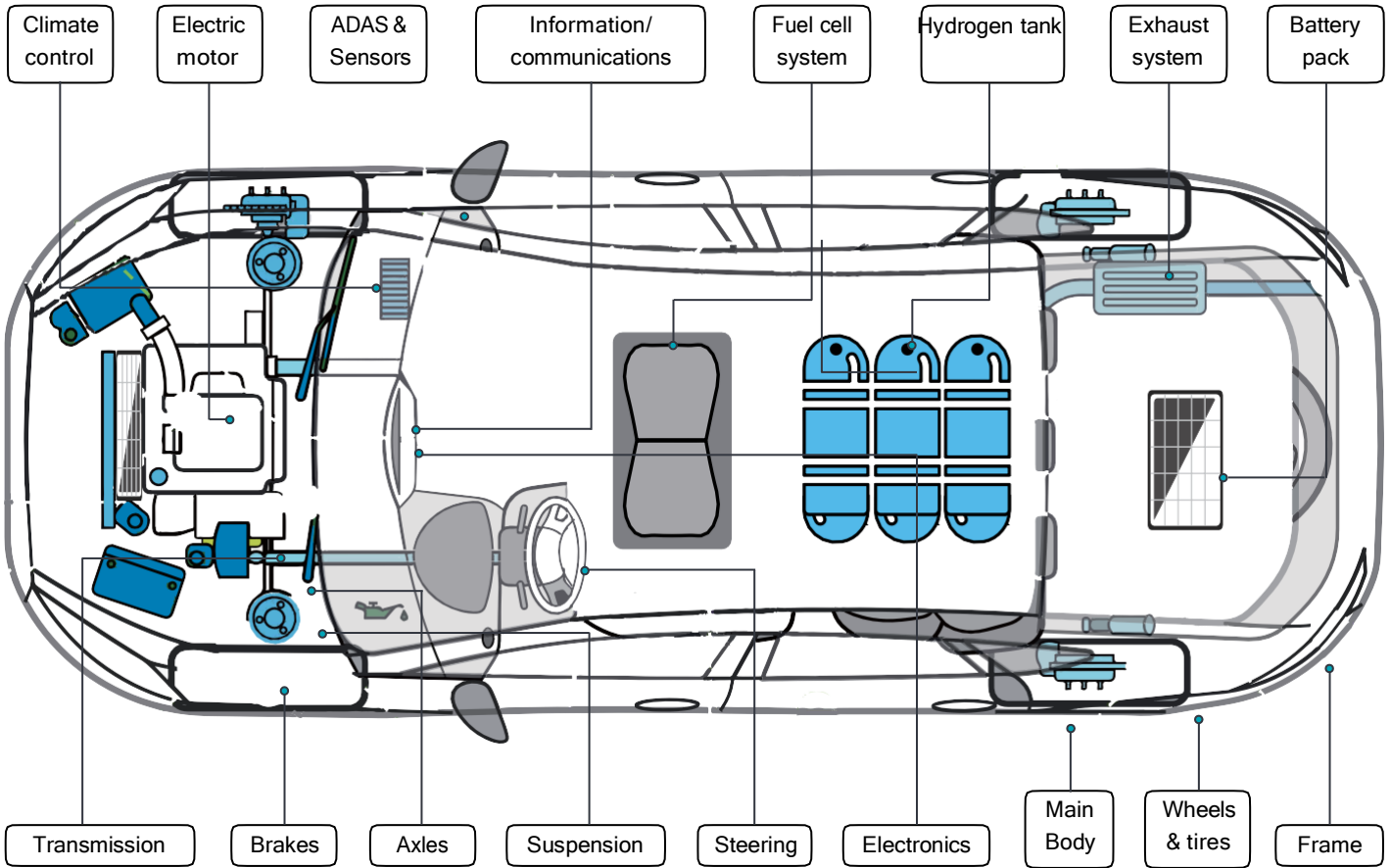
propulsion system provides electricity to power the car through a fuel system and electric motor. This power is derived from hydrogen, which is stored in pressurized tanks in the vehicle<sup>91</sup>. A fuel cell stack converts this energy to electricity, which is supplemented by a battery to drive the electric motor. This is not dissimilar to BEVs, although FCEVs have batteries with much smaller battery capacity. Whereas BEV batteries are used to store the entirety of the power used to move the car, FCEVs only use batteries to smooth fuel cell power fluctuation: absorb extra electricity when power requirement is low and release more power when required<sup>92</sup>.

Theoretically, BEVs have higher energy efficiencies, as we shall discuss in section 4, but the heavy battery weight minimizes this advantage especially for heavy duty vehicles in long distance transit. BEVs must add more battery capacity for every additional mile the vehicle should operate, which adds extra weight<sup>94</sup>. For example, Tesla's electric heavy truck model is estimated

to reach 4.5 tons of battery weight<sup>95</sup>. FCEVs, on the other hand, does not suffer from the same problem, since the amount of hydrogen carried adds in comparison much less weight to the vehicle. This is due to hydrogen having much higher specific energy - about 120MJ/kg compared to 5MJ/kg for batteries<sup>94</sup>.

Aside from the propulsion system, other components of a vehicle are essentially identical and fuel-type agnostic. The vehicle chassis includes transmission, steering, brake and running systems. Automotive electronics are comprised of electronic control system such as chassis control system, safety system and vehicle electronics products such as infotainment/communications, Advanced Driver Assist System ("ADAS") & sensors. Finally, body contains main body, seats and interior<sup>93</sup>.

Figure 11 FCEV Components



Category	Sub-category	Component
Propulsion system	Energy storage	Hydrogen tank
	Fuel system	Fuel-cell system, Battery pack
	Drive train	Electric motor
	Exhaust system	Exhaust system
Chassis	Transmission	Transmission
	Steering	Steering
	Brake	Brake
	Running system	Wheels & tires, Frame, Suspension, Axles
Automotive Electronics	Electronics control system	Electronics
	Vehicle electronics products	Infotainment/communications, ADAS & Sensors, Climate Control
Body	Body	Main body, Seats, Interior

In a hydrogen fuel cell vehicle, the fuel cell system is comprised of a fuel cell stack and assistant systems. As seen below in Figure 12, the fuel cell stack is the core component<sup>98</sup>, which converts chemical energy to electrical energy to power the car. The detailed principles of a fuel stack has been illustrated in Section 1 and will therefore not be repeated here.

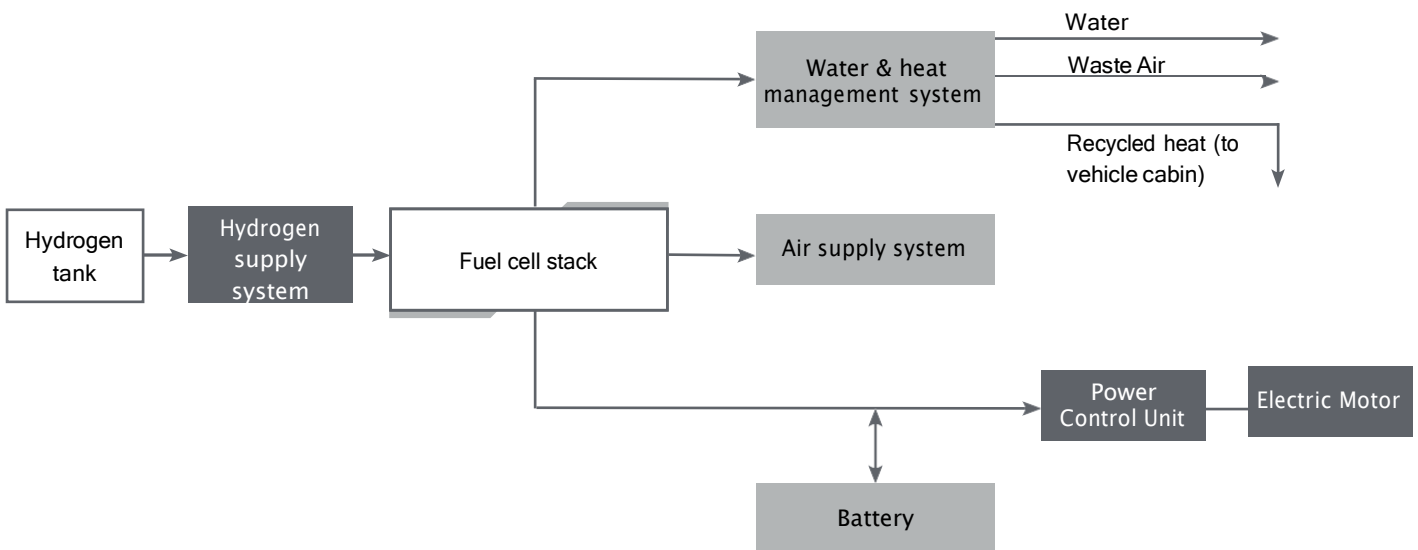
Besides the fuel stack, there are four assistant system in fuel cell: hydrogen

supply system, air supply system, water management system and heat management system<sup>99</sup>. The hydrogen supply system transmits hydrogen from tank to the stack. An air supply system, which is comprised of an air filter, air compressor and humidifiers, provides oxygen to the stack<sup>99</sup>. Water and heat management systems with separate water and coolant loops<sup>99</sup> are used to eliminate waste heat and reaction products (water)<sup>100</sup>. Through heat management system, heat from fuel cell

could be harvested to heat vehicle cabin and improve vehicle efficiency<sup>94 101</sup>.

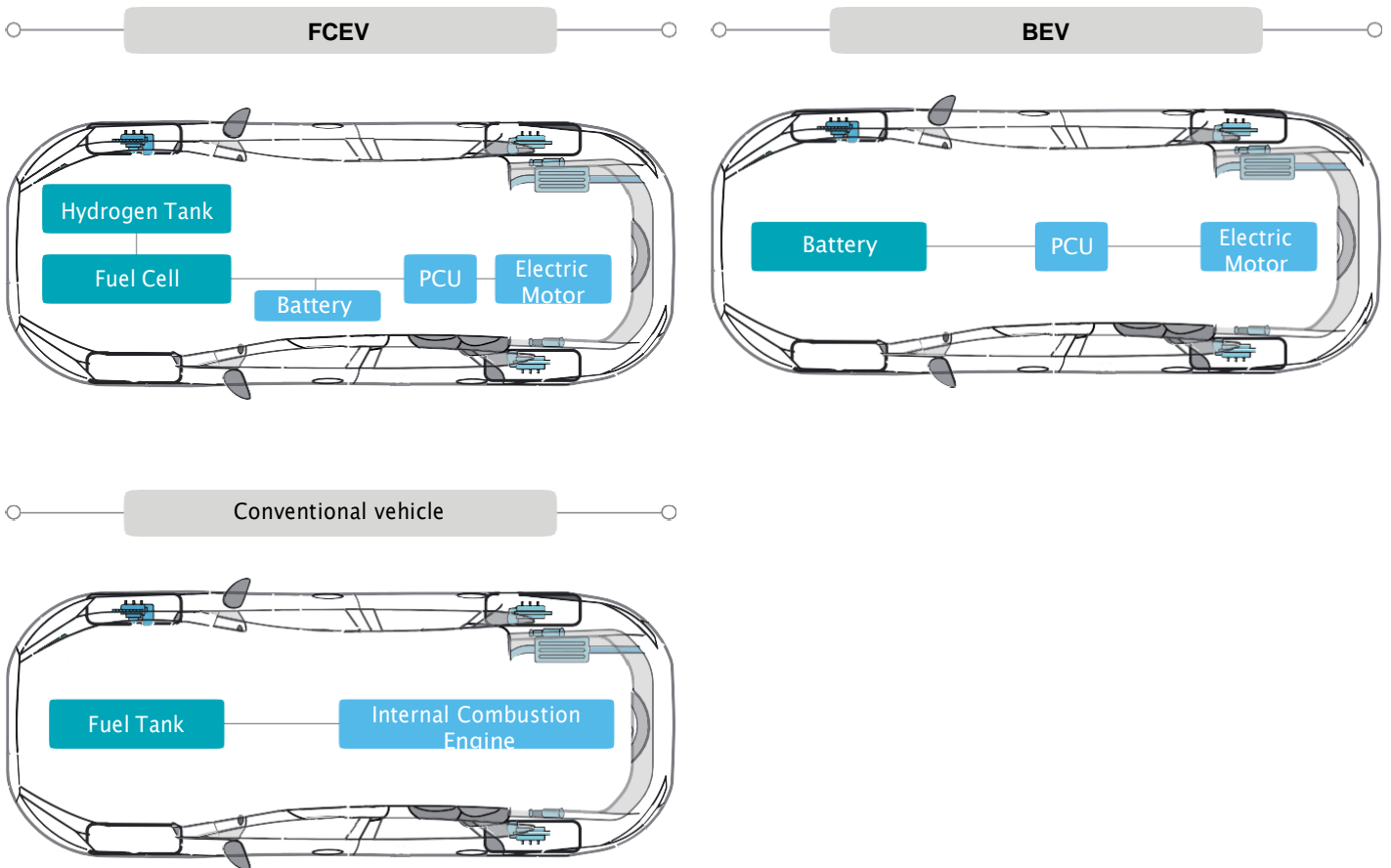
The electricity produced by the fuel cell system goes through a power control unit ("PCU") to the electric motor, with assistance from a battery to provide additional power when needed<sup>99</sup>.

**Figure 12. Fuel cell vehicle operation principle**



Note: \*For purposes of this paper, fuel cell system consists of the fuel cell stack, balance of plant, electronic controls for fuel cell, etc. but does not include the hydrogen tank etc.

Figure 13. Propulsion systems of FCEVs and other powertrains



As shown in Figure 13, The main difference between FCEV and other vehicles is the propulsion system. All other components are essentially similar, and are therefore not highlighted here.

FCEV and BEV transfer electric energy to kinetic energy through an electric motor, while Gasoline and Diesel vehicles (“G/D”) transfer thermal energy of fuel burning to kinetic energy in an internal combustion engine <sup>102</sup>.

The main difference between FCEV and BEV is the source of electricity. Unlike FCEVs, BEVs utilize all its energy from a battery pack which is recharged externally at charging stations <sup>91</sup>.

### 2.2: FCEV, BEV and ICE applications in different vehicle types

As alluded to earlier, FCEVs have a wide range of vehicle application types due to its simplicity and flexibility. FCEVs and BEVs are both alternative solutions to replace conventional gasoline and diesel vehicles to promote zero-emission and sustainable transportation systems <sup>103</sup>. As shown in Figure 14, many countries have

introduced policies to ban internal combustion engine vehicles <sup>106</sup>. Using clean vehicles such as FCEVs and BEVs is an undeniable trend for the future.

Compared to FCEVs, the development and adoption of BEVs are more mature in most applications, but suffer from limitations due to battery weight and range issues <sup>104 105</sup>. As shown in Figure 15, BEVs real world ranges typically have a large discount compared with its official range in lab conditions. Battery performance is also easily affected by external environment. As

shown in Figure 16, low temperatures have large effects on driving ranges <sup>106</sup>.

Additionally, fuel cell vehicles offer a refueling experience similar to a conventional IC vehicle - there

is no need for battery charging infrastructure, which can be difficult to implement at multi-unit dwellings (apartment buildings) and along highways <sup>94</sup>. The full commercialization of the BEV and its charging

infrastructure will lead to an impact on the grid system. As predicted by the UK National Grid, the power demand of BEVs will be around 45 TWh in 2050, representing around 10% of the power demand of the whole country <sup>106</sup>.

**Figure 14. Planned ban on pure internal combustion engine vehicles <sup>106</sup>**

Country	Year to Ban Pure ICEVs
UK	2040
France	2040
Germany	2040 (tentative)
Spain	2040
Netherland	2025
Canada	2040
India	2030

**Figure 15. BEVs range <sup>106 334</sup>**







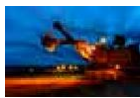
Model	Official range (km)	Real world range (km)
NISSAN Leaf 30kwh	270	199
Volkswagen e-Golf	299	232
BMW i3 120Ah	358	257
Renault Zoe Z.E. 40	402	299
Tesla Model S 75D	489	391
BYD Qin EV450	480	400

**Figure 16. Temperature affects battery performance\* <sup>106</sup>**

Temperature (oC)	Distance range (km)
-15	207
-5	225
5	272
15	283**

Note: \*taking Renault Zoe Z.E. 40 for experiment  
 \*\*Real world range baseline

Figure 17. Summary of FCEV, BEV and ICE application status in each vehicle type

Example Model	Features <sup>107 108 109</sup>	FCEV <sup>108</sup>	BEV <sup>1</sup>	ICE
Passenger vehicles	 Designed to carry people, usually less than 7 seats	Commercially available	Accepted	Incumbent
<b>Commercial Vehicle</b>				
Bus	 Used for urban public transportation with 30-50 seats	Commercially available	Accepted	Incumbent
Van/Light-duty vehicles	 Used in inner-city logistics with Gross Vehicle Weight (“GVW”) less than 4.5 metric tons (payload <3 tons, corresponding to US Classes 1 and 2)	Demonstration	Accepted	Incumbent
Medium-duty trucks	 Used in inner and inter-city logistics, with GVW of 4.5-12 metric tons (payload 3-8 tons, corresponding to US Classes 3-6)	Demonstration	Demonstration <sup>338</sup>	Incumbent
Heavy-duty trucks	 Used in long-haul transportation with GVW larger than 12 metric tons (payload >8 tons, corresponding to US Classes 7-8)	Prototype	Demonstration <sup>339</sup>	Incumbent
<b>Special-use vehicles</b>				
Forklift	 An industrial truck used to lift and move materials over short distances	Commercially available	Incumbent (Indoor Warehouse)	Incumbent (Outdoor Warehouse)
Mining truck	 Off-road dump trucks designed for mining operations	Prototype	Prototype	Incumbent

**Application status:**

- **Prototype:** no product is launched, companies are in the product development phase
- **Commercially available:** product is launched and sold publicly. And it is proved to be commercially viable
- **Incumbent:** Products are used in most scenarios
- **Demonstration:** prototype or product is tested or demonstrated on a small scale
- **Accepted:** Products are generally accepted by end customers

FCEVs have been in various stages of prototyping and production since the early 2000s. Since then, with years of efforts made by governments and industry players, almost all vehicle types have fuel cell products

or prototypes, as shown below in Figure 17. For passenger vehicles, FCEVs are commercially available but have low adoption due to limited refueling infrastructure as well as high acquisition cost <sup>110</sup>. In the commercial

vehicle sector, forklifts, buses, light and medium-sized trucks have been on the forefront of fuel cell commercial vehicle applications <sup>111</sup>.

Notes: 1. Due to limitations on payload and range, BEVs are not "full service" vehicles yet

**Figure 18. Summary of fuel cell passenger vehicle application status**

	China	Japan	Europe	US
<b>Typical products available</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SAIC launched a plug-in hybrid FC version of Roewe 950 in 2016</li> <li>Grove, a Chinese fuel-cell vehicle brand, launched China's first fuel-cell passenger vehicle in 2019</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota Mirai</li> <li>Honda Clarity (leased only)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota Mirai</li> <li>Honda Clarity (leased only)</li> <li>Hyundai Tucson</li> <li>Hyundai Nexo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota Mirai</li> <li>Honda Clarity (leased only)</li> <li>Hyundai Tucson</li> <li>Hyundai Nexo</li> </ul>
<b>Application status</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2018, no sales of fuel-cell passenger vehicles were achieved in China <sup>114</sup></li> <li>50 plug-in hybrid fuel cell version of Roewe 950 were used in a demonstration operation of UN project and car-sharing services in Shanghai <sup>119</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>575 and 766 Toyota Mirai were sold in Japan in 2017 and 2018 respectively <sup>114</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>132 and 160 Toyota Mirai were sold in Europe in 2017 and 2018 <sup>113</sup></li> <li>Clever Shuttle and BeeZero are car sharing companies operating with 20 and 50 FCEVs <sup>116</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1700 and 1838 Toyota Mirai was sold in 2017 and 2018 respectively <sup>113</sup></li> </ul>
<b>Level of application</b>				

**Level of application:**

Indicated by no. of annual newly registered FC passenger vehicle, estimated via sales <sup>113</sup> of typical models, e.g. Mirai and Nexo

<100      100-500      >500





**Fuel cell passenger vehicles (Figure 18)**

The first commercially assembly-line produced hydrogen fuel cell passenger vehicle can be traced back to the Toyota Mirai in 2014 <sup>117</sup>. However, adoption has been limited to hundreds or low thousands of units per year in US, Europe, and Japan <sup>113</sup>.

Fuel cell passenger vehicles offer a zero-emission solution with similar usability compared to conventional vehicles. Typical fuel-cell passenger vehicle only needs 3-5 min to refuel and can travel 250-350 miles on a single tank, which is comparable to ICE vehicles <sup>112</sup>.




Early adopters are mainly leasing companies, fleet operators <sup>115</sup>, government agencies and corporate customers, with few individual customers, limited mainly by a lack of widespread hydrogen infrastructure. As infrastructure increases, however, it is expected that private consumption will increase in the future <sup>118</sup>.

**Figure 19. Summary of fuel cell electric bus (“FCEB”) application status**

	China	Japan	Europe	US
<b>Application status and cases</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2003, 3 Mercedes-Benz hydrogen fuel cell buses were first tested in Beijing<sup>124</sup></li> <li>In 2017, the first commercially operated fuel cell bus line in China was put into operation in Foshan Yunfu by Feichi Bus<sup>125</sup>.</li> <li>As of 2018, there are over 200 FCEBs operating in cities including Shanghai, Foshan, Zhangjiakou and Chengdu<sup>120</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2018, Toyota launched its first FCEB, Sora, and is expected to introduce over 100 buses within the Tokyo metropolitan area, ahead of the Olympic and Paralympic Games Tokyo 2020<sup>123</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The CHIC* project, regarded as the first step of FCEBs application, deployed 60 buses in 8 countries during 2010-2016<sup>86 73</sup></li> <li>The JIVE** project(Phase1) starting from 2017, will deploy 139 FCEBs in 5 countries with tech support from Ballard and other partners, of which 56 are in UK and 51 are in Germany<sup>73</sup></li> <li>Combing phase 2, JIVE will deploy nearly 300 FCEBs in Europe by the early 2020s<sup>73</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>As of April 2019, there were 35 FCEBs were in active demonstrations in US<sup>42</sup>, funded by NFCBP***, TIGGER**** and other government programs, in order to identify improvement to optimize reliability and durability of FCEBs</li> </ul>
<b>Major OEMs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Foton AUV</li> <li>Yutong</li> <li>Yong Man</li> <li>Zhongtong</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TOYOTA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Van Hool</li> <li>Solaris</li> <li>Wrightbus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>New Flyer</li> <li>ENC Group</li> </ul>
<b>Level of application</b>				

**Level of application:**

Indicated by estimated no. FCEB in operation.<sup>120 121 42</sup>

 <50     
  50-200     
  >200

**Fuel cell electric buses (Figure 19)**

Currently, FCEBs are one of the most widely adopted fuel cell applications. This is due to most of them being publically operated, as well as predictable operation patterns<sup>109</sup>. Buses typically feature regular, predictable routes, which requires few refueling stations. Additionally, bus operators are significantly influenced

by actions taken by public authorities, making it a proper choice for early application of fuel cell technology. Moreover, FCEB acts as a highly-visible, green-society initiative of public transportation.<sup>121 122</sup>





However, challenges remain for widespread adoption of FCEBs. Firstly, the price of hydrogen is still expensive

if compared to fossil fuels<sup>121</sup>. Secondly, although fuel cell system are generally reliable, technical problems may arise due to the technology being relatively new compared to ICEs, which may cause inefficiencies for operators; the same may apply to maintenance and parts replenishment, although these issues are forecasted to be alleviated as adoption matures<sup>121</sup>.

\*CHIC: The Clean Hydrogen in European Cities project; \*\*JIVE: Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe; \*\*\*NFCBP: National Fuel Cell Bus Program; \*\*\*\*TIGGER: Transit Investments for Greenhouse Gas and Energy Reduction






**Figure 20. Summary of fuel cell light and medium-duty truck application status**

	China	Japan	Europe	US
<b>Application status and cases</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>STNE, the largest fuel cell vehicle operator in China, now operates ~500 FCEVs to serve logistics and e-commerce companies like JD and STO Express in Shanghai <sup>126</sup></li> <li>500 fuel cell trucks with 3.5 ton payload and a range ~330 km were deployed in Shanghai in 2018. The truck was produced by Dongfeng with Ballard fuel cell stack technology. Shanghai Sinotran operates the fleet for intra-city deliveries. <sup>136</sup> Another 600 fuel cell trucks were announced to be deployed on April 2019. <sup>140</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2017, Toyota and 7-Eleven convenience stores reached an agreement to test and deploy fuel cell mid-size delivery trucks starting from 2019 <sup>137</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DHL is expected to deploy 100 “H2 Panel Vans” in Germany in 2020; the van is a 4.25-ton commercial fuel cell vehicles with a range of up to 500 km, manufactured by truck maker StreetScooter <sup>127</sup></li> <li>H2ME* is the major efforts to support the application of FC vehicle in EU that ~900 of Renault Kangoo FC vans will be deployed by 2021 and 170 have been deployed <sup>88</sup> for fleet and business operation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuel Cell Hybrid Electric Delivery Van Project is a demonstration project led by DOE to increase commercial viability of electric drive medium-duty trucks. Currently 17 fuel-cell vans are in collaboration with UPS <sup>128</sup></li> <li>FedEx started to test 20 fuel cell extended-range battery electric delivery van in California and Tennessee in 2014 <sup>138</sup> and launched another test project with Workhorse and Plug Power for fuel cell delivery van in 2018 <sup>139</sup></li> </ul>
<b>Major OEMs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Saic Maxus</li> <li>Feichi Bus</li> <li>Dongfeng Trucks</li> <li>Zhongtong Bus</li> <li>Foton</li> <li>Aoxin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Renault</li> <li>StreetScooter</li> <li>Mercedes-Benz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Workhorse</li> <li>UPS</li> <li>FEDEX</li> </ul>
<b>Level of application</b>				

**Level of application:**

Indicated by estimated no. fuel cell light and medium-duty truck in operation

 <100     
  100-500     
  >500

**Fuel cell light and medium-duty trucks (Figure 20)**

There are a variety of activities surrounding deployment of fuel cell light and medium-duty trucks among major markets studied, which offers an interesting comparison to buses, as most of these deployments are privately operated (albeit with government support) <sup>130</sup>.





Fuel cell technology is regarded as a strong contender for inner and inter-city logistics for several reasons.

From a technology standpoint, fuel cell trucks typically exceed 150 km in range, enabling them to accomplish most of the inner- and inter-city deliveries of goods <sup>131</sup>. Secondly, fuel cell trucks can meet stricter environmental requirement and noise regulations in urban areas, which encourages the government and fleet operators to accelerate its adoption <sup>132</sup>. Thirdly, compared with BEVs, FCEV have very short refueling times, which greatly improves the operational efficiency of a logistics fleet <sup>133</sup>.

Freight transport accounts for large portion of total traffic flow in urban areas (e.g., 8-15% <sup>129</sup> in Europe), making fuel cell technology a promising way to reduce emissions. It is expected that in the near future, the application of fuel cell light and medium truck in inner- and inter-city logistics will continue to grow, especially in China where development of commercial infrastructure is proceeding at a rapid pace <sup>134 135</sup>.

\*H2ME: Hydrogen Mobility Europe

**Figure 21. Summary of fuel cell heavy duty truck application status**

	China	Japan	Europe	US
<b>Products available and in pipeline</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2017, Sinotruk announced the first heavy-duty truck in China, a fuel cell port tractor<sup>141</sup></li> <li>Foton Motor Group is developing a prototype of a fuel cell heavy duty truck<sup>145</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota launched a Class 8 drayage truck in 2017<sup>151</sup></li> <li>No public deployment is observed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESORO launched world's first FC truck in the 34t category in 2017<sup>153</sup>.</li> <li>The H2-Share* project, starting from 2017 to 2020, will build and test a 27 ton rigid truck developed by VDL in Europe<sup>149</sup>;</li> <li>In 2018, Hyundai announced plans to provide 1,000 FC heavy trucks to H2 Energy, a Swiss company, from 2019 to 2023<sup>150</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fast Track Fuel Cell Truck project and Port of Los Angeles Shore-to-Store project were two representative projects in US to promote the application of fuel cell heavy duty truck, deploying 10 and 5 units respectively<sup>144</sup>.</li> <li>Nikola Motor, a startup truck company in US, is planning to launch a Hydrogen fuel semi truck, Nikola Tre, which is expected to entry mass production in 2023. Anheuser-Busch has ordered 800 units<sup>142</sup>.</li> </ul>
<b>Major OEMs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SINOTRUK</li> <li>Foton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TOYOTA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>E-Truck</li> <li>ESORO</li> <li>VDL</li> <li>Hyundai</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>KENWORTH</li> <li>Nikola</li> <li>TOYOTA</li> </ul>
<b>Level of application</b>				

**Level of application:**

Indicated by stages of fuel cell heavy duty truck application

-  Prototype
-  Demonstration

**Fuel cell heavy duty truck (Figure 21)**

Considering the high pollution and greenhouse gas emissions<sup>154</sup>, heavy-duty trucks are regarded as a promising segment to develop zero-emission vehicles. The development of fuel cell heavy duty trucks are relatively lagging behind other applications. Most major OEMs are in the R&D stage, and only limited products are launched or being tested<sup>152</sup>.

The relatively slow development of fuel cell heavy duty truck can be attributed to a combination of high vehicle cost, high hydrogen cost (to carry heavy loads over long distances) and limited refueling infrastructure<sup>146 148</sup>.

On the positive side, fuel cell heavy duty truck could offer faster refueling times compared with battery electric trucks, which is essential for fleets to reduce the downtime in their daily operations. FC heavy duty trucks are also able to travel longer distances

than battery electric trucks with similar specifications<sup>148</sup>. Fuel cell technology is becoming increasingly mature and optimized for heavy duty applications. Ultimately, fuel cell heavy duty truck could provide range and refueling time closed to conventional vehicles, while also benefiting from zero-emissions<sup>147</sup>. This provides fuel cell heavy duty vehicle a great potential to displace diesel and battery electric heavy duty truck in the long term.

\*H2-Share:Hydrogen Solutions for Heavy-duty transport Aimed at Reduction of Emissions in North West Europe

**Figure 22. Summary of fuel-cell forklift application status**

	China	Japan	Europe	US
<b>Application cases</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The Foshan government in the Guangdong province plans to introduce 5,000 FC forklifts by 2025, although this is still at an early planning stage<sup>155</sup>;</li> <li>Weichai has established a JV with Ballard Power Systems to develop fuel cells being utilized in forklift applications<sup>160</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2018, Toyota adopted 20 FC forklift trucks in its Motomachi factory, where it is also constructing a hydrogenation station<sup>156</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Viessmann, a leading manufacturers of heating systems, announced that it had adopted a hydrogen forklift truck to undertake every day warehouse operations in 2013<sup>157</sup>;</li> <li>Carrefour in Vendin-Le-Vieil, France, has purchased 137 forklifts from Still to operate in Carrefour’s logistics base<sup>159</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In 2014, Walmart began to cooperate with Plug Power to invest in forklifts. From 2014 to 2018, FC forklifts in Walmart warehouses has increased from 1,700 to 8,000<sup>50</sup>;</li> <li>In April 2017, Amazon announced partnership with Plug Power planning to deploy fuel cell forklift in its 11 warehouses<sup>50</sup>.</li> </ul>
<b>Major OEMs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>N/A</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TOYOTA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>STILL</li> <li>Linde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hyster</li> <li>Linde</li> </ul>
<b>Application status</b>				

**Level of application:**

Indicated by estimated no. fuel cell forklifts in operation<sup>42</sup>.

<100     
 100-1000     
 >1000

**Fuel cell forklifts (Figure 22)**

Forklifts are a frontier application of fuel cell technology. Firstly, forklifts have advantages over other vehicles types in terms of lower technology requirement and infrastructures. The required maximum output power of forklift is only one tenth of passenger vehicles<sup>50</sup>. In addition, since forklifts primarily operate in small areas such as warehouses, only limited hydrogen refueling stations are required. Thirdly, FC forklifts have advantages over

other types of forklift. Traditional electric batteries’ voltage drops as they discharge, slowing forklifts over time and causing a productivity decline in the process. Electric forklifts’ speed drops an average 14% in the second half of an eight-hour shift<sup>158</sup>, while fuel-cell forklifts can achieve a steady “pick rate”. Finally, since FC vehicles have no polluting emissions, forklifts are suitable in enclosed warehouses for industry applications such as food and beverage<sup>50</sup>.

FC forklifts are in a commercial stage, especially in the US, where FC forklift ownership is over 25,000<sup>42</sup>. In China, usage of FC forklifts is relatively limited now, but a variety of companies have begun to conduct related development of such vehicles, which has been supported by regulations from district governments<sup>161,162</sup>.

### Fuel cell application status in mining trucks

Mining companies facing significant decarbonization challenges are gradually gaining awareness of fuel cell mining trucks as an alternative zero-emission solution. Compared to conventional diesel unit and battery electric vehicle, fuel cell mining equipment have advantages in the following aspects:

- Theoretically, it could achieve the same mobility, power and safety performance as a diesel vehicle; while it enjoys the same environmental cleanliness as a battery vehicle and can be charged in shorter time for longer distances <sup>163</sup>
- As opposed to diesel units, fuel cell mining equipment can avoid producing harmful emissions

for miners in an underground environment <sup>109</sup>

However, there are limited FC mining truck products available in the market now and no wide-spread demonstration deployment, indicating the development of FC mining truck is still in an early stage. Several companies are working on the development of FC mining truck. For example, in China, Weichai Group reached a cooperation with several industry partners to develop 200 ton FC mining trucks in 2018 <sup>164</sup>. In US, Anglo American is also working on new mining technologies including FC mining truck <sup>165</sup>. Further technical research and government support are required to develop the application of FC mining truck <sup>109</sup>.

### 2.3 Conclusion

As seen in this section, FCEVs have a wide range of vehicle application types due to its simplicity and flexibility. We have highlighted a variety of vehicle types – from passenger cars to forklifts – in this section, and have shown how each vehicle type is gaining adoption in various markets around the globe.

So how are fuel cell vehicles actually being used by public and private companies? What are the actual and total costs associated with running such operations? How will this change in the future as technology continue to mature? Let us explore these pertinent questions in the next section.

**ANEXO 3**  
**NORMATIVA INEN 2203**

# *Republic of Ecuador*

## ≠ EDICT OF GOVERNMENT ±

In order to promote public education and public safety, equal justice for all, a better informed citizenry, the rule of law, world trade and world peace, this legal document is hereby made available on a noncommercial basis, as it is the right of all humans to know and speak the laws that govern them.



NTE INEN 2203 (2000) (Spanish): Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la concentración de emisiones de escape en condiciones de marcha mínima o "Ralenti". prueba estática

BLANK PAGE



PROTECTED BY COPYRIGHT

# INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

---

---

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA**

**NTE INEN 2 203:2000**

---

---

**GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS  
AUTOMOTORES. DETERMINACIÓN DE LA  
CONCENTRACIÓN DE EMISIONES DE ESCAPE EN  
CONDICIONES DE MARCHA MÍNIMA O “RALENTI”.  
PRUEBA ESTÁTICA.**

**Primera Edición**

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. AIR. MOTOR VEHICLES. DETERMINATION OF CONCENTRATION OF EXHAUST EMISSIONS IN MINIMUM SPEED CONDITIONS OR RALENTI STATIC TEST.

First Edition

---

DESCRIPTORES: Emisión de gases, protección del medio ambiente, calidad del aire, método de ensayo.  
MC 08.06-302  
CDU: 662.75  
CIU: 3530  
ICS: 13.040.50



<b>Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria</b>	<b>GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE EMISIONES DE ESCAPE, EN CONDICIONES DE MARCHA MÍNIMA O "RALENTI". PRUEBA ESTÁTICA.</b>	<b>NTE INEN 2 203:2000 2000-07</b>
--	--	--

### 1. OBJETO

1.1 Esta norma establece el método de ensayo para determinar la concentración de las emisiones provenientes del sistema de escape de vehículos equipados con motor de encendido por chispa, en condiciones de marcha mínima o "ralenti".

### 2. ALCANCE

2.1 Esta norma se aplica a los vehículos automotores cuyo combustible es gasolina.

### 3. DEFINICIONES

3.1 Para los efectos de esta norma se adoptan las definiciones contempladas en la NTE INEN 2204, y las que a continuación se detallan:

3.1.1 *Aislamiento electromagnético.* Característica del equipo de medición que impide la alteración en sus lecturas por causa de radiaciones electromagnéticas externas.

3.1.2 *Calibración de un equipo de medición.* Operación destinada a llevar un instrumento de medida alestado de funcionamiento especificado por el fabricante para su utilización.

3.1.3 *Motor de encendido por chispa.* Es aquel en el cual la reacción de la mezcla aire/combustible se produce a partir de un punto caliente, generalmente una chispa eléctrica.

3.1.4 *Gas patrón.* Gas o mezcla de gases de concentración conocida, certificada por el fabricante del mismo, y que se emplea para la calibración de equipos de medición de emisiones de escape.

3.1.5 *Autocalibración.* Es la rutina en la cual el equipo verifica el funcionamiento óptimo de todos sus componentes instrumentales y realiza una comparación con los patrones internos incorporados por el fabricante del mismo.

3.1.6 *Exactitud.* Grado de concordancia (la mayor o menor cercanía) entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

3.1.7 *Repetibilidad.* Grado de concordancia de resultados de sucesivas mediciones de la misma variable, realizadas en iguales condiciones de medida.

3.1.8 *Tiempo de calentamiento del equipo de ensayo.* Es el período en segundos entre el momento en que el equipo es energizado o encendido y el momento en que cumple con los requerimientos de estabilidad, para realizar la lectura de la variable.

3.1.9 *Tiempo de respuesta del equipo de medición.* Es el período en segundos que el equipo requiere para medir y entregar los resultados de los ensayos realizados.

3.1.10 *Sonda de prueba.* Tubo o manguera que se introduce a la salida del sistema de escape del vehículo automotor para tomar una muestra de las emisiones.

(Continúa)

DESCRIPTORES: Emisión de gases. Protección del medio ambiente. Calidad del aire. Método de ensayo.

#### 4. DISPOSICIONES GENERALES

**4.1** Los importadores y distribuidores de equipos de medición de emisiones deben obtener una certificación de cumplimiento, expedida por la casa fabricante o propietaria del diseño del equipo o de un laboratorio autorizado por ella y avalada por la autoridad competente del país de origen. El procedimiento de evaluación base para certificar los equipos de medición a ser utilizados debe cumplir con la International Recommendation OIML R 99.

**4.2** Los importadores y distribuidores están obligados a suministrar copia de la certificación establecida en el numeral 4.1, a quienes adquieran los equipos.

**4.3** La autoridad competente, podrá en cualquier momento verificar la legalidad de las certificaciones presentadas por los importadores y distribuidores, sobre el cumplimiento de los requisitos establecidos en esta norma, así como las características de funcionamiento de los equipos y procedimientos utilizados para determinar la concentración de emisiones de escape en condiciones de marcha mínima o "ralenti", prueba estática.

#### 5. MÉTODO DE ENSAYO

##### 5.1 Fundamento.

**5.1.1** El principio de operación se basa en la absorción de luz infrarroja no dispersa de gases para la determinación de hidrocarburos, monóxido y dióxido de carbono.

**5.1.1.1** El oxígeno se mide utilizando una celda de combustible (fuel cell). Esto no excluye el uso de equipos con otro principio de operación, siempre y cuando sean homologados.

##### 5.2 Equipos

**5.2.1** Ver numeral 4, Disposiciones Generales.

**5.2.2** Capacidad de autocalibración. Los equipos de medición deben tener incorporada la función propia de autocalibración, la cual se debe realizar automáticamente cada vez que el equipo es encendido, o manualmente cada vez que el usuario lo requiera.

**5.2.3** Los equipos de medición deben contar con un dispositivo de impresión directa de los resultados y de la identificación del vehículo automotor medido.

**5.2.4** Los equipos deben contar con un tacómetro para la medición de las revoluciones del motor.

**5.2.5** El equipo debe disponer de características de seguridad que garanticen la protección del operador.

##### 5.3 Calibración

**5.3.1** La calibración del equipo se debe realizar siguiendo estrictamente las especificaciones de frecuencia del fabricante del equipo. En caso que éstas no estén disponibles, la calibración se debe realizar, como máximo, cada tres meses.

**5.3.2** El equipo se debe calibrar luego de cada mantenimiento correctivo.

**5.3.3** La calibración anterior es independiente de la autocalibración automática que realiza el equipo cada vez que es encendido.

**5.3.4** El gas de calibración debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma ISO 6145. Este gas debe contar con una certificación emitida por el fabricante, de acuerdo con lo establecido en la norma anteriormente indicada.

(Continúa)

## **5.4 Procedimiento de medición**

**5.4.1** Antes de la prueba, realizar las verificaciones siguientes:

**5.4.1.1** Someter al equipo a un período de calentamiento y estabilización, según las especificaciones del fabricante.

**5.4.1.2** Retirar todo material en forma de partículas y eliminar toda sustancia extraña o agua, que se hayan acumulado en la sonda de prueba y que puedan alterar las lecturas de la muestra.

**5.4.1.3** Revisar que la transmisión del vehículo esté en neutro (transmisión manual) o parqueo (transmisión automática).

**5.4.1.4** Revisar que el control manual del ahogador (choque), no se encuentre en operación, y que los accesorios del vehículo (luces, aire acondicionado, etc.), estén apagados.

**5.4.1.5** Revisar en el vehículo que el sistema de escape se encuentre en perfectas condiciones de funcionamiento y sin ninguna salida adicional a las del diseño que provoque dilución de los gases de escape o fugas de los mismos. Las salidas adicionales a las contempladas en el diseño original no deben ser aceptadas, aunque éstas se encuentren bloqueadas al momento de la prueba.

**5.4.1.6** Si el vehículo no cumple con las condiciones establecidas en el numeral 5.4.1.5, la prueba no se debe realizar hasta que se corrijan aquellas.

**5.4.1.7** Revisar que el nivel de aceite en el cárter esté entre el mínimo y máximo recomendado por el fabricante, con el motor apagado y el vehículo en posición horizontal.

**5.4.1.8** Encender el motor del vehículo y verificar que se encuentre a la temperatura normal de operación.

### **5.4.2 Medición**

**5.4.2.1** Conectar el tacómetro del equipo de medición al sistema de encendido del motor y verificar las condiciones de marcha mínima o "ralenti".

**5.4.2.2** Con el motor a temperatura normal de operación y en condición de marcha mínima o "ralenti", introducir la sonda de prueba en el punto de salida del sistema de escape del vehículo. Tener la seguridad de que la sonda permanezca fija dentro del sistema de escape mientras dure la prueba.

**5.4.2.3** Esperar el tiempo de respuesta del equipo de medición dado por cada fabricante.

**5.4.2.4** Imprimir las lecturas estabilizadas de las emisiones medidas.

**5.4.2.5** Si, por diseño, el vehículo tiene doble sistema de escape, medir por separado cada salida. El valor del resultado final será la mayor lectura registrada.

## **5.5 Informe de resultados**

**5.5.1** El resultado final será la mayor lectura registrada de los valores de las lecturas obtenidas en el numeral 5.4.2.4.

**5.5.2** La institución que realiza la prueba debe emitir un informe técnico con los resultados de la misma, adjuntado el documento de impresión directa del equipo de medición.

*(Continúa)*

## APÉNDICE Z

### Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

- Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2204:1998 *Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina.*
- Norma ISO 6145-1:86 *Gas Analysis Preparation of Calibration Gas Mixtures. Dynamic Volumetric Methods - Part 1 - Methods of Calibration.*
- International Recommendation OIML R 99. *Instruments for measuring vehicle exhaust emissions. International Organization of Legal Metrology.*

### Z.2 BASES DE ESTUDIO

- Norma técnica colombiana ICONTEC 4230. *Gestión ambiental. Aire. Determinación de la concentración de emisiones de escape, en condiciones de marcha mínima o "ralenti".* Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá, 1997.

## INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

<b>Documento:</b> NTE INEN 2 203	<b>TÍTULO: GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE EMISIONES DE ESCAPE EN CONDICIONES DE MARCHA MÍNIMA O “RALENTI”. PRUEBA ESTÁTICA.</b>	<b>Código:</b> MC 08.06-302
-------------------------------------	---	--------------------------------

<b>ORIGINAL:</b> Fecha de iniciación del estudio: 1998-02-17	<b>REVISIÓN:</b> Fecha de aprobación anterior por Consejo Directivo Oficialización con el Carácter de por Acuerdo No.                      de publicado en el Registro Oficial No.                      de  Fecha de iniciación del estudio:
--	--

Fechas de consulta pública: de \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_

Comité Interno del INEN: GESTION AMBIENTAL

Fecha de iniciación: 1998-06-12

Fecha de aprobación: 1998-06-17

Integrantes del Comité Interno del INEN:

**NOMBRES:**

**INSTITUCIÓN REPRESENTADA:**

Dr. Ramiro Gallegos (Presidente)  
 Ing. Enrique Troya  
 Sr. Guido Reyes  
  
 Sr. Arturo Arévalo  
 Ing. Marco Narváez  
 Ing. Fernando Hidalgo (Secretario Técnico)

SUBDIRECTOR TÉCNICO  
 DIRECTOR DE PROTECCIÓN AL CONSUMIDOR  
 DIRECTOR DE DESARROLLO Y CERTIFICACIÓN DE CALIDAD  
 DIRECTOR DE ASEGURAMIENTO METROLÓGICO  
 DIRECCIÓN DE VERIFICACIÓN FÍSICA  
 DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN

Subcomité Técnico: GESTIÓN AMBIENTAL

Fecha de iniciación: 1998-09-24

Fecha de aprobación: 1999-02-25

Integrantes del Subcomité Técnico:

**NOMBRES:**

**INSTITUCIÓN REPRESENTADA:**

Ing. Jorge Jurado (Presidente)  
 Ing. Pablo Ubidia  
 Ing. Jorge Medina  
 Ing. Julio Salazar C.  
 Ing. Eduardo Espín  
 Ing. Jorge Mantilla  
 Ing. Ritha Burbano  
 Tlgo. Mauricio Barros B.  
 Ing. Kléver Chávez  
 Ing. Jorge Álvarez  
 Myr. Henry Aulestia C.  
 Myr. Carlos Naveda  
 Ing. Marco Oleas  
 Ing. Lucía Montenegro  
 Ing. Mauro González  
 Sr. Suck Jun Yun Kim  
 Ing. Pablo Durango  
 Ing. Edwin Tamayo  
 Ing. Fernando Hidalgo (Secretario Técnico)

MUNICIPIO METROPOLITANO DE QUITO  
 CINAE - AEADI  
 CONUEP/ING. QUÍMICA (U.C.)  
 PETROINDUSTRIAL  
 MIDUVI/SSA  
 CNNT  
 DIRECCIÓN NACIONAL DE HIDROCARBUROS  
 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA (CUENCA)  
 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE  
 MUNICIPIO METROPOLITANO DE QUITO  
 COMISIÓN DE TRANSITO DEL GUAYAS  
 COMISIÓN DE TRANSITO DEL GUAYAS  
 GENERAL MOTORS - OMNIBUS BB  
 FACULTAD DE ING. QUÍMICA (E.P.N)  
 DIRECCIÓN NACIONAL DE HIDROCARBUROS  
 AUTOMOTORES HINO  
 COLEGIO DE INGENIEROS QUÍMICOS DE PICHINCHA  
 COLEGIO DE INGENIEROS MECÁNICOS DE PICHINCHA  
 INEN

Otros trámites: ♦<sup>6</sup> Esta norma sin ningún cambio en su contenido fue **DESREGULARIZADA**, pasando de **OBLIGATORIA a VOLUNTARIA**, según Resolución de Consejo Directivo de 1998-01-08 y oficializada mediante Acuerdo Ministerial No. 03 612 de 2003-12-22, publicado en el Registro Oficial No. 248 del 2004-01-09

El Consejo Directivo del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2000-03-23

Oficializada como: Obligatoria | Por Acuerdo Ministerial No. 2000373 de 2000-07-03  
 Registro Oficial No. 115 de 2000-07-07

---

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E-8-29 y Av. 6 de Diciembre  
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2) 2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815  
Dirección General: [E-Mail: furresta @ inen.gOv.ec](mailto:furresta@inen.gOv.ec)  
Área Técnica de Normalización: [E-Mail: nOrmaliza ciOn @ inen.gOv.ec](mailto:nOrmaliza ciOn @ inen.gOv.ec)  
Área Técnica de Certificación: [E-Mail: c ertific a ciOn @ inen.gOv.ec](mailto:c ertific a ciOn @ inen.gOv.ec)  
Área Técnica de Verificación: [E-Mail: verificaciOn @ inen.gOv.ec](mailto:verificaciOn @ inen.gOv.ec)  
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: [E-Mail: inencati @ inen.gOv.ec](mailto:inencati @ inen.gOv.ec)  
Regional Guayas: [E-Mail: inenguayas @ inen.gOv.ec](mailto:inenguayas @ inen.gOv.ec)  
Regional Azuay: [E-Mail: inencuenc a @ inen.gOv.ec](mailto:inencuenc a @ inen.gOv.ec)  
Regional Chimborazo: [E-Mail: inenriObamba @ inen.gOv.ec](mailto:inenriObamba @ inen.gOv.ec)  
URL: [www.inen.gOv.ec](http://www.inen.gOv.ec)

## **ANEXO 4**

### **NORMATIVA INEN 2204**

# *Republic of Ecuador*

## ≠ EDICT OF GOVERNMENT ±

In order to promote public education and public safety, equal justice for all, a better informed citizenry, the rule of law, world trade and world peace, this legal document is hereby made available on a noncommercial basis, as it is the right of all humans to know and speak the laws that govern them.

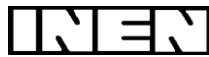


NTE INEN 2204 (2002) (Spanish): Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina



BLANK PAGE





# INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

---

---

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA**

**NTE INEN 2 204:2002  
(Primera Revisión)**

---

---

## **GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE GASOLINA.**

**Primera Edición**

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. AIR. MOTOR VEHICLES. EMISSIONS PERMITTED LEVELS PRODUCED BY  
GASOLINE ROAD MOVABLE SOURCES.

First Edition

---

DESCRIPTORES: Protección ambiental y sanitaria, seguridad, calidad del aire, emisiones de escapes de transportes,  
requisitos.

MC 08.06-401  
CDU: 621.43.068.4  
CIU: 3530  
ICS: 13.040.50

<b>Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria</b>	<b>GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE GASOLINA.</b>	<b>NTE INEN 2 204:2002 Primera revisión 2002-09</b>
--	---	---

### 1. OBJETO

1.1 Esta norma establece los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) de gasolina.

### 2. ALCANCE

2.1 Esta norma se aplica a las fuentes móviles terrestres de más de tres ruedas o a sus motores, según lo definido en los numerales 3.24 y 3.25.

2.2 Esta norma no se aplica a las fuentes móviles que utilicen combustible diferentes a gasolina.

2.3 Esta norma no se aplica a motores de pistón libre, motores fijos, motores náuticos, motores para tracción sobre rieles, motores para aeronaves, motores para tractores agrícolas, maquinarias y equipos para uso en construcciones y aplicaciones industriales.

### 3. DEFINICIONES

Para los efectos de esta norma se adoptan las siguientes definiciones:

3.1 **Año modelo.** Año que identifica el de producción del modelo de la fuente móvil.

3.2 **Área frontal.** Área determinada por la proyección geométrica de las distancias básicas del vehículo sobre su eje longitudinal el cual incluye llantas pero excluye espejos y deflectores de aire a un plano perpendicular al eje longitudinal del vehículo.

3.3 **Certificación de la casa fabricante.** Documento expedido por la casa fabricante de un vehículo automotor en el cual se consignan los resultados de la medición de las emisiones de contaminantes del aire (por el escape y evaporativas) provenientes de los vehículos prototipo seleccionados como representativos de los modelos nuevos que saldrán al mercado.

3.4 **Ciclo.** Es el tiempo necesario para que el vehículo alcance la temperatura normal de operación en condiciones de marcha mínima o ralentí. Para las fuentes móviles equipadas con electroventilador, es el período que transcurre entre el encendido del ventilador del sistema de enfriamiento y el momento en que el ventilador se detiene.

3.5 **Ciclos de prueba.** Un ciclo de prueba es una secuencia de operaciones estándar a las que es sometido un vehículo automotor o un motor, para determinar el nivel de emisiones que produce. Para los propósitos de esta norma, los ciclos que se aplican son los siguientes:

3.5.1 **Ciclo ECE-15 + EUDC.** Es el ciclo de prueba dinámico establecido por la Unión Europea para los vehículos livianos y medianos, de diesel o gasolina, definidos en la directiva 93/59/EEC.

3.5.2 **Ciclo FTP-75.** Es el ciclo de prueba dinámico establecido por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), para los vehículos livianos y medianos, de gasolina o diesel, y publicado en el Código Federal de Regulaciones, partes 86 a 99.

(Continúa)

DESCRIPTORES. Protección ambiental y sanitaria, seguridad, calidad del aire, emisiones de escapes de transportes, requisitos

**3.5.3 Ciclo transiente pesado).** Es el ciclo de prueba de estado transitorio establecido por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), para la medición de emisiones de motores diesel y gasolina utilizados en vehículos pesados y el cual se encuentra especificados en el Código Federal de Regulaciones de ese país, CFR, título 40, partes 86 a 99, subparte N.

**3.6 Dinamómetro.** Aparato utilizado para medir la potencia generada por un vehículo automotor o motor solo, a través de aplicaciones de velocidad y torque.

**3.7 Emisión de escape.** Es la descarga al aire de una o más sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso o, de alguna combinación de estos, proveniente del sistema de escape de una fuente móvil.

**3.8 Emisiones evaporativas.** Es la descarga al aire de una o más sustancias gaseosas, producto del funcionamiento normal del vehículo o de la volatilidad del combustible. Las emisiones evaporativas se desprenden desde varios puntos a lo largo del sistema de combustible de un vehículo automotor.

**3.9 Equipo de medición.** Es el conjunto completo de dispositivos, incluyendo todos los accesorios, para la operación normal de medición de las emisiones.

**3.10 Fuente móvil.** Es la fuente de emisión que por razón de su uso o propósito es susceptible de desplazarse propulsado por su propia fuente motriz. Para propósitos de esta norma, son fuentes móviles todos los vehículos automotores.

**3.11 Homologación.** Es el reconocimiento de la autoridad ambiental competente a los procedimientos de evaluación de emisiones o a los equipos o sistemas de medición o de inspección de emisiones, que dan resultados comparables o equivalentes a los procedimientos, equipos o sistemas definidos en esta norma.

**3.12 Informe técnico.** Documento que contiene los resultados de la medición de las emisiones del motor, operando en las condiciones contempladas en esta norma.

**3.13 Marcha mínima o ralentí.** Es la especificación de velocidad del motor establecidas por el fabricante o ensamblador del vehículo, requeridas para mantenerlo funcionando sin carga y en neutro (para cajas manuales) y en parqueo (para cajas automáticas). Cuando no se disponga de la especificación del fabricante o ensamblador del vehículo, la condición de marcha mínima o ralentí se establecerá en un máximo de 1 100 r.p.m.

**3.14 Masa máxima.** Es la masa equivalente al peso bruto del vehículo.

**3.15 Método SHED.** Procedimiento aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para determinar las emisiones evaporativas en vehículos de gasolina mediante la recolección de estas en una cabina sellada en la que se ubica el vehículo sometido a prueba. SHED son las siglas correspondientes al nombre de dicho método (Sealed Housing for Evaporative Determination). Los procedimientos, equipos y métodos de medición utilizados se encuentran consignados en el Código Federal de Regulaciones en los Estados Unidos, partes 86 y 99; o en las directivas 91/441 EEC y 93/59 EEC.

**3.16 Motor.** Es la principal fuente de poder de un vehículo automotor que convierte la energía de un combustible líquido o gaseoso en energía cinética.

**3.17 Peso bruto del vehículo.** Es el peso neto del vehículo más la capacidad de carga útil o de pasajeros, definida en kilogramos.

**3.18 Peso neto del vehículo.** Es el peso real solo del vehículo en condiciones de operación normal con todo el equipo estándar de fábrica, más el combustible a la capacidad nominal del tanque.

**3.19 Peso de referencia.** Es el peso neto del vehículo más 100 kg.

**3.20 Peso del vehículo cargado.** Es el peso neto del vehículo más 136,08 kg (300 lb).

(Continúa)

**3.21 Prueba estática.** Es la medición de emisiones que se realiza con el vehículo a temperatura normal de operación, en marcha mínima (ralentí), sin carga, en neutro (para cajas manuales) y en parqueo (para cajas automáticas).

**3.22 Prueba dinámica.** Es la medición de emisiones que se realiza con el vehículo o motor sobre un dinamómetro, aplicando los ciclos de prueba descritos en la presente norma.

**3.23 Temperatura normal de operación.** Es aquella que alcanza el motor después de operar un mínimo de 10 minutos en marcha mínima (ralentí), o cuando en estas mismas condiciones la temperatura del aceite en el cárter del motor alcance 75°C o más. En las fuentes móviles equipadas con electroventilador esta condición es confirmada después de operar un ciclo.

**3.24 Vehículo automotor.** Vehículo de transporte terrestre, de carga o de pasajeros, que se utiliza en la vía pública, propulsado por su propia fuente motriz.

**3.25 Vehículo o motor prototipo o de certificación.** Vehículo o motor de desarrollo o nuevo, representativo de la producción de un nuevo modelo.

## 4. CLASIFICACIÓN

Para los propósitos de esta norma, se establece la siguiente clasificación de los vehículos automotores:

**4.1** Según la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), la siguiente clasificación se aplica únicamente para los ciclos de prueba FTP-75 y ciclo transiente pesado:

**4.1.1 Vehículo liviano.** Es aquel vehículo automotor tipo automóvil o derivado de éste, diseñado para transportar hasta 12 pasajeros.

**4.1.2 Vehículo mediano.** Es aquel vehículo automotor cuyo peso bruto vehicular es menor o igual a 3 860 kg, cuyo peso neto vehicular es menor o igual a 2 724 kg y cuya área frontal no exceda de 4,18 m<sup>2</sup>. Este vehículo debe estar diseñado para:

**4.1.2.1** Transportar carga o para convertirse en un derivado de vehículos de este tipo

**4.1.2.2** Transportar más de 12 pasajeros

**4.1.2.3** Ser utilizado u operado fuera de carreteras o autopistas y contar para ello con características especiales.

**4.1.3 Vehículo pesado.** Es aquel vehículo automotor cuyo peso bruto del vehículo sea superior a 3 860 kg, o cuyo peso neto del vehículo sea superior a 2 724 kg, o cuya área frontal excede de 4,18 m<sup>2</sup>.

**4.2** Según La Unión Europea, la siguiente clasificación se aplica únicamente para el ciclo de prueba ECE-15 + EUDC.

**4.2.1 Categoría M.** Vehículos automotores destinados al transporte de personas y que tengan por lo menos cuatro ruedas.

**4.2.1.1 Categoría M1.** Vehículos automotores destinados al transporte de hasta 8 personas más el conductor.

**4.2.2 Categoría N.** Vehículos automotores destinados al transporte de carga, que tengan por lo menos cuatro ruedas.

**4.2.2.1 Categoría N1.** Vehículos automotores destinados al transporte de carga con una masa máxima no superior a 3,5 toneladas.

(Continúa)

## 5. DISPOSICIONES GENERALES

**5.1** Los importadores y ensambladores de vehículos deben obtener la certificación de emisiones expedida por la casa fabricante o propietaria del diseño del vehículo y avalada por la autoridad competente del país de origen, o de un laboratorio autorizado por ella. Los procedimientos de evaluación base para las certificaciones serán los establecidos para los ciclos FTP 75, ciclo transiente pesado ECE 15 + EUDC, SHED (EEC 91/441 y 93/59 EEC); según las características del vehículo.

**5.2** Los importadores y ensambladores están obligados a suministrar copia de la certificación de emisiones a quienes adquieran los vehículos.

**5.3** La autoridad competente podrá en cualquier momento verificar la legalidad de las certificaciones presentadas por los importadores y ensambladores sobre el cumplimiento de los requisitos establecidos en esta norma, así como las características de funcionamiento de los equipos y procedimientos utilizados para la medición de las emisiones de escape, en condición de marcha mínima o ralenti.

## 6. REQUISITOS

**6.1** Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralenti (prueba estática).

**6.1.1** Toda fuente móvil con motor de gasolina, durante su funcionamiento en condición de marcha mínima o ralenti y a temperatura normal de operación, no debe emitir al aire monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) en cantidades superiores a las señaladas en la tabla 1.

**TABLA 1. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralenti (prueba estática).**

Año modelo	% CO*		ppm HC*	
	0 - 1 500 **	1 500 - 3 000 **	0 - 1 500 **	1 500 - 3 000 **
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1 000	1 200

\* Volumen  
 \*\* Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

**6.2** Límites máximos de emisiones para fuentes móviles de gasolina. Ciclos FTP-75 y ciclo transiente pesado (prueba dinámica).

**6.2.1** Toda fuente móvil de gasolina que se importe o se ensamble en el país no podrá emitir al aire monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y emisiones evaporativas, en cantidades superiores a las indicadas en la tabla 2.

(Continúa)

**TABLA 2. Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina (prueba dinámica)\* a partir del año modelo 2000 (ciclos americanos).**

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso del vehículo cargado kg	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	CICLOS DE PRUEBA	Evaporativas g/ensayo SHED
Vehículos Livianos			2,10	0,25	0,62	FTP - 75	2
Vehículos Medianos	=< 3 860	=< 1 700	6,2	0,5	0,75		2
		1 700 - 3 860	6,2	0,5	1,1		2
Vehículos Pesados**	> 3 860 = < 6 350		14,4	1,1	5,0	Transiente pesado	3
	> 6 350		37,1	1,9	5,0		4

\* prueba realizada a nivel del mar  
 \*\* en g/bHP-h (gramos/brake Horse Power-hora)

**6.3** Límites máximos de emisiones para fuentes móviles de gasolina. Ciclo ECE-15+ EUDC (prueba dinámica).

**6.3.1** Toda fuente móvil con motor de gasolina no podrá emitir al aire monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y emisiones evaporativas, en cantidades superiores a las indicadas en la tabla 3.

**TABLA 3. Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina (prueba dinámica) \* a partir del año modelo 2000 (ciclos europeos)**

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso de Referencia (kg)	CO g/km	HC + NOx g/km	CICLOS DE PRUEBA	Evaporativas g/ensayo SHED
M1 <sup>(1)</sup>	=< 3 500		2,72	0,97	ECE 15 + EUDC	2
M1 <sup>(2)</sup> , N1		< 1 250	2,72	0,97		2
		> 1 250 < 1 700	5,17	1,4		2
		> 1 700	6,9	1,7		2

\* Prueba realizada a nivel del mar  
<sup>(1)</sup> Vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor y con un peso bruto del vehículo menor o igual a 2,5 toneladas  
<sup>(2)</sup> Vehículos que transportan más de 5 pasajeros más el conductor o cuyo peso bruto del vehículo exceda de 2,5 toneladas

## 7. MÉTODO DE ENSAYO

**7.1** Determinación de la concentración de emisiones del tubo de escape en condiciones de marcha mínima o ralentí.

**7.1.1** Seguir el procedimiento descrito en la NTE INEN 2 203.

(Continúa)

## APÉNDICE Z

### Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 203:1998 *Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la concentración de emisiones del escape, en condiciones de marcha mínima o ralentí.*

### Z.2 BASES DE ESTUDIO

Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2 056. *Metrología. Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales.* Quito, 1998.

Norma técnica colombiana ICONTEC 4230. *Gestión ambiental. Aire. Determinación de la concentración de emisiones de escape, en condiciones de marcha mínima o ralentí.* Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá, 1997.

EPA 94: *Code of Federal Regulations Protection of Environment 40. Part 86 (Revised as of July 1, 1996) Control of air pollution from new and in-use motor vehicles and new and in-use motor vehicle engines: certification and test procedures: 86.090-8 Emission standards for 1990 and later model year light - duty vehicles (Diesel and gasoline); 86.091.9 Emission standards for 1991 and later model year light - duty trucks (diesel and gasoline); 86-091-10. Emission standards for 1991 and later model year otto - cycle heavy - duty engines and vehicles (gasoline).* U.S Environmental Protection Agency, EPA. Washington D.C., 1996.

EURO II: *Community Directive (Directive 88/77/EEC). Regulación 49, gaseous pollutants. Truck and buses > 3,5 Ton. EEC regulation for small utilite records. Enforcement date: 01.10.1993 new models, 01.10.1994 new vehicles.* European Economic Community. Brussels. 1996.

Normas para la protección y el control de la calidad del aire: *Resolución 005 de 1995-01-09, Resolución 1619 de 1995-12-21, Resolución 1351 de 1995-11-14, Resolución 898 de 1995-08-23 - Adicionada por la Resolución 125 de 1996-03-19, Decreto 948 de 1995-06-05 - Modificado por el Decreto 2107 de 1995-11-30.* Ministerio del Medio Ambiente de la República de Colombia. Bogotá, 1996.

Decreto 2673: *Normas sobre Emisiones de fuentes móviles. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.* República de Venezuela. Caracas, 1998.

*Proyecto de reglamentación para control de emisiones para vehículos automotores en el Distrito Metropolitano de Quito.* Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana, CINAIE - Asociación Ecuatoriana Automotriz del Interior, AEADI, Quito, 1998.

*Exhaust Emissions, Standards, Regulations and Measurement of Exhaust emissions and Calculation of fuel consumption based on the Exhaust emission test - Passenger cars; Mercedes Benz.* Alemania, 1997.

*Vehicle Emissions Study, Kiyoshi Yuki - Overseas Regulation & Compliance Department, Engineering Administration Division, Toyota Motor Corporation.* Tokyo, 1995.



## INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

<b>Documento:</b> NTE INEN 2 204 (Primera Revisión)	<b>TÍTULO: GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIÓN PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE GASOLINA.</b>	<b>Código:</b> <b>MC 08.06-401</b>
---	---	---------------------------------------

<b>ORIGINAL:</b> Fecha de iniciación del estudio: 2000-09-11/2001-11-19	<b>REVISIÓN:</b> Fecha de aprobación anterior por Consejo Directivo 1998-12-08 Oficialización con el Carácter de OBLIGATORIA por Acuerdo No. 98163 de 1998 - 12 - 17 publicado en el Registro Oficial No. 100 de 1 999 - 01 - 04  Fecha de iniciación del estudio:
---	--

Fechas de consulta pública: de \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_

Comité Interno del INEN:  
 Fecha de iniciación: 2 000-09-11  
 Intrgrantes del Comité Interno del INEN. \_\_\_\_\_ Fecha de aprobación: 2 000-09-11

<b>NOMBRES:</b>	<b>INSTITUCIÓN REPRESENTADA:</b>
Dr. Ramiro Gallegos (Presidente) Ing. Enrique Troya  Sr. Guido Reyes  Fis. René Chanchay  Ing. Marco Narváez Ing. Rafael Aguirre Dra. Beatriz Cañizares Ing. Fernando Hidalgo (Secretario Técnico)	SUBDIRECTOR TÉCNICO DIRECCIÓN DE PROTECCIÓN AL CONSUMIDOR DIRECCIÓN DE DESARROLLO Y CERTIFICACIÓN DIRECCIÓN DE ASEGURAMIENTO METROLÓGICO DIRECCIÓN DE VERIFICACIÓN FÍSICA DIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN DIRECCIÓN DE VERIFICACIÓN ANALÍTICA DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN

### 2001-11-20

Dr. Ramiro Gallegos (Presidente)  Ing. Gustavo Jiménez  Tlgo. Francisco Cevallos  Arq. Francisco Ramírez Sr. Marco Proaño  Ing. Guillermo Layedra (Secretario Técnico)	DIRECTOR TÉCNICO DEL ÁREA DE SERVICIOS TECNOLÓGICOS DIRECTOR TÉCNICO DEL AREA DE NORMALIZACIÓN ÁREA DE SERVICIOS TECNOLÓGICOS: ENSAYOS DE CALIBRACIÓN ÁREA DE CERTIFICACIÓN: PRODUCTOS ÁREA DE SERVICIOS TECNOLÓGICOS: ENSAYOS FÍSICOS REGIONAL CHIMBORAZO
---	---

Otros trámites: Esta NTE INEN 2 204:2002 (Primera Revisión), reemplaza a la NTE INEN 2 204:1999

<sup>9</sup> La NTE INEN 2 204:2002 (Primera Revisión), sin ningún cambio en su contenido fue **DESREGULARIZADA**, pasando de **OBLIGATORIA a VOLUNTARIA**, según Resolución del Directorio del INEN No. 009-2010 de 2010-03-05, publicada en el Registro Oficial No. 152 del 2010-03-17.

El Consejo Directivo del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2002-04-17

Oficializada como: Obligatoria Registro Oficial No. 673 de 2002-09-30	Por Acuerdo Ministerial No. 02 368 de 2002-09-18
--	--



00000000 00000000 00 0 0000 00000000 0000 0 00000000 0 00000 00000 0 0000 00 00000 0000  
000000 000000000 0 000000 0000 000 000000 000 0 000000 0 00000 0000 000 0 000000  
000000000 0 00000000 000 0000000000000000 00000000000  
0000 0000000 0 0 0000 0000000000 000 00000000 0 000000000 0 000000 00000  
0000 0000000 0 0 00000000 000000 0 00 00000000000000000 00000 00000000000 0  
0000 0000000 00 0 000000000000 0000 000000000000 00000 0000000000 0  
0000 0000000 00 0 000000000 000000000000 0000 0000000000000000000000000000  
00000000 0 000000 0 00 00000000 00000000 000000000000  
00000000 00 00000 00000000 00000000 00000000 000000000000  
00000000 00 0000000000 00 00 000000 00000000 00 00 000000000000 0