

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS
FÍSICAS Y FORMALES**

**PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
DE INYECCIÓN DE HIDRÓGENO A UN MOTOR
DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Tesis presentado por el Bachiller
Jason Armando, Campos Pérez
Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electrónico

**AREQUIPA - PERÚ
2013**

AGRADECIMIENTOS

Para empezar, agradezco a mis padres que fueron la base de mi formación e ideales, supieron guiarme así como tolerarme, me motivaron a salir siempre adelante a cumplir mis metas y a enfrentarme a la vida siempre con la frente en alto.

Agradezco a mi hermana que a pesar de no vernos mucho tiempo siempre hemos compartido consejos.

Agradezco a mi bella esposa que a pesar de ser ambos jóvenes, juntos aprendemos superar los obstáculos, a entendernos y a caminar juntos por el camino de la vida. Agradezco su constante apoyo y aliento; y al mejor regalo que me pudo dar, el de ser padre.

A mi linda hija Camila que ahora eres el fruto de mi inspiración para alcanzar mis metas, gracias por darme de la oportunidad de ser tu padre y prometo siempre apoyarte y guiarte por la vida como a mi me enseñaron, eres una luz en nuestras vidas y cuando tengas edad suficiente para entender, al leer esto quiero que sepas que siempre estaré cuando me necesites y que espero hacer lo necesario para dejarte un mundo con oportunidades así como lo encontré yo.

Agradezco a la familia de mi esposa por haberme acogido en su familia como un miembro más.

Agradezco a las personas que fueron mis mentores desde el colegio así como en la universidad cada uno de ellos con sus aportes de conocimiento que ahora son herramientas para mi desarrollo profesional así como su apoyo incondicional para poder salir adelante.

INTRODUCCIÓN

La demanda energética en la actualidad es muy alta, y esto se ve cubierto en su mayoría por combustibles fósiles, tales como el carbón, petróleo y gas natural. Esta dependencia tiene repercusiones tanto económicas como ambientales. Por el lado económico cabe destacar que su producción centralizada en determinadas zonas del mundo, está gobernada por factores esencialmente políticos, lo que resulta en precios volátiles y elevados. Así mismo, en ausencia de alternativas viables, según unos estudios basados en el análisis de la producción y las reservas, se estima que las reservas durarían unos 40 años, si se mantiene el ritmo de extracción actual. De todas formas, se piensa que aún hay una gran cantidad de yacimientos por descubrir, que puede, incluso, superar a los ya localizados. Pero igualmente resultara en un encarecimiento progresivo hasta niveles tales que afecten el desarrollo económico global.

Desde el punto de vista ambiental, la combustión de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero, responsables del efecto de calentamiento global que sufre nuestro planeta. Algunos de los contaminantes generados en la combustión de los hidrocarburos son responsables de numerosas enfermedades pulmonares, mientras que otros, como el monóxido de carbono en altas concentraciones, aumentan la probabilidad de sufrir un infarto.

Por último, nos encontramos con el problema de que a medida que se vayan agotando las reservas de petróleo, el precio del mismo irá aumentando cada vez en mayor medida, alzando de ese modo a un puesto de privilegio a las energías renovables y a los combustibles ecológicos, como puede ser el hidrógeno. Será en ese momento cuando realmente existirá un consenso global para la adopción de un sistema energético global que sea sostenible. Es cierto que, afortunadamente, ya existen varias iniciativas en este aspecto desde hace ya varios años, pero han chocado con los intereses creados en torno a la industria del petróleo.

RESUMEN

El presente trabajo muestra el desarrollo de un sistema de generación de hidrógeno usando un electrolizador de celdas secas y un depósito donde se llena con la solución a descomponer que a la vez cumple la función de burbujeador como medida de seguridad, la alimentación eléctrica es hecha con una batería de auto de 12v, y cuenta con una unidad de control que se encarga de usar un control de la alimentación usando PWM con la finalidad de optimizar el consumo de energía, todo este sistema busca reemplazar la entrada de gasolina de una moto scooter o de un generador Eléctrico incluso de un automóvil de motor carburado, para realizar esta modificación de forma segura hay que colocar una válvula antiretorno con protección contra chispa para evitar que la chispa que se produce en el motor de combustión retorne y explote el hidrógeno acumulado en el .

Palabras clave: hidrógeno, celda seca, electrolizador, electrólisis, burbujeador, hho, antichispa

ABSTRACT

The present paper is about the develop of an hydrogen generator system using a dry cell electrolyzer and a tank with the liquid to decompose, this tank is almost used as a bubbler as a security method, the power source is done with a 12v car battery, and is using a control system that controls the power source with PWM so we can optimize the energy consuming, all this system is replacing the gas input of a motorbike or a electric generator, including a car with carburated motor, to get this modification secure we must use a flashback arrestor so we can protect the bubbler tank from the flame created in the engine that can blow up the bubbler tank

Keyword: hydrogen, dry cell, electrolyzer, electrolysis, bubbler, hho, flashback arrestor

ÍNDICE TEMÁTICO

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
1.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL PETRÓLEO	12
1.2. PETRÓLEO EN EL PERÚ	15
2. JUSTIFICACIÓN	23
2.1. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DEL VIENTO (CASO REAL)	25
3. ANTECEDENTES	28
4. HIPÓTESIS	32
5. OBJETIVOS	32
5.1. OBJETIVO GENERAL	32
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
6. VARIABLES E INDICADORES	33
6.1 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	34
6.2 INSTRUMENTOS DE VERIFICACIÓN	34
7. ALCANCES	34
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
1. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO	35
1.1. ESTRUCTURA ATÓMICA	35
1.2. PROPIEDADES FÍSICAS	36
1.2.1. ESTADO	36
1.2.2. OLOR, COLOR Y GUSTO	37
1.2.3. TOXICIDAD	37
1.2.4. DENSIDAD Y MEDIDAS RELACIONADAS	38
1.3. PROPIEDADES QUÍMICAS	40
1.3.1. REACTIVIDAD	40
1.3.2. ENERGÍA	42
1.3.3. INFLAMABILIDAD	44
1.3.4. FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO	53
2. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO	55
2.1. ELECTRÓLISIS DEL AGUA	58
2.2. REFORMADO DE HIDROCARBUROS	62
2.2.1. COMBUSTIBLES POTENCIALMENTE REFORMABLES	64
2.3. DESCOMPOSICIÓN TERMOQUÍMICA DEL AGUA	65

2.4. FOTOELECTRÓLISIS	67
2.4.1. PRODUCCIÓN FOTOBIOLOGICA	68
2.5. PRODUCCIÓN A PARTIR DE BIOMASA	68
2.5.1. GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA	69
2.5.2. PIRÓLISIS	69
2.6. PROCESOS INDUSTRIALES	69
3. ALMACENAJE DE HIDRÓGENO	70
3.1. GAS A ALTA PRESIÓN (CGH ₂)	72
3.1.1. TECNOLOGÍAS DE CILINDROS	76
3.2. HIDRÓGENO LIQUIDO (LH ₂)	78
4. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO	83
4.1. TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO EN FORMA GASEOSA	83
4.1.1. COMPRESORES PARA TUBERÍAS DE HIDRÓGENO	85
4.2. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO EN FORMA LIQUIDA	86
4.3. HIDROGENERAS	88
5. MOTORES DE HIDRÓGENO	94
5.1. BREVE HISTORIA SOBRE LOS MOTORES DE HIDRÓGENO	94
5.2. PROPIEDADES COMBUSTIBLES DEL HIDRÓGENO	97
5.2.1. AMPLIA GAMA DE INFLAMABILIDAD	97
5.2.2. BAJA ENERGÍA DE IGNICIÓN	98
5.2.3. PEQUEÑA DISTANCIA DE APAGADO	99
5.2.4. TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN ELEVADA	99
5.2.5. ALTA VELOCIDAD DE LLAMA	100
5.2.6. ALTA DIFUSIVIDAD	100
5.2.7. BAJA DENSIDAD	101
5.3. RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE	101
5.4. PROBLEMAS Y SOLUCIONES DEL PREENCENDIDO	105
CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	
1. DESCRIPCIÓN GENERAL	108
2. DIAGRAMA DE BLOQUES	109
2.1. VEHÍCULO DE PRUEBA	111
2.2. CELDA HÚMEDA Y SECA DE HIDRÓGENO	113
2.3. DEPÓSITO DEL ELECTROLITO	123
2.4. CONTROLADOR PWM	127
2.5. REGULADOR DEL SENSOR MAF	141
2.6. MÓDULO EFIE	145
3. INSTALACIÓN DEL SISTEMA HHO	147

CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

1. PRUEBAS	157
2. RESULTADOS	158
3. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA	162

CAPÍTULO V: ESTUDIO ECONÓMICO Y DE CONFIABILIDAD

1. ANÁLISIS DE COSTO DE VIDA	165
2. COSTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA	167



INDICE DE ILUSTRACIONES

1.1.	Una curva de producción del petróleo, como sugirió originalmente M. King Hubbert en 1956.	13
1.2.	Evolución de la producción de petróleo de los países que ya alcanzaron su pico (no incluye miembros de la OPEC ni Rusia). Realizado en el año 2003, la producción a partir de la línea vertical es una predicción.	13
1.3.	Obtención de hidrógeno por energía eólica con conexión a la red	26
1.4.	Obtención de hidrógeno por energía eólica sin conexión a la red	26
1.5.	Potencia instalada por continentes 2003 – 2007 (en MW)	27
1.6.	Capacidad instalada en el mundo 1997 – 2007 (Acumulado, en MW)	27
2.1.	Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gas	39
2.2.	Estados de la energía química	41
2.3.	Variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno, en relación a la temperatura	47
2.4.	Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente	48
2.5.	Detección de llama de hidrógeno	52
2.6.	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)	53
2.7.	Ejemplo de fragilización por hidrógeno	55
2.8.	Célula Electrolítica	59
2.9.	Procesos de transformación de energía basados en combustibles fósiles	62
2.10.	Célula semiconductor de fotoelectrólisis	67
2.11.	Cuadro comparativo Volumen y Peso de Combustibles	72
2.12.	Cuadro de Compresión y energía contenida en el hidrógeno	73
2.13.	Densidad del hidrógeno en función de la presión	74
2.14.	Cilindro de tipo constructivo III	77
2.15.	Tanque de almacenaje de hidrógeno líquido	80
2.16.	Tanque de almacenaje de hidrógeno líquido usado en automoción	81
2.17.	Botellas que contienen hidrógeno comprimido, transportadas en semirremolque	83
2.18.	Mapa de red de tuberías de gas natural en Europa	85
2.19.	Ejemplos de transporte por tierra	86

2.20.	Ejemplo de transporte por mar	87
2.21.	Hidrogenera situada en la Zona Franca (Barcelona) para abastecer a los autobuses del proyecto CUTE	92
2.22.	Esquema de hidrogenera propuesta por Linde	93
2.23.	Motor ideado por el reverendo W. Cecil en 1820	95
2.24.	Comparación de los volúmenes de la cámara de combustión y el contenido en energía para motores de hidrógeno y de gasolina.	103
3.1.	Diagrama de bloques	110
3.2.	Mapa de conexiones de la ECU, vehículo de prueba	111
3.3.	Motor Ga16DNE, vehículo de prueba	113
3.4.	Celdas de hidrógeno, Húmeda (FIGURA 1) y Seca (FIGURA 2)	114
3.5.	Placas de acero inox 316L, Superior (neutra), inferiores (electrodos)	118
3.6.	Goma separadora de alta resistencia	119
3.7.	Generador de Hidrógeno Final de 21 placas	121
3.8.	Prototipo 2 Generador de hidrógeno de 11 placas	122
3.9.	Esquema del deposito	124
3.10.	Hidróxido de potasio	126
3.11.	Circuito control PWM	129
3.12.	Etapas de control PWM	131
3.13.	Señales de Osciloscopio, PWM (verde) de 47% de ciclo de trabajo	132
3.14.	Señales de Osciloscopio, señal PWM de 10% de ciclo de trabajo	133
3.15.	Señales de Osciloscopio, señal PWM de 82% de ciclo de trabajo	134
3.16.	Regulador de Voltaje de 12V	135
3.17.	Power Mosfet HHO Driver	136
3.18.	Mosfet Driver	138
3.19.	Placa del controlador	139
3.20.	Módulo PWM	320
3.21.	Sensor MAF	141
3.22.	Ubicación del sensor MAF en la toma de aire	142
3.23.	Circuito para modificar la medición del MAF	143
3.24.	Presentación del modificador de lectura del MAF	144
3.25.	Módulo EFIE	146
3.26.	Esquema de Instalación	147
3.27.	Esquema Eléctrico Automotriz	148

3.28.	Relay Automotriz	149
3.29.	Sistema instalado	150
3.30.	Adecuada instalación del cableado bajo el capó	151
3.31.	Sistema HHO	152
3.32.	Generador en funcionamiento	153
3.33.	Ubicación del Controlador PWM	154
3.34.	Ubicación del Modificador MAF	155
3.35.	Relay Automotriz instalado	156
4.1.	Tendencia de consumo	161
4.2.	Placas metálicas con signos de corrosión y sarro	162
4.3.	Placa pulida y armado del generador	163



INDICE DE TABLAS

1.1.	Petróleo - producción: 148,000 barriles/día (2009 est.)	15
1.2.	Petróleo - consumo: 157,000 barriles/día (2009 est.)	16
1.3.	Petróleo - exportaciones: 68,640 barriles/día (2007 est.)	17
1.4.	Petróleo - importaciones: 133,100 barriles/día (2007 est.)	18
1.5.	Petróleo - reservas comprobadas: 470,8 millones barriles (1 January 2010 est.)	19
1.6.	Gas natural - producción: 3,39 miles de millones metros cúbicos (2008 est.)	20
1.7.	Gas natural - consumo: 3,39 miles de millones metros cúbicos (2008 est.)	21
1.8.	Gas natural - reservas comprobadas: 334,1 miles de millones metros cúbicos (1 January 2010 est.)	22
2.1.	Comparación de la densidad de Energía de varios combustibles	43
2.2.	Punto de Inflamación de algunos combustibles	45
2.3.	Valor de Temperatura de Autoencendido de diversos combustibles	48
2.4.	Número de octano de diferentes combustibles	49
2.5.	Categorías de cilindros	76
4.1.	Rendimiento de Galones por distancia recorrida antes de la mejora	158
4.2.	Rendimiento de Galones por distancia recorrida con la mejora instalada	160
5.1.	Rendimiento Anual del vehículo	165
5.2.	Estimación de consumo para el año 2013	166
5.3.	Comparación de rendimiento	166
5.4.	Costo de Materiales	167
5.5.	Costo de Instalación	168

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

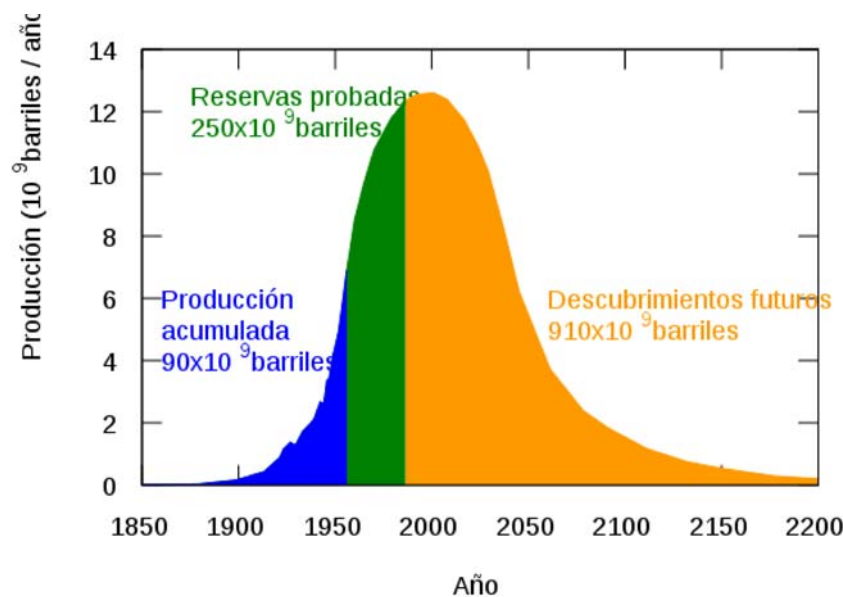
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL PETROLEO

Actualmente a nivel mundial la principal fuente de energía es el petróleo y sus derivados, estos son un tipo de recurso no renovable lo cual nos dice que en algún momento estos se agotaran iniciando una gran crisis energética a nivel mundial, ya que el aporte de estos fue el crecimiento y desarrollo de la humanidad por casi todo el siglo XX.

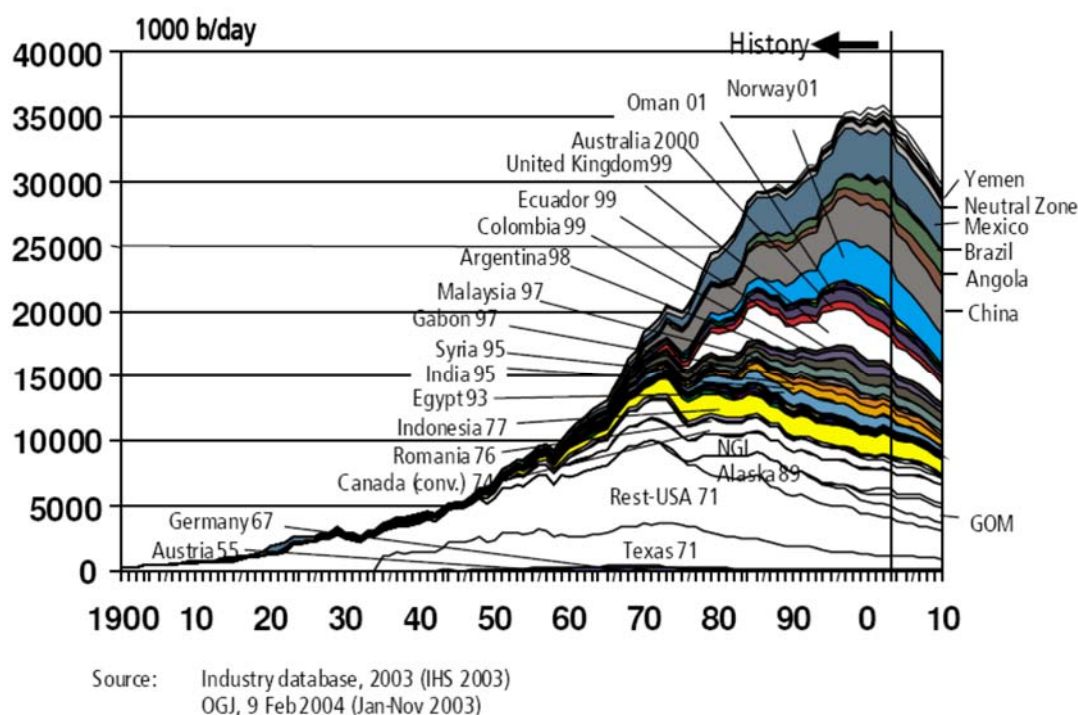
Existe una teoría que habla de este agotamiento; la Teoría del pico de Hubbert, la cual nos dice que la producción mundial de petróleo llegara a su cenit y después declinará tan rápido como creció, aun se discrepa sobre cuando será o fue el pico máximo de producción, en noviembre del 2010 la AIE (Agencia Internacional de Energía) hizo público que la producción máxima de petróleo se había alcanzado en el 2006, basándose en los datos actuales de producción, la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO en inglés), considera que el pico del petróleo habría ocurrido en el 2010.





GRÁFICA 1.1. Una curva de producción del petróleo, como sugirió originalmente M. King Hubbert en 1956.

Fuente: M. King Hubbert en 1956



GRÁFICA 1.2. Evolución de la producción de petróleo de los países que ya alcanzaron su pico (no incluye miembros de la OPEC ni Rusia). Realizado en el año 2003, la producción a partir de la línea vertical es una predicción.

Fuente: Industry database, 2003 (IHS 2003)

Lo cierto es que a medida que suba el precio del barril de petróleo, será difícil que baje, recordemos que en el año 2003 el precio del barril estaba alrededor de los \$37, sin embargo, actualmente esta alrededor de los \$140, y se estima que llegara en pocos años a los \$200, y que nunca baje, estos datos son críticos pues en nuestro país en desarrollo dependemos mucho de este combustible y las alzas que se presentan se manifiestan con incomodidad y preocupación por parte de la población.

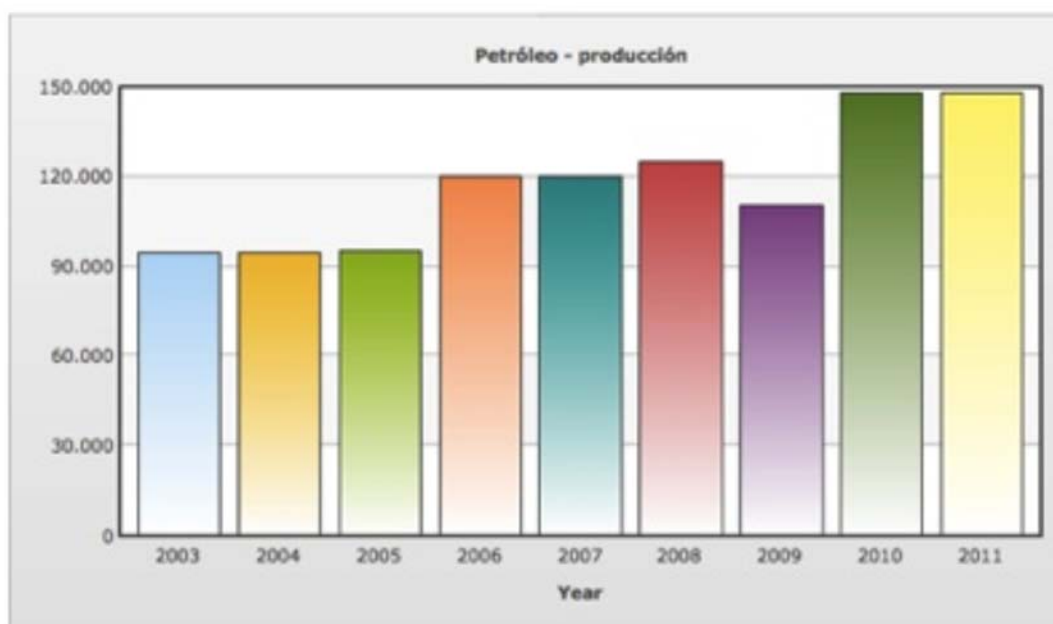
Es por este motivo que ya debemos pensar que haremos en el país cuando no se pueda satisfacer la demanda y las pocas reservas que tenemos que son explotadas por extranjeros cuyos barriles no se quedan en el país, la industria en el país se vera afectada pues la gran mayoría depende el petróleo, aunque algunas convirtieron sus procesos a gas natural, aun así también se agotará.



1.2. PETRÓLEO EN EL PERÚ

Nuestro país es un país importador y exportador de petróleo y gas natural, lo cual veremos a continuación la estadística en lo que respecta nuestra economía del petróleo, tomando datos de la producción, consumo, exportaciones e importaciones en barriles por día

TABLA 1.1. Petróleo - producción: 148,000 barriles/día (2009 est.)



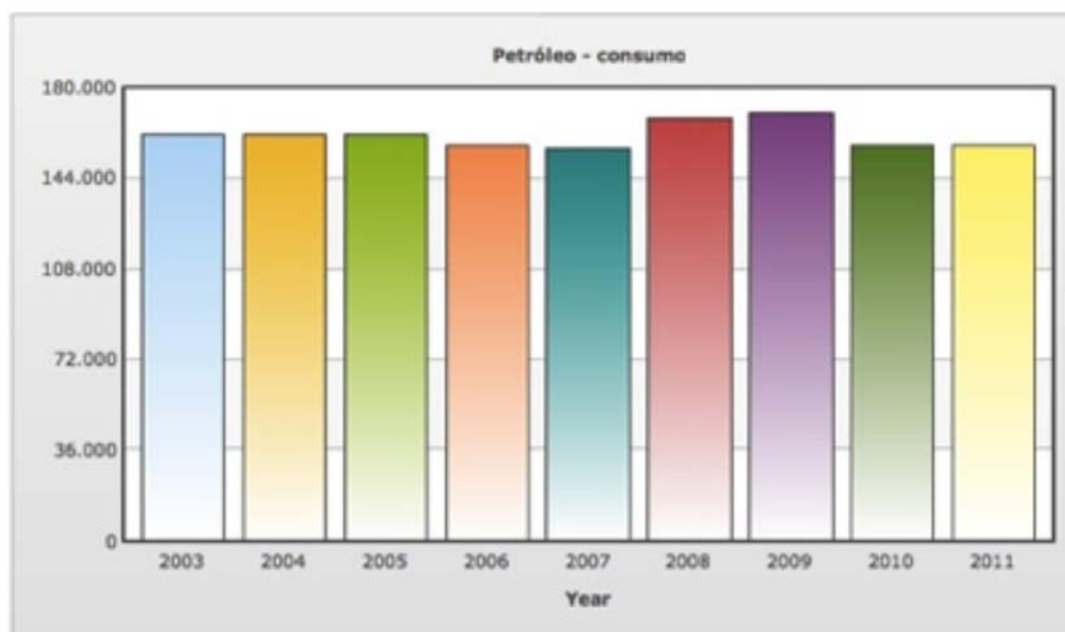
Año	Petróleo - producción	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2003	95.100	46		2001 est.
2004	95.100	46	0,00 %	2001 est.
2005	95.500	47	0,42 %	2004 est.
2006	120.000	50	25,65 %	2005 est.
2007	120.000	50	0,00 %	2005 est.
2008	125.000	48	4,17 %	2008 est.
2009	110.800	49	-11,36 %	2008 est.
2010	148.000	45	33,57 %	2009 est.
2011	148.000	45	0,00 %	2009 est.

Definición: Esta cifra es la cantidad total de petróleo producido en barriles por día. La discrepancia entre la cantidad de petróleo producido y / o importado y la cantidad consumida y / o exportada se debe a la omisión de cambios en el inventario, ganancias de refinería, y otros factores de

complicación.

Fuente: CIA World Factbook

TABLA 1.2. Petróleo - consumo: 157,000 barriles/día (2009 est.)

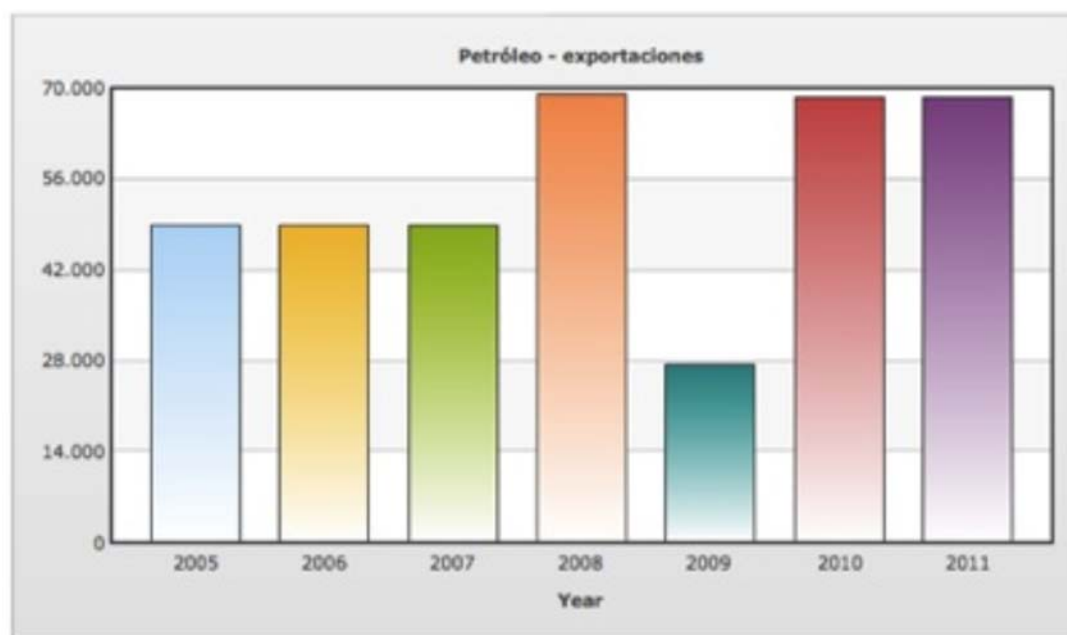


Año	Petróleo - consumo	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2003	161.000	62		2001 est.
2004	161.000	62	0,00 %	2001 est.
2005	161.000	62	0,00 %	2001 est.
2006	157.000	62	-2,48 %	2003 est.
2007	156.000	62	-0,64 %	2004 est.
2008	167.900	62	7,63 %	2006 est.
2009	170.000	62	1,25 %	2007 est.
2010	157.000	64	-7,65 %	2009 est.
2011	157.000	63	0,00 %	2009 est.

Definición: Esta cifra es la cantidad total de petróleo consumido en barriles por día. La discrepancia entre la cantidad de petróleo producido y / o importado y la cantidad consumida y / o exportada se debe a la omisión de cambios en el inventario, ganancias de refinería, y otros factores de complicación.

Fuente: CIA World Factbook

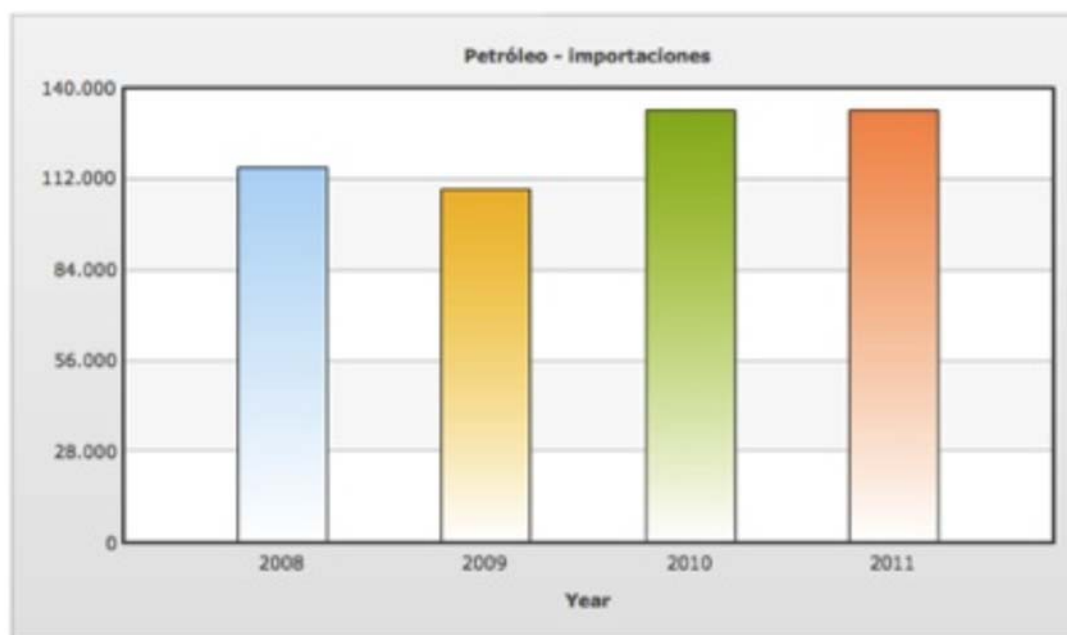
TABLA 1.3. Petróleo - exportaciones: 68,640 barriles/día (2007 est.)



Año	Petróleo - exportaciones	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2005	49.000	35		2004 est.
2006	49.000	41	0,00 %	2004 est.
2007	49.000	44	0,00 %	2004 est.
2008	69.090	70	41,00 %	2005 est.
2009	27.390	82	-60,36 %	2007 est.
2010	68.640	74	150,60 %	2007 est.
2011	68.640	73	0,00 %	2007 est.

Definición: Esta cifra es el total del petróleo exportado en barriles por día, incluyendo el petróleo crudo y sus derivados.

Fuente: CIA World Factbook

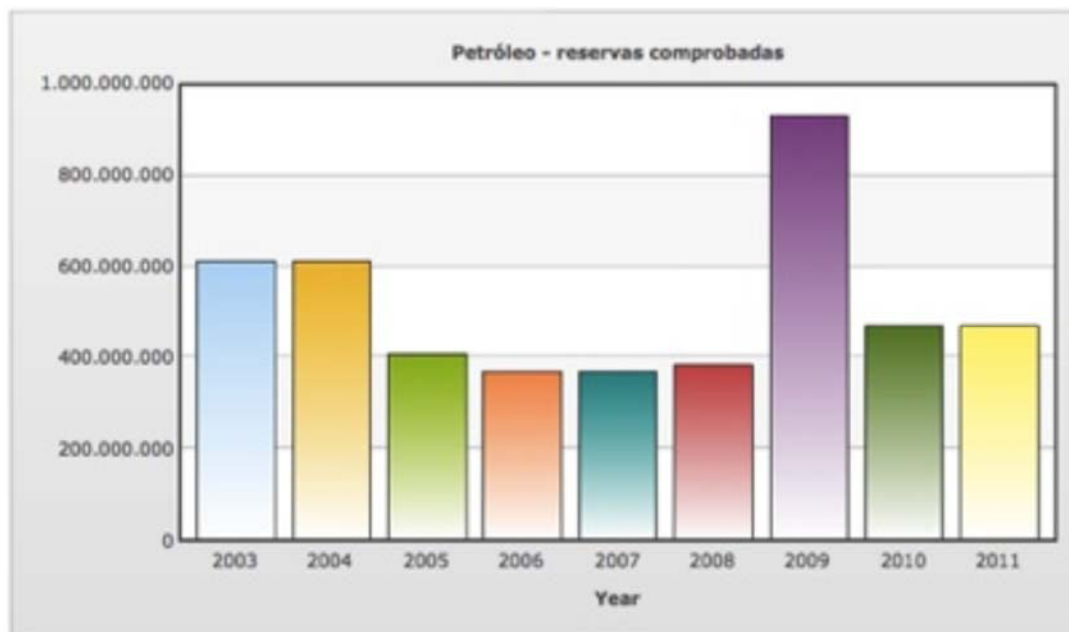
TABLA 1.4. Petróleo - importaciones: 133,100 barriles/día (2007 est.)


Año	Petróleo - importaciones	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2008	115.600	62		2005
2009	109.000	63	-5,71 %	2007 est.
2010	133.100	58	22,11 %	2007 est.
2011	133.100	57	0,00 %	2007 est.

Definición: Esta cifra es el total del petróleo importado en barriles por día, incluyendo el petróleo crudo y sus derivados.

Fuente: CIA World Factbook

TABLA 1.5. Petróleo - reservas comprobadas: 470,8 millones barriles (1 January 2010 est.)



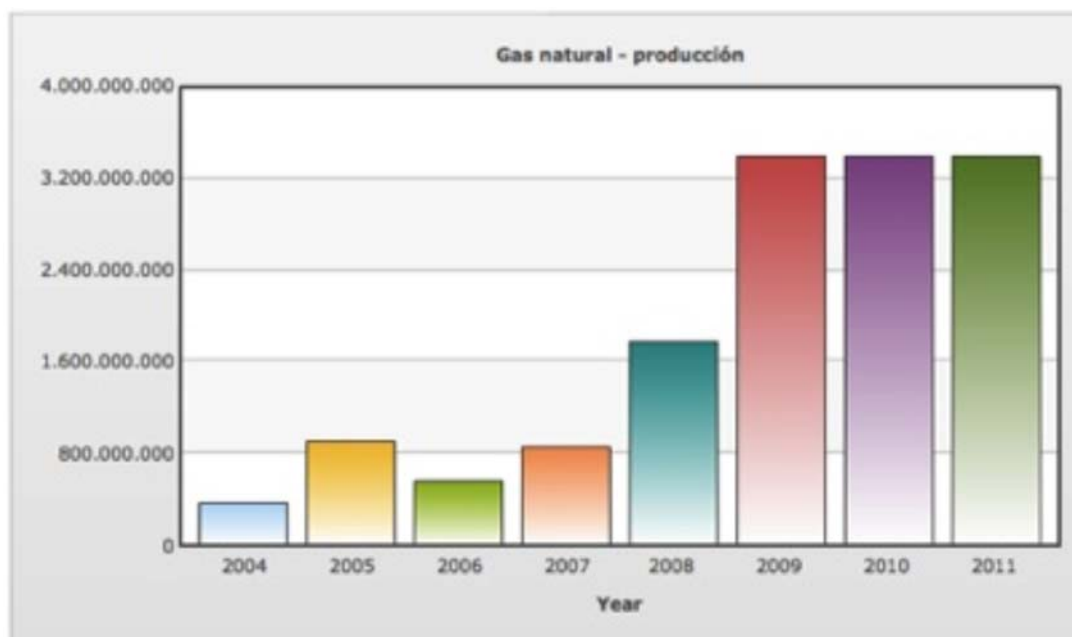
Año	Petróleo - reservas comprobadas	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2003	614.700.000	40		January 2002 est.
2004	614.700.000	40	0,00 %	1 January 2002
2005	408.800.000	48	-33,50 %	2004 est.
2006	370.000.000	52	-9,49 %	2005 est.
2007	370.000.000	52	0,00 %	2006 est.
2008	382.900.000	50	3,49 %	1 January 2008 est.
2009	930.000.000	41	142,88 %	1 January 2008 est.
2010	470.800.000	46	-49,38 %	1 January 2010 est.
2011	470.800.000	46	0,00 %	1 January 2010 est.

Definición: Esta variable es la cantidad total de reservas comprobadas de petróleo crudo en barriles. Reservas comprobadas son las cantidades de petróleo que, mediante el análisis de datos geológicos y de ingeniería, se pueden estimar con un alto grado de confianza que pueden ser recuperables comercialmente a partir de una fecha determinada, de yacimientos explorados, y bajo las condiciones económicas actuales.

Fuente: CIA World Factbook

A continuación veremos la estadística de nuestra economía del gas natural, la cual solo mostraremos la producción, consumo y el estado de las reservas, ya que no importamos y la exportación aun no hay estadística solo estimaciones

TABLA 1.6. Gas natural - producción: 3,39 miles de millones metros cúbicos (2008 est.)

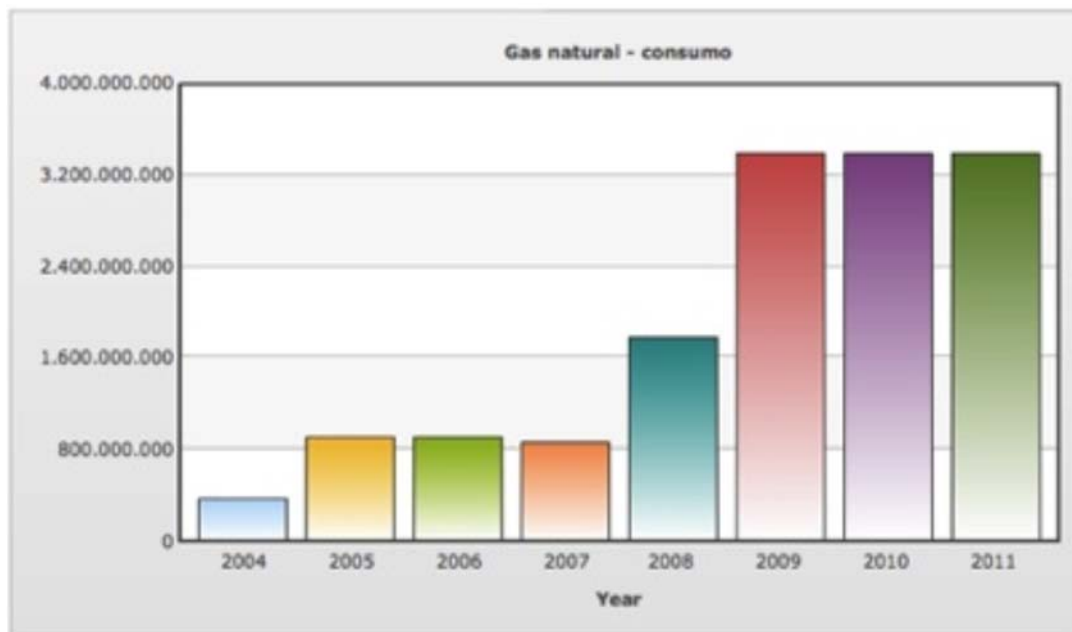


Año	Gas natural - producción	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2004	370.000.000	64		2001 est.
2005	910.000.000	58	145,95 %	2004 est.
2006	560.000.000	65	-38,46 %	2003 est.
2007	860.000.000	60	53,57 %	2004 est.
2008	1.780.000.000	56	106,98 %	2006 est.
2009	3.400.000.000	50	91,01 %	2008 est.
2010	3.390.000.000	50	-0,29 %	2008 est.
2011	3.390.000.000	50	0,00 %	2008 est.

Definición: Esta cifra es el total de gas natural producido en metros cúbicos. La discrepancia entre la cantidad de gas natural producida y / o importada y la cantidad consumida y / o exportada se debe a la omisión de la variación de las reservas de inventario y otros factores de complicación.

Fuente: CIA World Factbook

TABLA 1.7. Gas natural - consumo: 3,39 miles de millones metros cúbicos (2008 est.)

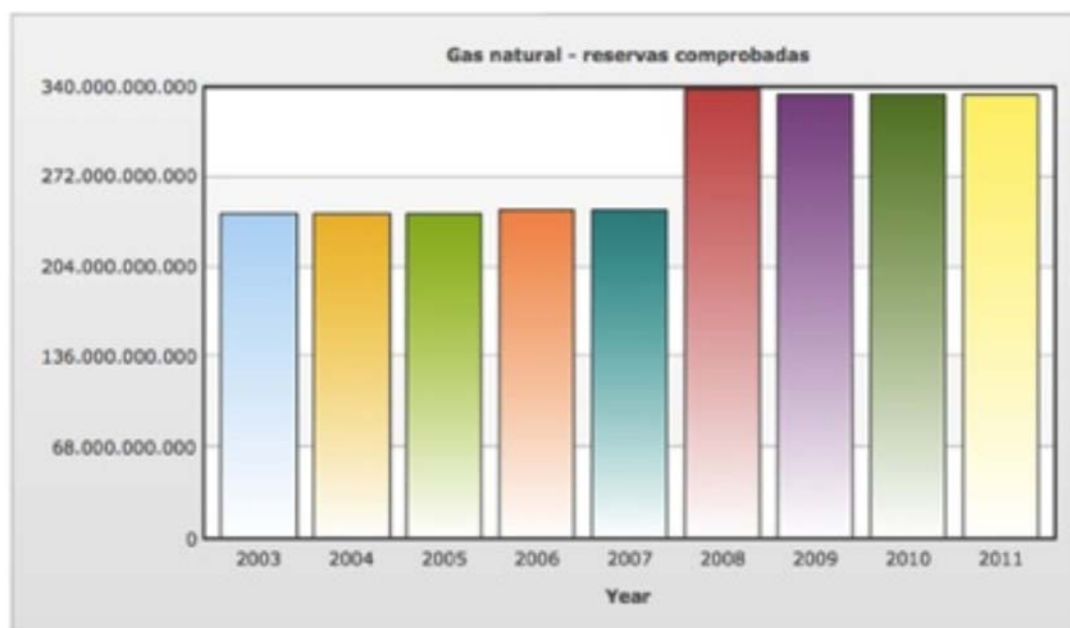


Año	Gas natural - consumo	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2004	370.000.000	89		2001 est.
2005	910.000.000	83	145,95 %	2004 est.
2006	910.000.000	87	0,00 %	2004 est.
2007	860.000.000	88	-5,49 %	2004 est.
2008	1.780.000.000	80	106,98 %	2006 est.
2009	3.400.000.000	68	91,01 %	2008 est.
2010	3.390.000.000	68	-0,29 %	2008 est.
2011	3.390.000.000	68	0,00 %	2008 est.

Definición: Esta cifra es el total de gas natural consumido en metros cúbicos. La discrepancia entre la cantidad de gas natural producida y / o importada y la cantidad consumida y / o exportada se debe a la omisión de la variación de las reservas de inventario y otros factores de complicación.

Fuente: CIA World Factbook

TABLA 1.8. Gas natural - reservas comprobadas: 334,1 miles de millones metros cúbicos (1 January 2010 est.)



Año	Gas natural - reservas comprobadas	Posición	Cambio Porcentual	Fecha de la Información
2003	245.100.000.000	39		January 2002 est.
2004	245.100.000.000	39	0,00 %	1 January 2002
2005	245.100.000.000	39	0,00 %	2004
2006	247.100.000.000	41	0,82 %	2005
2007	246.800.000.000	44	-0,12 %	1 January 2005 est.
2008	337.800.000.000	37	36,87 %	1 January 2008 est.
2009	334.700.000.000	37	-0,92 %	1 January 2008 est.
2010	334.100.000.000	38	-0,18 %	1 January 2010 est.
2011	334.100.000.000	38	0,00 %	1 January 2010 est.

Definición: Esta variable es la cantidad total de reservas comprobadas de gas natural en metros cúbicos. Reservas comprobadas son las cantidades de gas natural que, mediante el análisis de datos geológicos y de ingeniería, se pueden estimar con un alto grado de confianza que pueden ser recuperables comercialmente a partir de una fecha determinada, de yacimientos explorados, y bajo las condiciones económicas actuales.

Fuente: CIA World Factbook

Hoy en día, investigadores han comprobado que el hidrógeno es la opción de futuro para sustituir al petróleo como fuente principal de energía. La mayor parte del hidrógeno terrestre se encuentra formando parte de

compuestos químicos tales como los hidrocarburos o el agua.

Por más de un siglo el hidrógeno se ha considerado como un combustible conveniente y limpio. Puesto que se puede obtener de una diversa gama de fuentes domésticas, el hidrógeno podría reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía. Por otra parte, en áreas urbanas, a causa de la contaminación del aire, los costos relacionados con la preservación de la salud son un problema creciente, tanto para las sociedades desarrolladas como las que se encuentran en vías de desarrollo. El hidrógeno obtenido de fuentes renovables ofrece un potencial de energía que sería sostenible en todos sentidos.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente hay un fuerte interés en la producción a gran escala de hidrógeno para el mercado no eléctrico. El hidrógeno es de especial interés como portador de energía secundaria, ya que tiene el potencial de ser almacenado y transportado, y se considera una fuente de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente. El hidrógeno se produce hasta ahora principalmente a través de un reformado con vapor de metano. Desde una perspectiva a largo plazo, el reformado de metano no es un proceso viable a gran escala para la producción de hidrógeno como vector energético importante, ya que estos procesos de conversión de combustibles fósiles consumen recursos no renovables y emiten gases de efecto invernadero para el medio ambiente. En consecuencia, existe un alto grado de interés en la producción de hidrógeno a partir de la división de agua a través de procesos termoquímicos o electrolíticos (Stoots et al., 2005).

La división directa de agua es una forma obvia de producir hidrógeno. El agua es abundante, y el hidrógeno del producto es puro y no contiene carbono.

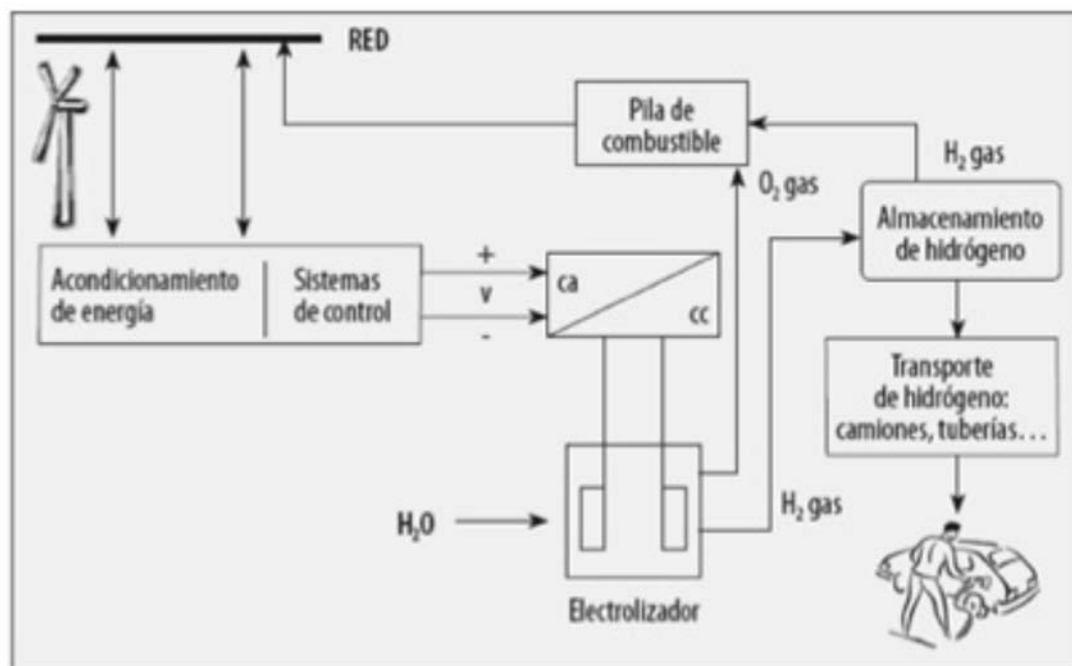
La reacción es endotérmica, y es la forma más sencilla de proporcionar la energía necesaria es mediante una reacción de tipo electroquímico. Si la energía eléctrica se obtiene de una manera sostenible, utilizando, energía eólica, hidráulica y solar, el hidrógeno producido es limpio, no contaminante, por lo que es energía libre de CO₂, que puede ser utilizada en relación con las celdas de combustible para producir energía y para una amplia gama de aplicaciones en las que se usa electrólisis, sin embargo, este proceso se asocia a importantes pérdidas de energía. La mayor parte de las pérdidas están relacionadas con los procesos electroquímicos.

El hidrógeno es considerado como un combustible prometedor para el transporte, ya que es energía limpia y renovable. Asimismo por la vía electroquímica el hidrógeno reacciona en pilas de combustible se considera ser el más limpio y más eficiente. En la actualidad, la tecnología de las pilas de combustible es cara. En el corto plazo, el uso del hidrógeno en motor de encendido a chispa de combustión interna puede ser factible como una tecnología de bajo costo para reducir las emisiones y el calentamiento global. La investigación en el desarrollo del hidrógeno como combustible de motores ha sido constante y se ha incrementado durante el siglo XX (Heffel, 2003).

2.1. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DEL VIENTO (CASO REAL)

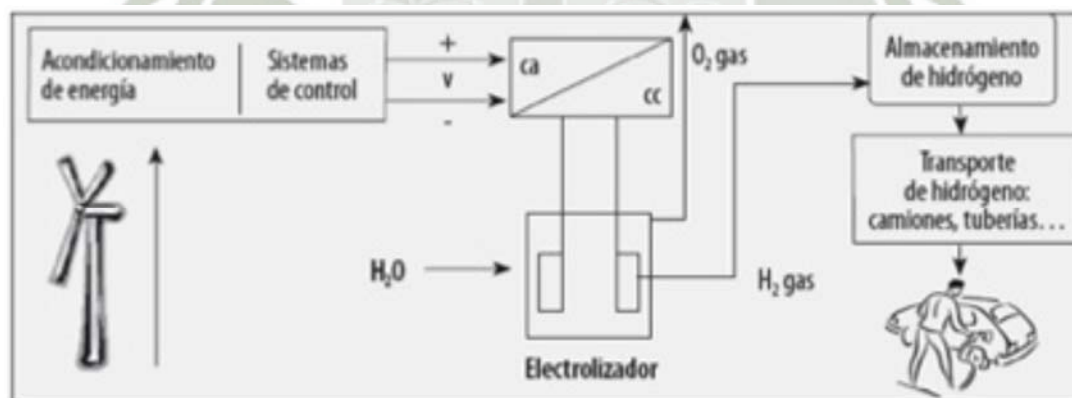
España alberga desde principios de 2008 la primera planta experimental de producción y almacenamiento de hidrógeno a partir de la energía eólica de toda Europa. Está situada en Galicia, en el parque de Sotavento y forma parte de un proyecto en el que participan Gas Natural, la Xunta de Galicia y la fundación Sotavento Galicia. El propósito de la planta es estudiar la idoneidad del hidrógeno como medio de almacenamiento de energía en forma gaseosa. Así, cuando la eólica instalada en Sotavento genera más electricidad de la prevista, ésta es utilizada para obtener hidrógeno y almacenarlo. Posteriormente, el hidrógeno se emplea para producir energía eléctrica cuando hay poco viento o se quiere satisfacer una mayor demanda.

El viento (y el Sol) también trabajan para producir hidrógeno en Gran Canaria. En octubre de 2007 se inauguraron dos plantas experimentales en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), en Pozo Izquierdo, que servirán para comprobar si es viable (tanto técnica como económicamente) la producción industrial de hidrógeno a partir de energías renovables.



GRÁFICA 1.3. Obtención de hidrógeno por energía eólica con conexión a la red

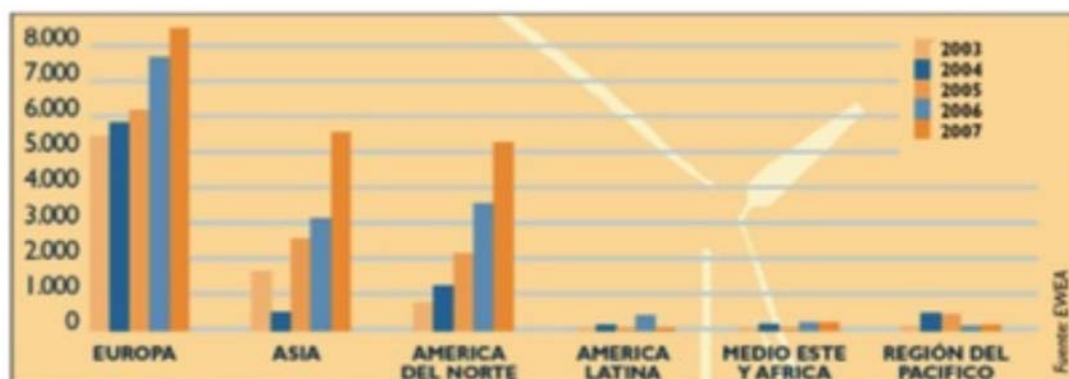
Fuente: European Wind Energy Association (EWEA)



GRÁFICA 1.4. Obtención de hidrógeno por energía eólica sin conexión a la red

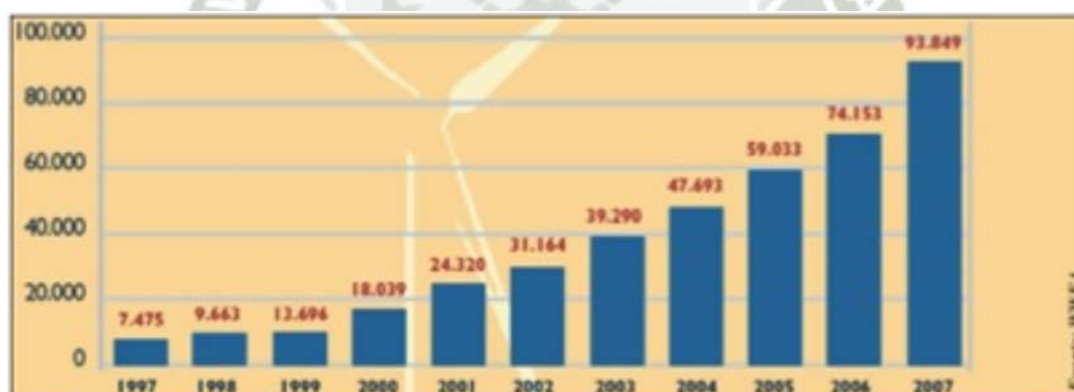
Fuente: European Wind Energy Association (EWEA)

A continuación se ofrecen unos gráficos donde se puede observar la actual situación de la energía eólica en el mundo:



GRÁFICA 1.5. Potencia instalada por continentes 2003 – 2007 (en MW)

Fuente: European Wind Energy Association (EWEA)



GRÁFICA 1.6. Capacidad instalada en el mundo 1997 – 2007 (Acumulado, en MW)

Fuente: European Wind Energy Association (EWEA)

3. ANTECEDENTES

Prácticamente todas las investigaciones actuales sobre generadores de hidrógeno o de aparatos que rompen la molécula de agua, se basan en los trabajos realizados por el autodidacta Inglés, perito en química analítica y físico experimental Michael Faraday (1791 - 1867), a quien se lo considera el fundador del electromagnetismo y la electroquímica y muchos de sus experimentos fueron la base de partida para las tecnologías que se centraron en la creación y usos de la electricidad. De igual forma él fue quien retomó investigaciones, desarrolló, mejoró y generó el termino "Electrólisis" y descubrió las dos leyes que llevan su nombre.

Henry Cavendish, Británico, relata en sus investigaciones en 1766 la presencia de un "aire inflamable que formaba agua en su combustión".

El experimento de Martinus van Marum, (1750 - 1837) Holandés, realizó varios experimentos con la electricidad y en uno de ellos en 1776 obtuvo oxígeno e hidrógeno sin saberlo, usando electrólisis y de igual forma por accidente descubrió que esa mezcla podía arder al entrar en contacto con una chispa. Posteriormente ese experimento de Cavendish, fue reproducido en 1781 por Antoine Lavoisier (1743 - 1794) Noble Francés que fue Químico, Biólogo y economista, es conocido por sentar la primera versión de la ley de conservación de la masa en la Química y le dio a los elementos respectivamente los nombres de Hidrógeno en 1783 y de igual forma al Oxígeno años antes en el 1778.

Todos ellos aportaron mucho de lo que usó Faraday para sus hipótesis y posteriores Teorías. En general Faraday presentó los resultados de sus investigaciones en un formato muy científico, pero en breves palabras una de las cosas que Faraday decía en su primera ley era que: la cantidad de Hidrógeno (o masa de gas) que se obtenía es proporcional a la cantidad de corriente que fluye por el electrolito. Por tanto para incrementar la taza de producción de gas, necesitas incrementar el flujo de corriente que pasa por el agua que vas a romper o dividir.

También el encontró que el voltaje óptimo entre las dos placas de electrodos en la electrólisis es de 1,24 voltios, y lo cual se sigue tomando como base para los cálculos y diseños de los generadores de hidrógeno en la actualidad, todo lo cual él explicó en gran detalle.

Por tal motivo Faraday al encontrar que solo 1,24 voltios de los 12 que usualmente se utilizan van a producir hidrógeno, los restantes 10,76 voltios sólo calentarán el agua, que es lo que usualmente ocurre.

En el año 1860 el señor Jean Joseph Etienne Lenoir de Bélgica y Francia, construyó el primer carro que producía su propio combustible de hidrógeno gracias a una batería y electrólisis a bordo, el único inconveniente es que era en muy poca cantidad y con altísimos costos.

Para 1875 el famoso Julio Verne en su libro "La Isla misteriosa", que fue una secuela de dos de sus novelas previas, escribió lo siguiente: "El agua llevada a sus elementos iniciales, y descompuestos sin duda gracias a la electricidad, la cual luego se volverá una fuerza manejable y poderosa. Si, mis amigos, yo pienso que el agua será algún día empleada como combustible".

Muchos experimentos se realizaron hasta 1888, pero todos ellos tenían el inconveniente de que eran muy caros de realizar y mantener, porque los generadores de hidrógeno estaban basados en electricidad, que aun era muy exclusiva.

Existe una patente aprobada el 9 de Abril de 1918, la cual es la más Antigua relacionada con la generación de oxígeno e hidrógeno en demanda para su uso en vehículos, del inventor Charles H. Frazer de Columbus Ohio, con su "Booster de Hidrógeno", en la cual ya se utilizaba el termino "generadores de Hidro-Oxígeno", y en la cual se menciona que él hace una mejora a estos generadores, para su uso en motores de combustión interna, combustión completa de los hidrocarburos, y que el motor permanecerá libre de carbones adheridos a sus partes metálicas, es decir que permanecerá limpia la cámara de combustión del motor.

Existe otra patente aprobada en Berlín Alemania del 7 de Enero de 1932 por Rudolf Erren en la cual de igual forma habla del uso de “una mezcla de hidrógeno y oxígeno para mejorar la combustión interna de los motores”, del mismo inventor una aprobada en septiembre 12 de 1935 en Londres Inglaterra y otra más del mismo inventor de Diciembre 19 de 1939.

Existe otra del inventor Henry Garrett, de Dallas Texas en USA en el año de 1935 quien patentó un carburador electrolítico y que permitía a un carro rodar sólo con agua.

Para 1943 - 1945 a causa de los racionamientos provocados a finales de la segunda guerra mundial, los británicos utilizaron generadores hidrógeno en sus tanques, botes y otros vehículos para lograr un mejor rendimiento, y para prevenir el sobre calentamiento de los motores de vehículos usados en África. Luego de finalizada la segunda guerra mundial, el gobierno ordenó el retiro y la destrucción de todos estos generadores de sus vehículos. Esto según una investigación realizada por páginas Australianas del gas de Brown. De esos mismos diseños de generadores electrolíticos, los alemanes retomaron la iniciativa y para el año de 1972 construyeron uno de acero puro que hasta la fecha sigue funcionando.

Para 1962 William A. Rhodes de USA en Arizona, es el primer inventor que se conoce que patentó un aparato de electrólisis, que producía el gas que ahora llamamos el Gas de Brown.

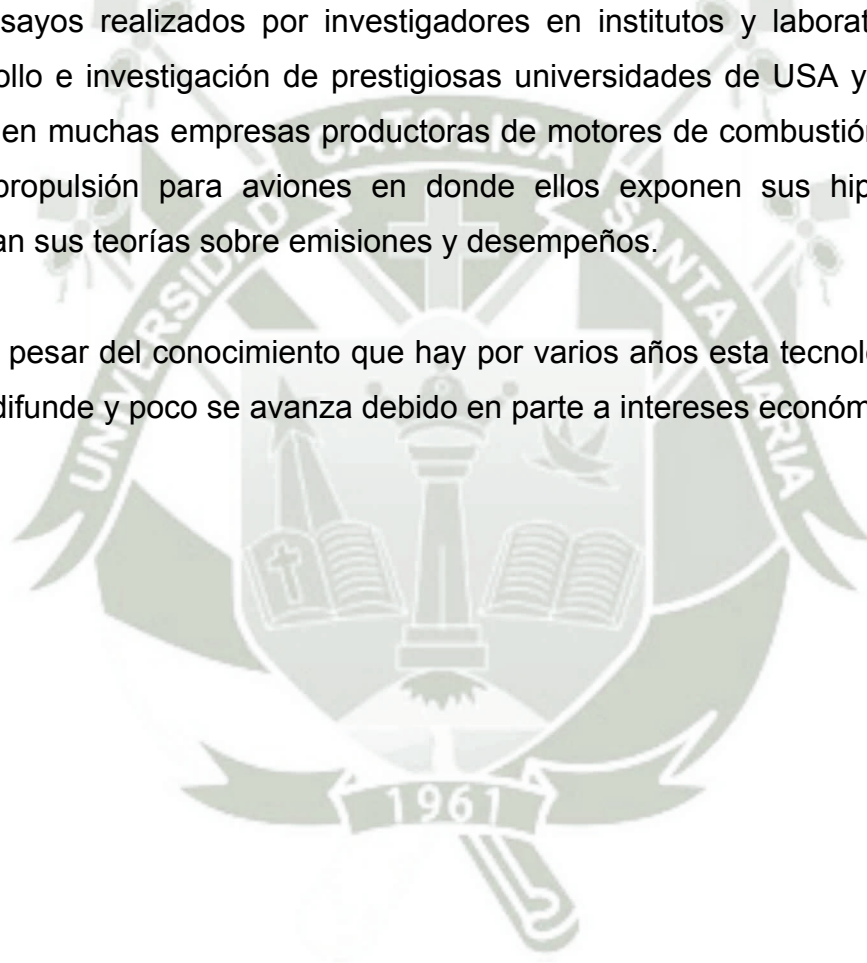
De entre todos esos personajes, surge uno el Profesor Yull Brown, originalmente nacido en Bulgaria en 1922 como Ilya Velbow, con el tiempo emigró a Australia en 1958 en donde se desempeñó como Ingeniero Eléctrico, inventor y Profesor universitario, bajo el nombre de Yull Brown en donde murió el 22 de Mayo de 1998, él fue el inventor que mejor se lo conoce por el Gas de Brown, que implicaba un método muy eficiente para lograr la electrólisis del agua y su uso de la mezcla resultante de Oxígeno e hidrógeno. Él indicaba que con su método y el gas obtenido, se podía reducir la radioactividad de muchos materiales. Uno de sus mayores usos fue el de la soldadora autógena de agua y gas de Brown (en remplazo del

acetileno) y oxígeno, del cual se han derivado muchos de los experimentos que varias personas en todo el mundo han realizado y muchas otras mejoras y patentes asociados a los experimentos del Profesor Brown.

Y así continuamos hasta llegar a fechas mas cercanas en el siglo XX una patente del inventor Charles T. Weber aprobada el 17 de agosto del año 1982 en la cual describe un “Aparato para la generación de un combustible gaseoso para motores de combustión interna”

Todas estas patentes y experimentos, lógicamente han sido respaldados por ensayos realizados por investigadores en institutos y laboratorios de desarrollo e investigación de prestigiosas universidades de USA y Europa, Asia y en muchas empresas productoras de motores de combustión interna y de propulsión para aviones en donde ellos exponen sus hipótesis y plantean sus teorías sobre emisiones y desempeños.

Pero a pesar del conocimiento que hay por varios años esta tecnología aun no se difunde y poco se avanza debido en parte a intereses económicos.



4. HIPÓTESIS

Es posible diseñar un sistema portátil para poder obtener como combustible alternativo al hidrógeno para ser usado en los motores de combustión interna lo cual permita una solución a corto plazo para poder sustituir al petróleo o lograr un ahorro del mismo usando al hidrógeno como un aditivo para mejorar la combustión interna, así se podrá superar la demanda y alza de precio del petróleo en nuestro país, así como dar una solución al problema y malestar social que nos perjudica a todos y finalmente lograr reducir las emisiones de contaminantes al medio ambiente.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Lograr implementar un sistema seguro y portátil para poder demostrar el uso del hidrógeno en la combustión interna de un automóvil convencional, con la finalidad de conseguir un ahorro notable en el consumo de combustible en función a la distancia recorrida, reducir la contaminación, analizar los resultados y poder optimizarlos para alcanzar un alto desempeño y justificar su viabilidad

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

7. Identificar los sensores involucrados en la combustión normal de combustible fósil en un automóvil con EFI
8. Identificar la forma más óptima de como modificar las lecturas de los sensores que llevan información a la computadora a bordo
9. Realizar pruebas en el tiempo, para poder determinar los procedimientos y periodos de tiempo para realizar su mantenimiento
10. Evaluar la mejor sintonización de los sensores de oxígeno para su óptimo desempeño en la inyección de hidrógeno
11. Determinar el costo final con un análisis LCCA (análisis de costo de

- vida), del vehículo trabajando sin el generador de hidrógeno y otro después de aplicar la mejora
12. Lograr con éxito resolver todos los problemas que puedan presentarse a lo largo de las pruebas para poder lograr un feedback a la hora de aplicarlo en otros vehículos
 13. Aportar con el conocimiento y demostración práctica para poder aplicarlo a otro tipo de transportes y/o motores de combustión interna, ya sean motos, botes, etc.
 14. Generar conciencia sobre la realidad actual de la demanda del combustible y el interés por conseguir un ahorro a largo plazo como un primer paso

6. VARIABLES E INDICADORES

Se utilizará el método científico en general, con la estructura de generación de variables inductivas-deductivas, un mecanismo de formación de hipótesis y la siguiente estructura lógica demostrativa:

- ☐ Detección del problema.
- ☐ Formalización del problema.
- ☐ Determinación de la hipótesis.
- ☐ Identificación de la variable principal (Revoluciones por Minuto del motor).
- ☐ Identificación de las variables secundarias(Volumen de Hidrogeno, Corriente del Generador y ciclo de trabajo)
- ☐ Comprobación de las variables.
- ☐ Transformación de las variables en premisas.
- ☐ Construcción de la estructura demostrativa silogística.

Además, por ser una investigación tecnológica, la tesis:

Involucra análisis cuantitativo y cualitativo del proyecto.

El análisis cuantitativo se aplica a través de enumeración de componentes, dispositivos, equipos, pretendiendo alcanzar una cobertura que ayude a percibir cuales son las variables que influyen en el sistema.

El análisis cualitativo: resultado de un cuidadoso proceso de formulación del proyecto.

Luego de la implementación del sistema, los resultados se someten a una metodología estadística que permita descubrir la consistencia entre las respuestas y las afirmaciones.

6.1. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Fundamentalmente Investigación Exploratoria, dado que es un tema poco debatido

6.2. INSTRUMENTOS DE VERIFICACIÓN

Análisis de costo de vida con proyección a 1 año de uso, tomando en cuenta los ciclos de mantenimiento preventivo que se deben realizar

7. ALCANCES

Se espera que cuando el vehículo de prueba haya demostrado el beneficio y ahorro del uso del hidrógeno se pueda hacer mejoras e implementarlo para otro tipo de vehículos de transporte u otras aplicación que puedan ser objeto de estudio e investigación

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

1.1. 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.

1.2. PROPIEDADES FÍSICAS

1.2.1. 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 $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se encontrará en estado sólido por debajo de su punto de fusión, a $-259,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presión atmosférica.

Como puede observarse, estas temperaturas son extremadamente bajas. Hablaremos de temperaturas criogénicas cuando éstas se encuentren por debajo de -73°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°C aplicando aproximadamente 13 bar.

En cuanto a la capacidad calorífica específica del hidrógeno, éste tiene un calor específico a presión constante (C_p) de $28,623 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$; y un calor específico a volumen constante (C_v) de $20,309 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$.

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.

1.2.2. 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, dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases. Todos ellos son también en la mayoría de casos inodoros, descoloridos e insípidos.

1.2.3. TOXICIDAD

El hidrógeno en si 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 debido a esto 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.

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.

1.2.4. 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/m³; y una densidad líquida de 0,0708 kg/l.

Volumen 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 m³/kg, mientras que el volumen específico del hidrógeno líquido (a – 253°C y 1 atm) es de 0,014m³/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.



GRÁFICA 2.1. Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gas
Fuente: *El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas*, Cristóbal Ortiz

Cuando el hidrógeno se almacena como un gas a alta presión (250 barg) 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.

1.3. PROPIEDADES QUÍMICAS

1.3.1. 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.



GRÁFICA 2.2. Estados de la energía química

Fuente: *El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas*, Cristóbal Ortiz

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, CO₂, SO_x ni hollín durante su combustión.

1.3.2. 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.

COMBUSTIBLE	DENSIDAD DE ENERGÍA (PCI)	ESTADO
HIDRÓGENO	10.050 kJ/M ³	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	1.825.000 kJ/M ³	GAS A 200 BAR _G Y 15 °C
	4.500.000 kJ/M ³	GAS A 690 BAR _G Y 15 °C
	8.491.000 kJ/M ³	LÍQUIDO
METANO	32.560 kJ/M ³	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	6.860.300 kJ/M ³	GAS A 200 BAR _G Y 15 °C
	20.920.400 kJ/M ³	LÍQUIDO
PROPANO	86.670 kJ/M ³	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	23.488.400 kJ/M ³	LÍQUIDO
GASOLINA	31.150.000 kJ/M ³	LÍQUIDO
DIÉSEL	31.435.800 kJ/M ³	LÍQUIDO
METANOL	15.800.100 kJ/M ³	LÍQUIDO
ETANOL	21.100.000 kJ/M ³	LÍQUIDO

TABLA 2.1. Comparación de la densidad de Energía de varios combustibles

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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.

1.3.3. 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.

COMBUSTIBLE	PUNTO DE INFLAMACIÓN
HIDRÓGENO	$< -253\text{ }^{\circ}\text{C}$
METANO	$-188\text{ }^{\circ}\text{C}$
PROPANO	$-104\text{ }^{\circ}\text{C}$
GASOLINA	$-43\text{ }^{\circ}\text{C}$
DIÉSEL	ENTRE $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ Y $96\text{ }^{\circ}\text{C}$
METANOL	$-11\text{ }^{\circ}\text{C}$
ETANOL	$13\text{ }^{\circ}\text{C}$

TABLA 2.2. Punto de Inflamación de algunos combustibles

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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.

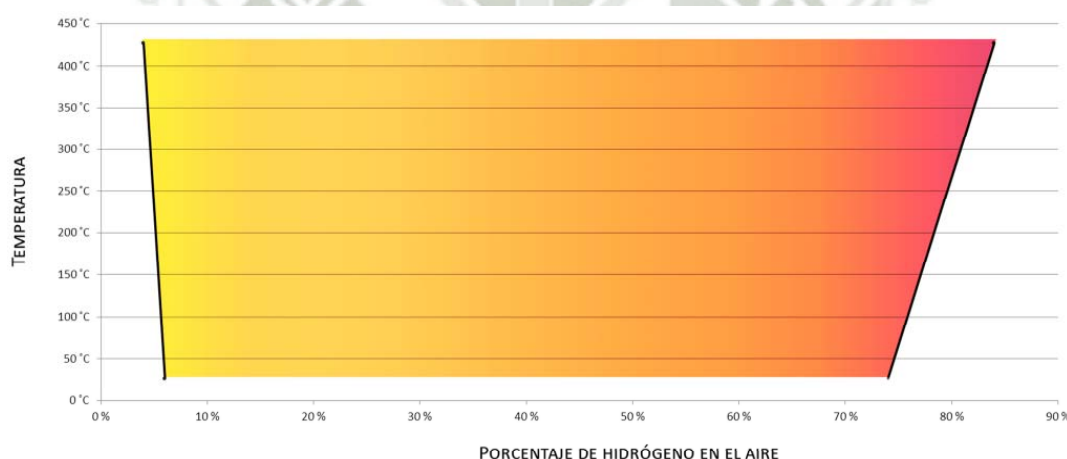
Una mezcla estequiométrica ocurre cuando las moléculas del oxígeno y del hidrógeno están presentes en la cantidad necesaria exacta para completar la reacción de la combustión. Si hay más hidrógeno que oxígeno, la mezcla será rica, de modo que una parte del combustible no reaccionará mientras que todo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



GRÁFICA 2.3. Variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno, en relación a la temperatura

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz



GRÁFICA 2.4. Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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).

COMBUSTIBLE	TEMPERATURA DE AUTOENCENDIDO
HIDRÓGENO	585 °C
METANO	540 °C
PROPANO	490 °C
GASOLINA	DE 230 °C A 480 °C
DIÉSEL	DE 204,4 °C A 260 °C
METANOL	385 °C
ETANOL	428,8 °C

TABLA 2.3. Valor de Temperatura de Autoencendido de diversos combustibles

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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.

COMBUSTIBLE	NÚMERO DE OCTANO
HIDRÓGENO	130
METANO	125
PROPANO	105
GASOLINA	DE 87 A 93
DIÉSEL	30
METANOL	99
ETANOL	100

TABLA 2.4. Número de octano de diferentes combustibles

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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 electroestáticas que pueden dar lugar a chispas. Por esta razón, el equipo que transporta el hidrógeno debe disponer de una toma de tierra.

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 realizada 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.



GRÁFICA 2.5. Detección de llama de hidrógeno

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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.



GRÁFICA 2.6. 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).

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

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.

1.3.4. 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:

1. Producción.
2. Transporte/Almacenamiento.
3. Utilización.

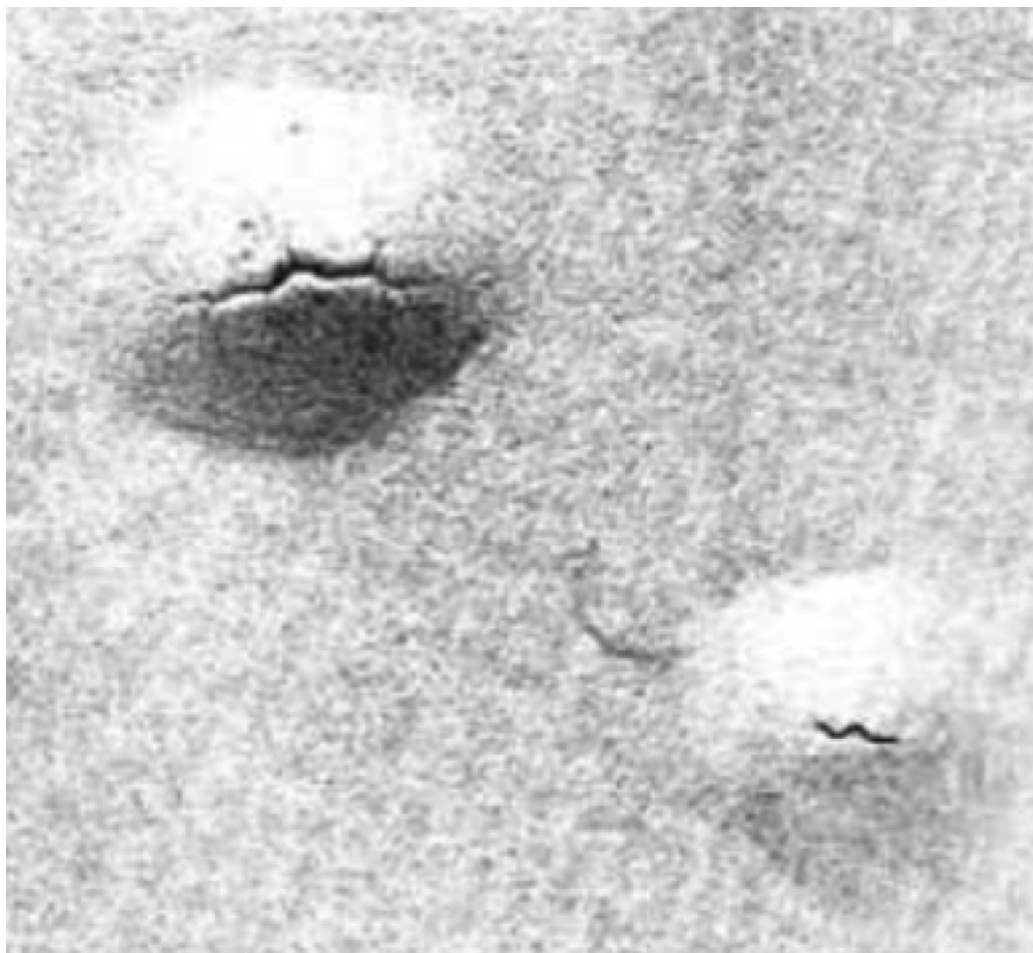
La elección de los materiales para el confinamiento del hidrógeno para una aplicación específica dependerá de la fiabilidad y coste que requiera el sistema.

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



GRÁFICA 2.7. Ejemplo de fragilización por hidrógeno

Fuente: <http://www.analisisdefractura.com/dano-por-hidrogeno/>

2. 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.

2.1. ELECTRÓLISIS DEL AGUA

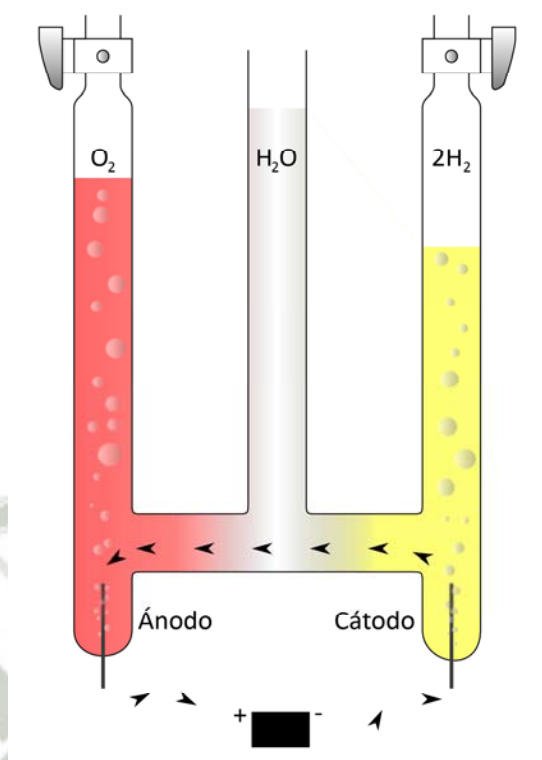
En la electrólisis del agua, la electricidad se utiliza para descomponer el agua en sus componentes elementales: hidrógeno y oxígeno. La electrólisis del agua es considerada a menudo el método preferido para producir hidrógeno, ya que se trata del único proceso que no necesita basarse en los combustibles 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.

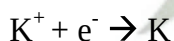
El separador de gas o diafragma se utiliza para evitar que se mezclen el hidrógeno y el oxígeno, aunque permite el paso libre de iones. Está fabricado generalmente de un material basado en el asbesto y tiende a romperse cuando se somete a una temperatura a partir de 80°C.



GRÁFICA 2.8. Célula Electrolítica

Fuente: *El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas*, Cristóbal Ortiz

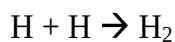
Las reacciones que se producen en el cátodo son:



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.

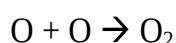
Las reacciones que se producen en el ánodo son:



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 celda electrolítica y por lo tanto dan lugar a un coste menor de la instalación. Las celdas electrolíticas avanzadas son fiables, con rendimientos energéticos entre 65% y 80% y funcionan con densidades de corriente en torno a 2000 A/m².

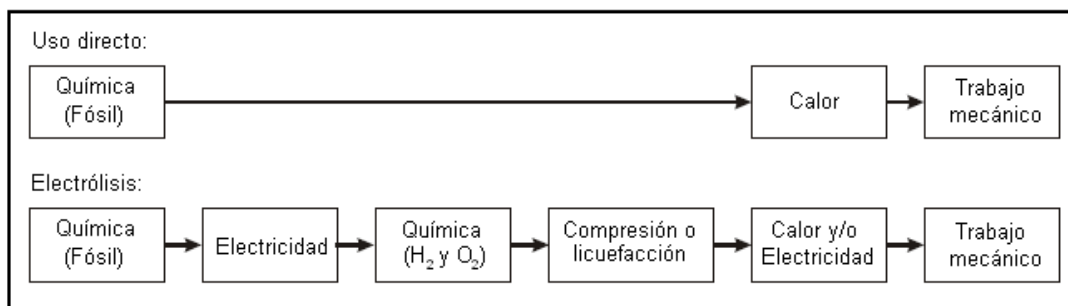
La cantidad de energía eléctrica requerida para la electrólisis del agua puede compensarse algo agregando energía térmica a la reacción. La cantidad mínima de voltaje requerida para descomponer el agua es de 1,23 voltios a 25°C. A este voltaje, la reacción requiere energía térmica del exterior para producirse. A 1,47 voltios 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.



GRÁFICA 2.9. Procesos de transformación de energía basados en combustibles fósiles

Fuente: Economía del Hidrógeno

2.2. 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 $\square$ de hidrógeno y del carbón.

3. Purificación primaria – conversión del monóxido de carbono a bióxido de $\square$ 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. $\square$

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

1. Emisiones de dióxido de carbono.
2. Reacciones incompletas, dejando monóxido de carbono y algo de combustible en el reformado.

3. Producción de agentes contaminantes con la combustión, tales como óxidos nitrosos.

2.2.1. 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).

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.

2.3. DESCOMPOSICIÓN TERMOQUÍMICA DEL AGUA

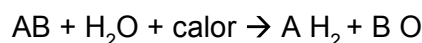
En la descomposición termoquímica del agua, el calor se usa únicamente para descomponer el agua. Se trata de un procedimiento similar al de la electrólisis, con la diferencia de que toda la energía agregada es en forma de calor y no en forma de electricidad. La eficiencia máxima teórica para este procedimiento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

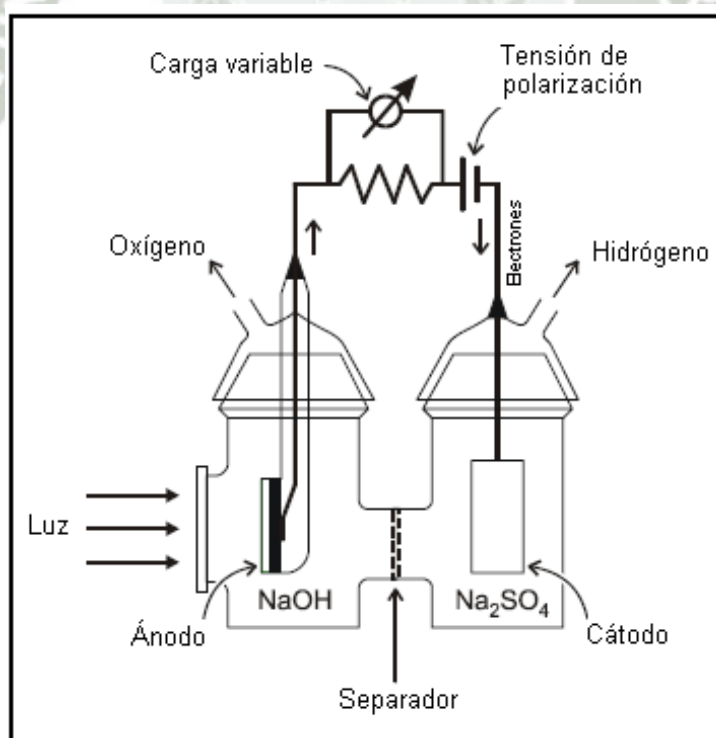
que la que se hubiese generado quemando directamente el combustible fuente.

2.4. FOTOELECTRÓLISIS

La fotoelectrólisis 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 fotoelectrodos 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.



GRÁFICA 2.10. Célula semiconductor de fotoelectrólisis

Fuente: *El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas*, Cristóbal Ortiz

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%.

2.4.1. 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%.

2.5. 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 CO₂, pues en este caso resultan unas emisiones de CO₂ negativas.

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

2.5.1. 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.

2.5.2. PIROLÍISIS

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.

2.6. 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.
- Un subproducto de la industria de hidróxido de sodio.
- Producido entre otros gases ligeros en refinerías de petróleo crudo.
- Producido a partir del carbón.
- Emitido en procesos químicos de deshidrogenación.

Generalmente, estas fuentes de subproducto (hidrógeno), disponen de una escasa capacidad, además de ser demasiado costosas para proveer grandes cantidades de hidrógeno.

3. ALMACENAJE DE HIDRÓGENO

Si el principal desafío en el uso del hidrógeno como combustible es su obtención y extracción, el segundo principal desafío es saber cómo almacenarlo. Cuando se han tratado las características del hidrógeno, hemos visto que, de todos los elementos conocidos, tiene la menor densidad de gas y el segundo punto de ebullición más bajo, con lo que supone un reto a la hora de almacenarlo tanto en formato gaseoso como líquido.

La baja densidad del hidrógeno, tanto si se encuentra en estado líquido como en gaseoso, da lugar también a una densidad de energía reducida. Dicho de otra manera, un volumen dado de hidrógeno contiene menos energía que el mismo volumen de otros combustibles. Esto aumentará también el tamaño relativo del tanque de almacenaje, pues se requerirá mayor cantidad de hidrógeno para resolver los requisitos de cualquier vehículo.

A pesar de su baja densidad de energía volumétrica, el hidrógeno dispone de la relación energía – peso más elevada que cualquier otro combustible. Desafortunadamente, esta ventaja del peso es eclipsada en la mayoría de los casos por el elevado peso de los tanques de almacenaje en los que se contiene el hidrógeno. De este modo, la mayoría de sistemas de almacenaje de hidrógeno son considerablemente más aparatosos y/o más pesados que los usados en caso de la gasolina o combustibles diesel.

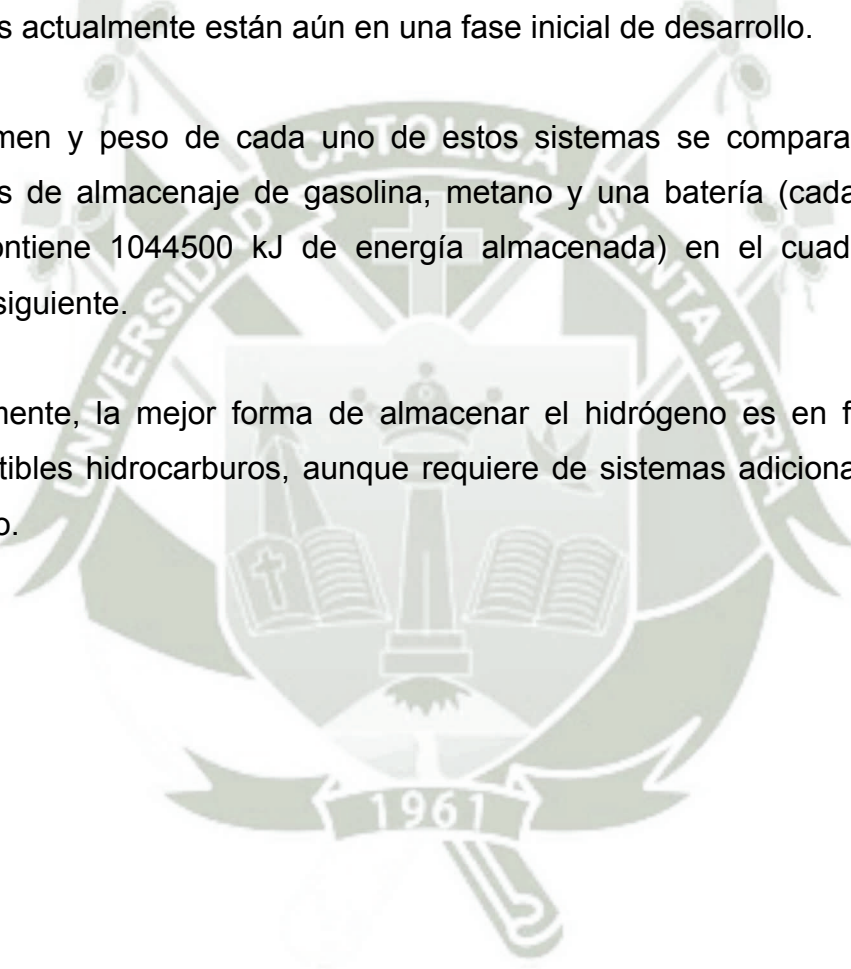
Pongamos un ejemplo: supongamos un coche que dispone de un depósito de gasolina de 50 litros, es decir, unos 42 kg en peso y 1580 MJ de energía

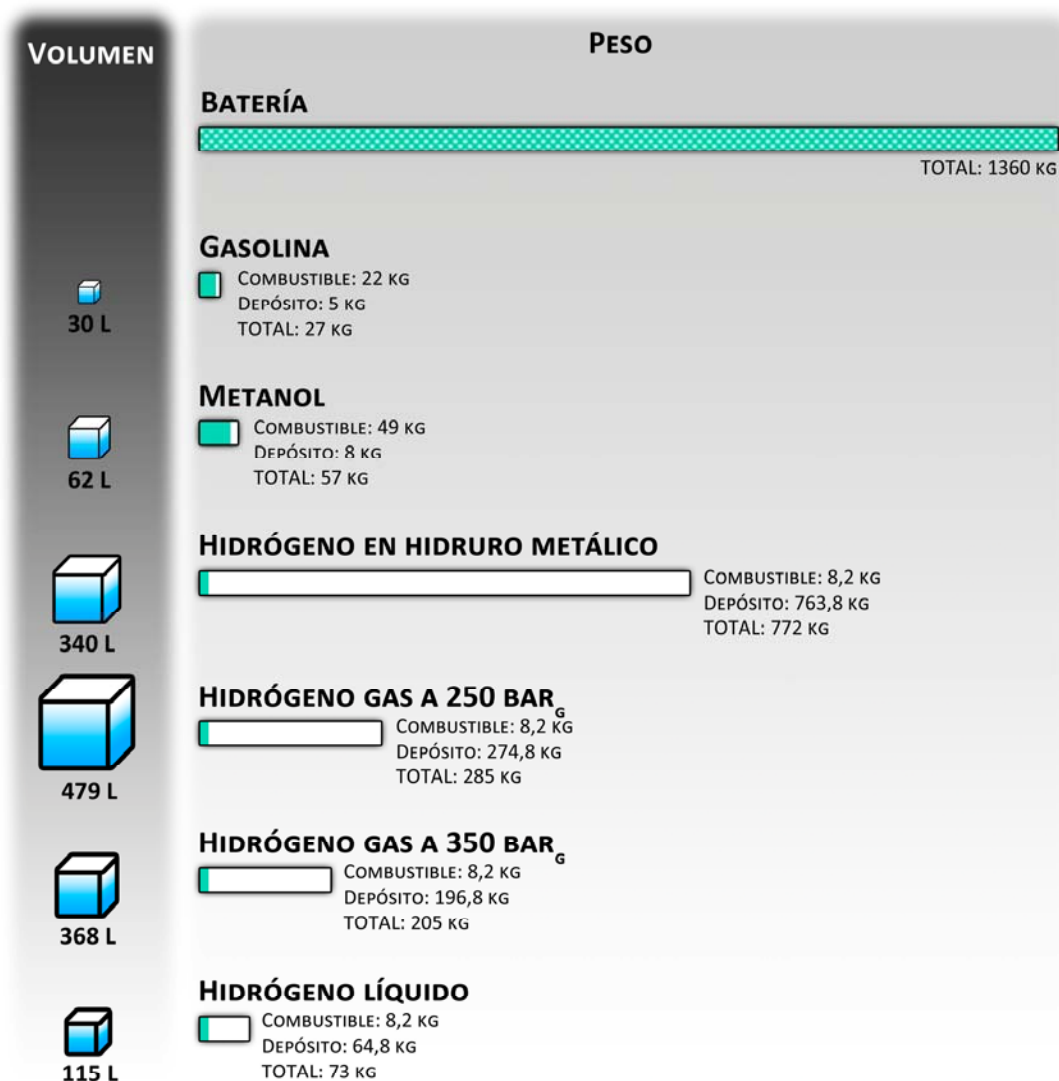
almacenada. Pues bien, para almacenar la misma cantidad de energía, harían falta 13,2 kg de hidrógeno, que a 15°C y 1 bar de presión ocuparían 158 m³. Naturalmente, este volumen no es viable para ser transportado a bordo de un coche, por lo que hay que aumentar la densidad del gas.

Para ello existen dos alternativas: el almacenamiento como gas a alta presión o el almacenamiento como líquido a temperaturas criogénicas. Existen programas de investigación sobre otros sistemas de almacenaje, como los hidruros metálicos o las nanoestructuras de carbono, pero estos sistemas actualmente están aún en una fase inicial de desarrollo.

El volumen y peso de cada uno de estos sistemas se compara con los sistemas de almacenaje de gasolina, metano y una batería (cada uno de ellos contiene 1044500 kJ de energía almacenada) en el cuadro de la página siguiente.

Irónicamente, la mejor forma de almacenar el hidrógeno es en forma de combustibles hidrocarburos, aunque requiere de sistemas adicionales para extraerlo.





GRÁFICA 2.11. Cuadro comparativo Volumen y Peso de Combustibles
Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

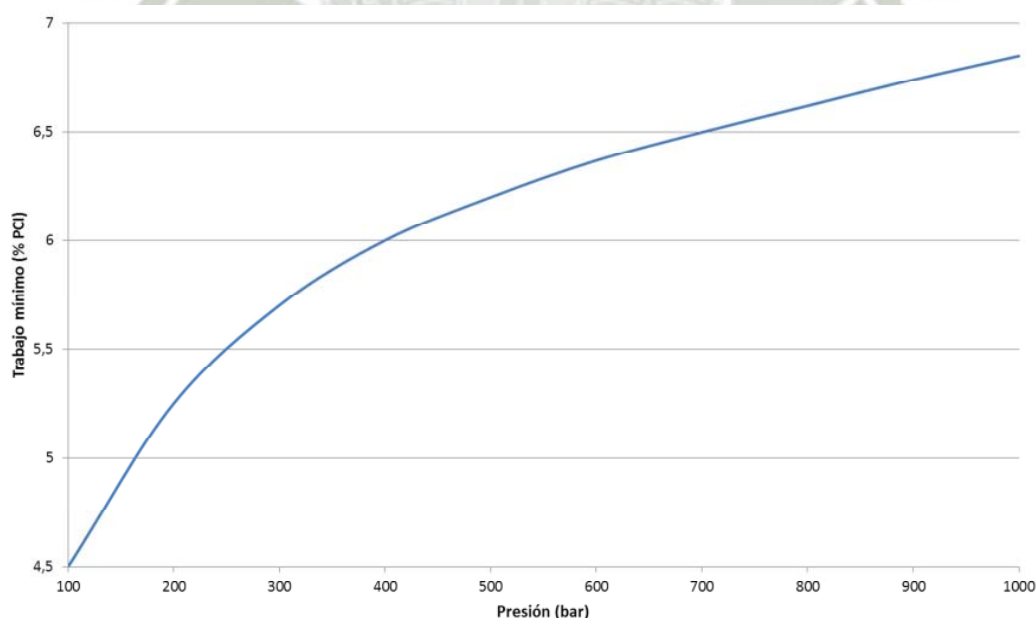
3.1. GAS A ALTA PRESIÓN (CGH2)

Los métodos de almacenaje de hidrógeno a alta presión son los sistemas más comunes y desarrollados actualmente. Como cualquier otro gas, el hidrógeno se puede comprimir para reducir su volumen específico.

El almacenamiento como gas comprimido es el más sencillo, aunque las densidades energéticas conseguidas son las menores a menos que se emplee alta presión, ya que la densidad energética depende linealmente de

la presión si se asume un comportamiento como gas ideal. Las presiones de trabajo actuales son de 200 barg, llegando a 700 barg en los equipos más avanzados.

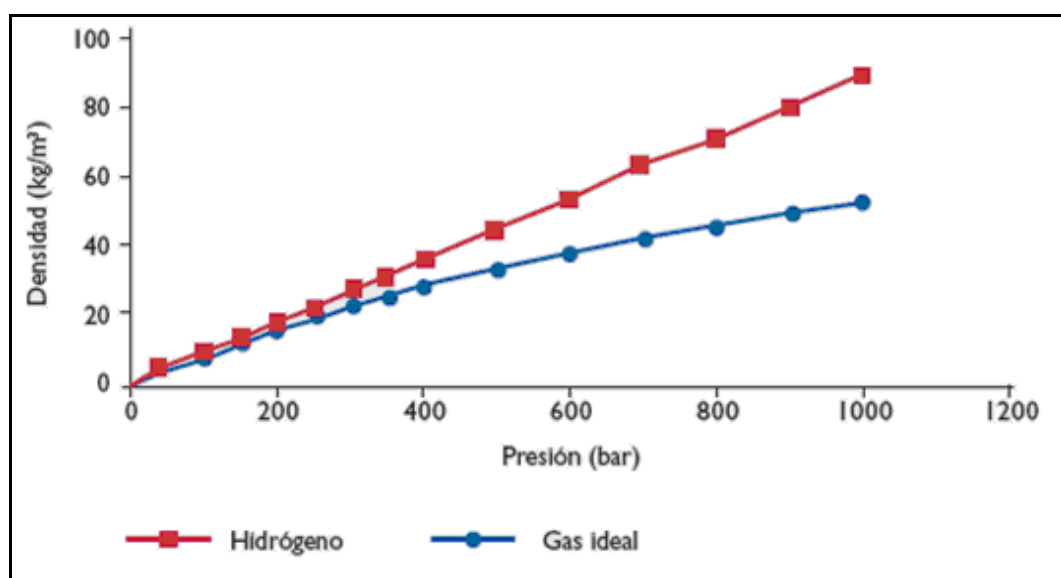
El consumo energético de este procedimiento viene dado por la necesidad de comprimir el hidrógeno. El siguiente gráfico presenta la mínima energía de compresión requerida, respecto a la energía química contenida en el hidrógeno, según la presión de almacenamiento. Debe tenerse en cuenta que dichos consumos de energía corresponden a compresiones isotermas reversibles, siendo los consumos reales mayores. Así, el 5,3% teórico para alcanzar 200 barg se convierte en realidad en algo menos del 10%. En cualquier caso, la curva no crece linealmente, lo que supone que en términos relativos resulta más eficaz trabajar a altas presiones. Así, el mínimo consumo para alcanzar los 700 barg es 6,5%, es decir, sólo un 22% más que para alcanzar 200 barg, habiéndose incrementado la presión 3,5 veces. La desviación con la realidad se mantiene, siendo el consumo real para llegar a 700 barg de aproximadamente un 15% de la energía química almacenada en el hidrógeno.



GRÁFICA 2.12. Cuadro de Compresión y energía contenida en el hidrógeno

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

En el gráfico siguiente se muestra la densidad del hidrógeno en función de la presión a una temperatura de 0°C. En él podemos observar que con aumentos progresivos de presión se consiguen cada vez menores aumentos de densidad. Ahora bien, ¿en qué zona de la curva se mueve la tecnología?



GRÁFICA 2.13. Densidad del hidrógeno en función de la presión
Fuente: *El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas*, Cristóbal Ortiz

El transporte y suministro convencional de hidrógeno se efectúa en botellas de acero, similares a las que se usan para almacenar gas natural, a una presión de 200 barg para ser utilizado en procesos de soldadura y para inertizar atmósferas, entre otras aplicaciones. En los proyectos de demostración de vehículos movidos con hidrógeno se han empleado presiones superiores: los autobuses de Madrid y Barcelona (proyecto CUTE, año 2003) almacenan el hidrógeno a 350 barg, mientras que los proyectos más recientes (por ejemplo el Nissan X-Trail SUV) han llegado hasta los 700 barg.

No obstante, la tecnología empleada en la fabricación de las botellas o cilindros es muy diferente en cada caso. Todos ellos deberán construirse con paredes gruesas y con materiales de alta resistencia y muy duraderos. En el siguiente apartado se exponen las características de las distintas tecnologías.

NOTA: La terminología “gas a alta presión” se refiere generalmente a presiones por encima de los 200 barg cuando se usa en relación a los sistemas de almacenaje. No obstante, cualquier gas con presiones por encima de los 2 barg tiene el potencial suficiente como para causar daños severos en las personas, por lo que esas presiones deberán ser consideradas también “elevadas” por las personas.



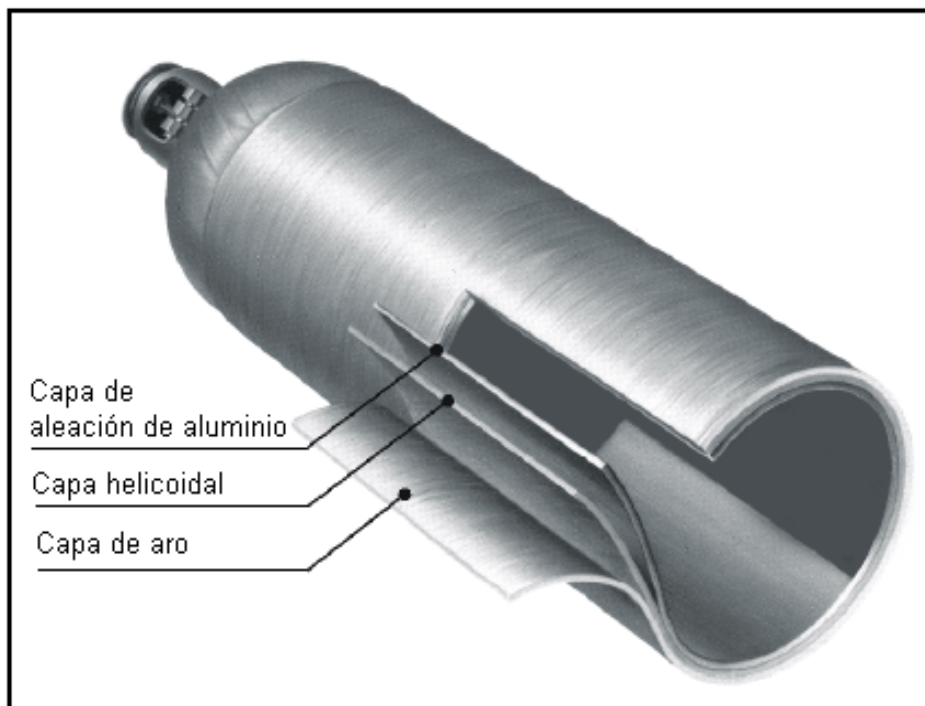
3.1.1. TECNOLOGÍAS DE CILINDROS

Los cilindros para almacenamiento de gases a alta presión se dividen en cuatro categorías

Designación	Descripción
Tipo I	Son las botellas tradicionales, hechas completamente de metal, generalmente acero. Debido a su elevado peso, su uso para almacenar hidrógeno como combustible resulta inviable en el caso de los vehículos.
Tipo II	Son cilindros de metal, generalmente aluminio, reforzado en su parte recta con materiales compuestos (fibras de vidrio o carbono), que ofrecen la ventaja de una reducción en peso frente a los de tipo I y que son los que normalmente se emplean en vehículos cuyo combustible es el gas natural.
Tipo III	Estos cilindros están formados por una delgada capa metálica llamada liner, recubierta de materiales compuestos. Los materiales compuestos son los que soportan los esfuerzos mecánicos mientras que el liner evita el paso del hidrógeno. Estos cilindros soportan presiones superiores que los de tipo I y II, con lo que se reducen significativamente las necesidades de espacio al no tener que hacerse las paredes del cilindro tan gruesas.
Tipo IV	Son cilindros como los de tipo III, pero en este caso el liner es un polímero en lugar de un metal. Trabajan con las mismas presiones y tienen un peso algo menor, sin embargo, la difusividad del hidrógeno a través del liner es mayor, lo que puede resultar un problema de seguridad, y por otro lado, soportan un número menor de ciclos de carga y descarga.

TABLA 2.5. Categorías de cilindros

Fuente: Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro, Andrés Causapé



GRÁFICA 2.14. Cilindro de tipo constructivo III

Fuente: Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro, Andrés Causapé

Los cilindros de tipo I y tipo II llegan a presiones de trabajo de unos 300 barg, mientras que los tipos III y IV tienen presiones de diseño de hasta 700 barg cuando están destinados a ir a bordo de un vehículo, y de hasta 800 barg cuando van destinados a aplicaciones estacionarias. En la actualidad existen programas de investigación para construir cilindros de hasta 1000 barg, pero, si tenemos en cuenta el gráfico anterior en el que se muestra la densidad del hidrógeno en función de la presión, es poco probable que se desarrollen presiones superiores porque la ganancia en densidad será cada vez menor.

Es importante destacar el elevado coste de los materiales compuestos. Así, un cilindro de tipo I para presiones de 200 barg puede costar alrededor de 250 \$/kg de H₂ de capacidad, mientras que uno de tipo III puede costar 1000 \$/kg si es para 350 barg y hasta 1700 \$/kg si es para 700 barg. (Estos valores son referenciales, se refieren a botellas relativamente grandes, tamaño estándar y volúmenes apreciables de producción. El precio de las

botellas más pequeñas, construidas a medida y para altas presiones es sensiblemente más elevado).

Otro aspecto a tener en cuenta es que, si el vehículo va equipado con varios cilindros, como es el caso de los autobuses, suele quedar más espacio sin utilizar, debido al espacio residual entre las botellas.

Las altas temperaturas debidas a un ambiente caluroso, o como resultado de la compresión durante el aprovisionamiento de combustible, pueden aumentar la presión de almacenaje hasta un 10% o más. Cualquier gas almacenado a estas altas presiones es extremadamente peligroso, y es capaz de lanzar un chorro de gas con una fuerza explosiva o lanzar pequeños proyectiles como si de balas se trataran.

A pesar del peligro potencial, los cilindros de alta presión disponen de un excelente expediente de seguridad. El diseño de un cilindro debe someterse a rigurosas pruebas y pasar satisfactoriamente las pruebas de certificación. Los cilindros se certifican siempre para cada gas específico que deban contener, y deben superar rigurosas pruebas de fiabilidad antes de ser puestos en servicio.

3.2. HIDRÓGENO LIQUIDO (LH2)

Los sistemas de almacenaje de hidrógeno en estado líquido solventan muchos de los problemas relacionados con el peso y el tamaño que tenían los sistemas de almacenaje de gas a alta presión, no obstante, a temperaturas criogénicas. Además, enfriando el hidrógeno hasta que su estado se vuelva líquido, aumentaremos su densidad, con lo que haremos más fácil su transporte.

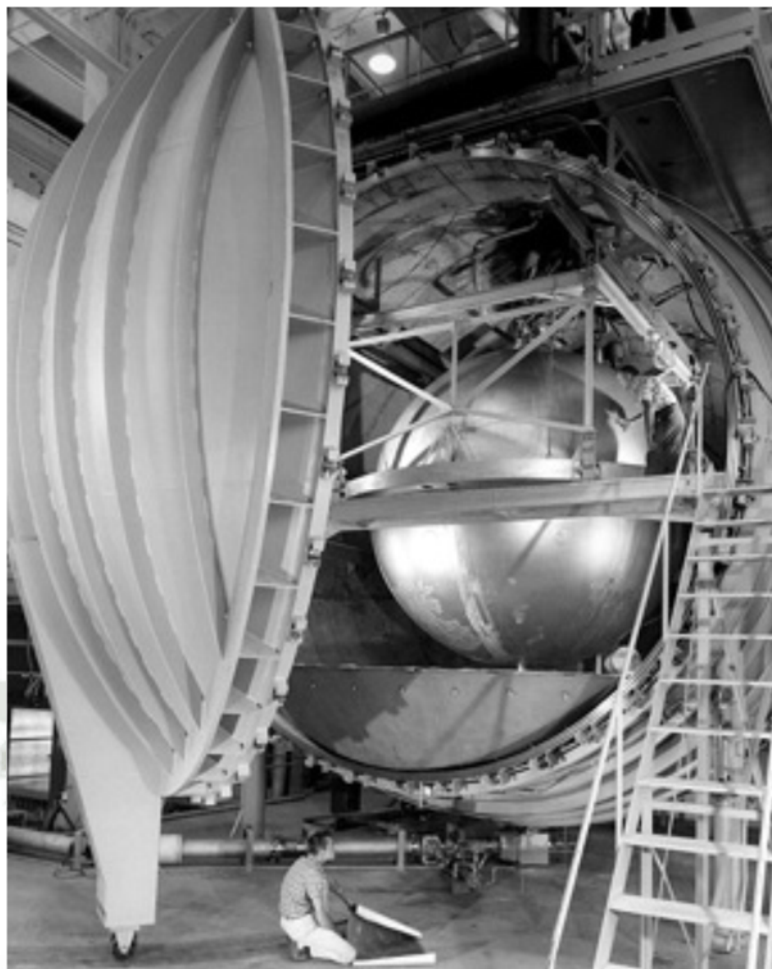
El hidrógeno liquido puede almacenarse sólo por debajo de su punto normal de ebullición, a -253°C , o cerca de la presión ambiental en un tanque súper-aislante de doble pared (o tanque Dewar). Éste aislamiento es la

parte fundamental de la tecnología de estos tanques y está formado por varias capas de vacío separadas por capas de fibras. Además, este aislamiento permite que el hidrógeno permanezca en estado líquido dentro del tanque hasta 10 días antes de que sea necesario expulsar parte del hidrógeno al exterior y, una vez que se empiezan a producir expulsiones, el ritmo de pérdida diaria es del 1% al 2% de su capacidad total.

Los tanques que se emplean a bordo de los vehículos contienen una mezcla bifásica de hidrógeno que se mantiene a una presión de entre 3 y 10 bares aproximadamente. Si la presión es demasiado baja, parte del hidrógeno se vaporiza por medio de una resistencia eléctrica o permitiendo el intercambio de calor con el exterior, y si, por el contrario, la presión es demasiado elevada, se expulsa parte del hidrógeno gaseoso.

El proceso de licuefacción de hidrógeno requiere mucha energía (entre el 30% y el 40% del contenido energético del hidrógeno licuado) y resulta tecnológicamente complejo. De hecho, sólo existen veinte plantas de este tipo en todo el mundo, de las cuales cuatro se encuentran en Europa: dos en Alemania, una en Holanda y otra en Francia.

El hidrógeno no se puede almacenar en estado líquido indefinidamente. Todos los tanques, no importa lo bueno que sea su aislamiento, permiten que una cierta cantidad de calor del ambiente de los alrededores se transfiera al interior del tanque. Este calor hará que el hidrógeno que hay en el interior del tanque se evapore, y por tanto, la presión del mismo aumentará. Los tanques de almacenaje de hidrógeno líquido estacionarios (inmóviles), normalmente son de forma esférica, dado que esta forma geométrica ofrece la menor área superficial para un volumen dado, con lo que tendrá el área más pequeña de transferencia térmica.



GRÁFICA 2.15. Tanque de almacenaje de hidrógeno líquido
Fuente: Lewis Research Center

Los tanques para vehículos se fabrican con formas cilíndricas, no tanto por la presión interior sino para maximizar el volumen interno frente a la superficie de intercambio de calor con el exterior. Por ello, se intentará que la longitud y el diámetro sean lo más parecidos posible, aunque las necesidades de cada proyecto en concreto pueden forzar a utilizar otras geometrías con peores prestaciones.



*GRÁFICA 2.16. Tanque de almacenaje de hidrógeno líquido usado en
automoción*

Fuente: Honda FCX

El uso de unas temperaturas tan reducidas no solo presenta el problema del aislamiento antes comentado, sino también otros problemas como la contracción y fragilización de los materiales, la posibilidad de congelación del oxígeno del aire circundante, el posible derrame en caso de accidente y su rápida expansión en contacto con el aire.

A continuación, y antes de pasar a estudiar otros sistemas de almacenamiento de hidrógeno menos comunes, o mejor dicho, menos desarrollados, se ofrecen una serie de conclusiones sobre los dos métodos de almacenamiento de hidrógeno ya expuestos:

- A. El almacenamiento gaseoso requiere utilizar muy altas presiones. Se han construido sistemas a 700 bares, requiriendo 6,5 veces más en volumen y 5,5 veces más en peso que un sistema de gasolina y el empleo de presiones mayores no aportará mejoras significativas.

- B. El almacenamiento líquido supone temperaturas criogénicas y un gran coste energético en el proceso de licuefacción. El sistema de almacenamiento requiere 3,7 veces más en peso y 3,8 veces más en volumen que uno de gasolina.
- C. El coste de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno es muy elevado, sobre todo gaseoso, por la necesidad de utilizar materiales como fibras de vidrio o de carbono.
- D. Por sus propiedades físicas, el hidrógeno como combustible de vehículos, almacenado como gas o como líquido, no podrá ofrecer las mismas prestaciones que la gasolina en cuanto a volumen.
- E. En cuanto al peso, el problema se debe a los tanques de almacenamiento y no al propio hidrógeno. Es posible que estos sistemas mejoren en el futuro, pero no es probable que lleguen a ofrecer las mismas prestaciones que un depósito de gasolina.
- F. Por ello, el almacenamiento condicionará fuertemente el diseño de los vehículos propulsados a hidrógeno o éstos sólo podrán ofrecer autonomías sensiblemente inferiores a los actuales.
- G. Otras tecnologías de almacenamiento podrían ofrecer mejores prestaciones. No obstante, hoy en día no están disponibles comercialmente.

4. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

4.1. TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO EN FORMA GASEOSA

La distribución a través de semirremolques con botellas a 200 bares, con una capacidad de 300 kg de hidrógeno, es la más adecuada para unas demandas bajas como las que se están dando y se van a dar a corto plazo.



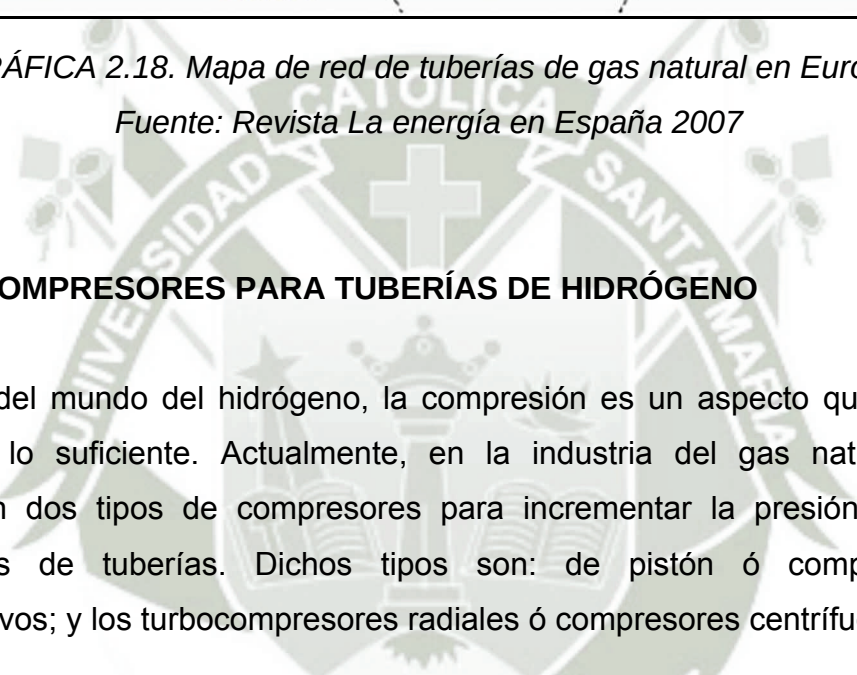
GRÁFICA 2.17. Botellas que contienen hidrógeno comprimido, transportadas en semirremolque

Fuente: Calvera

Cuando haya un aumento de la demanda, a medio plazo, este sistema de distribución no será suficiente y será necesario realizar la distribución a través de cisternas de hidrógeno líquido, con una capacidad de 3.000 kg de hidrógeno. A largo plazo, con una introducción total en el mercado, la forma de distribución más viable técnica y económicamente será a través de tuberías, mediante una red canalizada de hidrógeno.

El creciente interés en el uso del hidrógeno como vector energético, ha dado lugar a numerosos estudios acerca de la viabilidad del transporte de hidrógeno mediante tuberías. Se comparan entonces las tuberías de hidrógeno con las tuberías de gas natural ya existentes. La estructura de los sistemas de hidrógeno es similar a la del gas natural, con algunos cambios en ciertos parámetros, como el diámetro, el nivel de presión y las distancias entre las estaciones de compresión, debido a las propiedades físico – químicas del hidrógeno gaseoso.

El hidrógeno ya es suministrado hoy en día mediante tuberías en varias áreas industriales de los Estados Unidos, Canadá, y Europa. Las presiones de funcionamiento típicas van de 1 a 3 MPa, con caudales de 310 a 8.900 kg/h. Alemania dispone una tubería de 210 km. que funciona desde 1939, llevando 8.900 kg/h de hidrógeno operando a presiones de 2 MPa. La tubería más larga de suministro de hidrógeno del mundo es propiedad de Air Liquide, con una longitud de 400 km., y que conecta el norte de Francia con Bélgica. En Estados Unidos hay más de 720 km. de tuberías de hidrógeno concentradas a lo largo de la costa del Golfo y la región de los Grandes Lagos. Con los objetivos de mejorar la logística del hidrógeno, se han lanzado en Europa proyectos como el NATURHY para investigar sobre la distribución de hidrógeno a través de las tuberías de gas natural.



Fuente: Revista La energía en España 2007

del mundo del hidrógeno, la compresión es un aspecto que requiere de más investigación y desarrollo. Actualmente, en la industria del gas natural se utilizan dos tipos de compresores para incrementar la presión en las tuberías. Dichos tipos son: de pistón ó compresores de tornillo; y los turbocompresores radiales ó compresores centrífugos.

a las diferencias entre las propiedades del gas natural y el propano, se producen problemas en ambos tipos de compresores al utilizar el mismo equipo con ambos gases. Esta es una de las razones por las que debería que modificar su diseño, para que pudieran operar con cualquiera de los dos gases.

Por lo tanto, el principal problema no recae en el diseño, sino en las condiciones de capacidad, presiones operativas, relación de compensación y presiones de presión.

4.2. TRANSPORTE DE Hidrógeno EN FORMA LIQUIDA

El transporte de hidrógeno en estado líquido está bien establecido, y se realiza a través de transporte rodado (camiones), ferrocarril y transporte marítimo.

El hidrógeno líquido se transporta por medio de contenedores aislados especiales de doble pared para prevenir los problemas de vaporización. Algunos contenedores usan nitrógeno líquido a modo de camisa exterior para minimizar la transferencia de calor al interior del tanque. Los contenedores pueden ser transportados en camiones con capacidades que van desde los 360 a los 4.300 kg. de hidrógeno líquido (estaríamos hablando de unos 50.000 litros de hidrógeno aproximadamente). Los contenedores transportados por ferrocarril tienen aún mayores capacidades, pudiendo llevar cantidades que van desde los 2.300 a los 9.100 kg. de hidrógeno (capacidad de unos 100.000 litros de hidrógeno aproximadamente). La cantidad de hidrógeno vaporizado en este tipo de contenedores suele ser del 0,3 al 0,6% del contenido total al día.



GRÁFICA 2.19. Ejemplos de transporte por tierra

Fuente: Praxair

El transporte de contenedores por mar debe ser considerado para el suministro a largas distancias. Canadá ha desarrollado varios diseños de embarcaciones para el transporte trasatlántico del hidrógeno.



GRÁFICA 2.20. Ejemplo de transporte por mar

Fuente: Novatek

El hidrógeno se transporta en estado líquido por una cuestión económica. Un camión cisterna llega a transportar, en hidrógeno líquido, el equivalente de hasta 15 a 30 camiones que transporten hidrógeno gaseoso a alta presión. Posteriormente a su transporte, el hidrógeno se convierte a gas ya en la planta donde vaya a ser utilizado. La capacidad típica de estos convertidores es de hasta 3.000 m³/h.

Otra idea para el suministro del hidrógeno líquido sería a través de una tubería aislada que incluyese también un cable superconductor. El hidrógeno líquido actuaría como refrigerante para el superconductor y permitiría el transporte de energía eléctrica eliminando las pérdidas de las líneas eléctricas convencionales. Los problemas principales para el transporte del hidrógeno líquido son los especiales requerimientos de aislamiento y las pérdidas durante el bombeo y el reenfriamiento del hidrógeno líquido a lo largo del transporte.

4.3. HIDROGENERAS

Las prioridades principales en los usuarios finales son: la seguridad, el tiempo de recarga, el coste y la disponibilidad, siendo de mayor importancia la primera.

Si bien se lleva utilizando el hidrógeno en la industria durante muchos años ya, el uso por personal no cualificado de forma segura es algo nuevo. Esto va a implicar un diseño de los surtidores de manejo muy sencillo y a prueba de fugas o errores. La disponibilidad suficientemente extensa y el sobre coste que la estación de servicio tenga sobre el precio final del combustible son temas económicos que probablemente tengan su solución a largo plazo. Por último, la velocidad de recarga es un problema técnico, que afectará al diseño del esquema de carga y dependerá del tipo de combustible que se imponga (hidrógeno comprimido, licuado o combinado en un compuesto líquido). Los gestores de las estaciones de servicio tienen prioridades parecidas. En este caso existirán dos tipos de instalaciones diferentes, las que tengan producción “in situ” y las que se provean de hidrógeno producido de forma externamente. Para ambos la seguridad, no sólo del cliente, sino de su personal y de toda la instalación, es una prioridad, y para que esta seguridad no encarezca las instalaciones de forma desmesurada, es importante el desarrollo de estándares. La velocidad de recarga, que permita una mayor utilización de las instalaciones es también un parámetro de interés, aunque no el más crítico. El que sí lo será, en este caso, es el económico, que engloba tanto la inversión inicial, los costes de mantenimiento de los equipos y el coste de personal. Aunque este dependerá de si las estaciones de servicio tienen o no producción, en ambos casos, será necesario que el personal que deba estar de forma permanente en las estaciones de servicio no sea de formación alta, pues esto supondría unos costes inviables.

Por último, los requisitos de las empresas energéticas son claros: unos costes mínimos de transporte. Esto implica que estas empresas son las más

interesadas en buscar el óptimo sistema de suministro, probablemente una mezcla de soluciones entre transporte por carretera, por tubería y producción in situ del hidrógeno.

A lo largo de los próximos años se verá una notable evolución desde las actuales gasolineras hasta las hidrogeneras finales.

Los principales equipos de la estación de servicio que se verán modificados por la aplicación del hidrógeno serán el surtidor, el sistema de carga, el sistema de almacenamiento, los sistemas de seguridad y el sistema de abastecimiento.

El primero de estos equipos sufrirá cambios diferentes dependiendo del modo de suministrar el hidrógeno que se imponga. Así, si la manera de cargar el hidrógeno en el vehículo es combinado en un compuesto químico (líquido), los cambios serán apenas apreciables. En el caso que se imponga el hidrógeno líquido, el surtidor tendrá que soportar temperaturas muy bajas, y por lo tanto, se necesitarán materiales especiales, y un sistema de retorno del hidrógeno evaporado (inevitable en el momento de la carga). Por último, en el caso más probable que sea el hidrógeno gaseoso lo que se cargue en el vehículo, aún queda la incertidumbre de la presión a la que éste se ha de suministrar. Esta presión dependerá sólo y exclusivamente del sistema de almacenamiento del automóvil. En la actualidad, el sistema más extendido es en tanques de hidrógeno comprimido. El aumentar la presión de carga implica un aumento en el peso del surtidor, por lo que dificulta su uso por el público en general. Otro aspecto que se verá afectado es la medida de cuanto se ha cargado. Esta probablemente se haga en términos másicos, e implicará la medida de la temperatura y presión del sistema de almacenamiento del vehículo. Estos sistemas ya existen, aunque probablemente tendrá lugar una mejora paulatina de los mismos.

La estrategia de carga es otro de los puntos clave del sistema. Afecta a varias de las prioridades de los grupos de interés mencionados, y es un

problema sobre todo técnico. Siempre centrados en el caso de suministro de hidrógeno gaseoso a alta presión, existen dos esquemas básicos de carga, almacenamiento a alta presión y descarga sobre el vehículo, o almacenamiento a presión media y compresión en el momento de la carga. El primero de estos esquemas implica dos sistemas de almacenamiento (uno a alta y otro a “baja” presión) y un compresor de bajo caudal que comprima de forma continua el hidrógeno desde el primer nivel de presión de almacenamiento hasta una presión superior a la presión que se pretenda repostar. El sistema de almacenamiento final siempre ha de estar a plena carga, y la velocidad de repostado depende de la presión de partida del vehículo. En el segundo caso implica un solo sistema de almacenamiento pero un compresor de alto caudal que se utilizaría sólo en los momentos de carga del vehículo. También en este caso la velocidad de repostado depende de la relación entre las presiones del vehículo, y en este caso la del sistema de almacenamiento (que no ha de ser fija). No está claro aún cuál de los dos sistemas es más eficiente, fiable o rápido, mostrando ambos ventajas e inconvenientes que se están estudiando. Al final, se han de lograr unos tiempos de repostado similares a los actuales, con un mínimo coste energético y las mínimas pérdidas de hidrógeno posibles.

El sistema de almacenamiento de hidrógeno en la estación de servicio es uno de los temas que más puede variar a lo largo de los próximos años. Las alternativas principales son cuatro: hidrógeno combinado en un líquido (en este caso el almacenamiento sería en depósitos enterrados igual al actual hidrógeno líquido), hidrógeno gaseoso a presión o hidrógeno gaseoso en otros sistemas, donde los hidruros metálicos aparecen como la alternativa actual y otros sistemas aparecen como prometedores. La solución no será única, sino que dependerá del sistema de distribución, el tamaño de la estación y su situación respecto a la población (que condicionará el precio del suelo y las medidas de seguridad necesarias) y a las fuentes de materias primas (disponibilidad de gas natural, cercanía a plantas de producción de hidrógeno, etc.).

El uso de combustibles gaseosos también va a tener su implicación en las medidas de seguridad que se tengan que tomar en las estaciones de servicio. Las principales diferencias frente a las medidas actuales se centrarán en la detección de fugas y atmósferas explosivas. En el caso de la producción “in situ” también se han de establecer medidas adicionales para evitar accidentes.

Por último, una de las principales diferencias con las estaciones de servicio actuales se verá en el modo de abastecimiento. En este caso vuelven a aparecer varias alternativas, como ya se dijo anteriormente y que probablemente coexistan en una mezcla de soluciones parciales. Lo más probable es que la infraestructura de suministro evolucione desde la producción distribuida en las estaciones de servicio (que inicialmente serán para flotas pequeñas) pasando por una producción distribuida a una escala intermedia, donde una sola planta suministre una pequeña zona, a una situación final con grandes plantas y distribución por red de tubería o hidrógeno licuado. En el caso de estaciones de servicio con producción “in situ”, estos sistemas han de ser suficientemente compactos para no aumentar el espacio a ocupar por la estación, lo que aumentaría la inversión, automáticos y de control remoto, para no aumentar los costes de personal aumentando las necesidades de formación de los operarios, y suficientemente fiables para no tener problemas de suministro o necesidades excesivas de suministro complementario. Las tecnologías que parecen imponerse en este tipo de instalaciones son el reformado de hidrocarburos, cuya logística ya está solucionada, aunque existe el problema de emisiones de CO₂ y la electrólisis de agua, que sólo soluciona el problema de emisiones si la electricidad proviene de fuentes limpias como las renovables y cuya fiabilidad ha de mejorar.

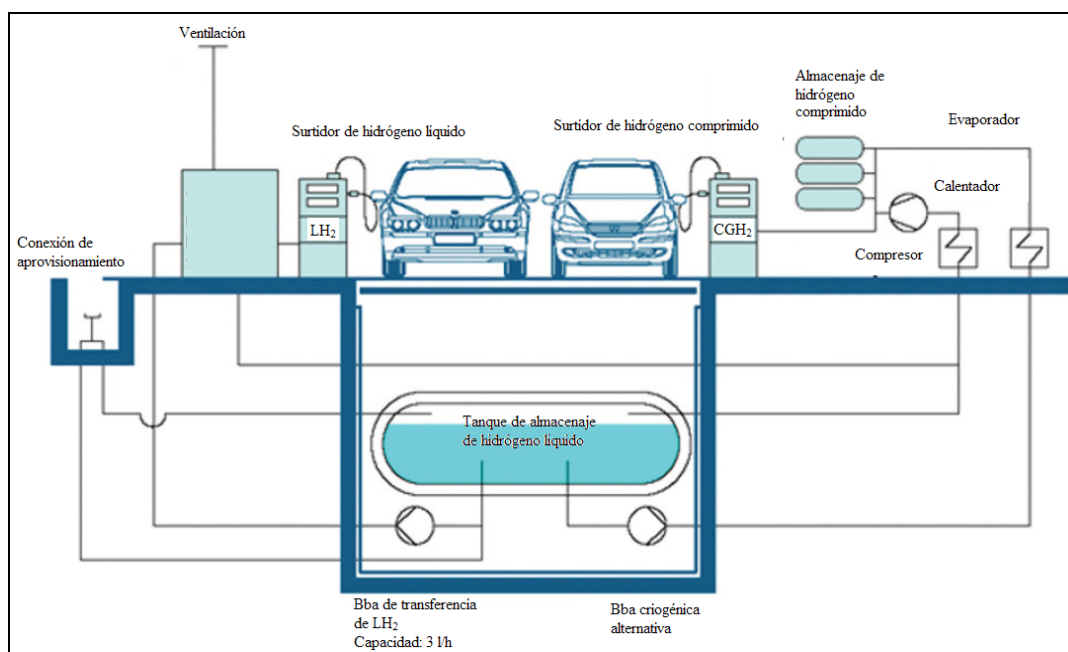
En el caso de suministro del hidrógeno de fuentes externas, el suministro por tubería se realizará de forma equivalente a como se realiza el de gas natural en la actualidad, mientras que el realizado por carretera será probablemente de hidrógeno licuado, donde las únicas variaciones respecto

al suministro actual de combustibles líquidos será la tecnología de almacenamiento y trasvase. El suministro por carretera de hidrógeno comprimido no parece que vaya a ser una de las vías principales (salvo saltos tecnológicos en el almacenamiento de hidrógeno comprimido) por la baja densidad energética alcanzada por esta vía, lo que implicaría un número desmesurado de movimientos de camiones. Sólo como medio de suministro complementario parece que esta tecnología pueda tener relevancia para el abastecimiento de las estaciones de servicio.



GRÁFICA 2.21. Hidrogenera situada en la Zona Franca (Barcelona) para abastecer a los autobuses del proyecto CUTE

Fuente: CUTE



GRÁFICA 2.22 Esquema de hidrogenera propuesta por Linde

Fuente: Linde

5. MOTORES DE HIDRÓGENO

Una vez vistas las propiedades y métodos de obtención, almacenaje y transporte del hidrógeno, en el presente capítulo pasaremos a hablar sobre su aplicación en motores de combustión interna, utilizándolo como combustible directo.

Para ello, en primer término se ofrecerá un pequeño repaso histórico sobre su aplicación, para más adelante pasar a explicar los aspectos que caracterizan a los motores alimentados por este posible combustible del futuro.

5.1. BREVE HISTORIA SOBRE LOS MOTORES DE HIDRÓGENO

Ya en el siglo XVI se había observado por parte de los alquimistas que, cuando el aceite de vitriolo (nombre que éstos daban al ácido sulfúrico H_2SO_4) actuaba sobre las limaduras de hierro, se desprendía un gas combustible de naturaleza, por aquel entonces, desconocida.

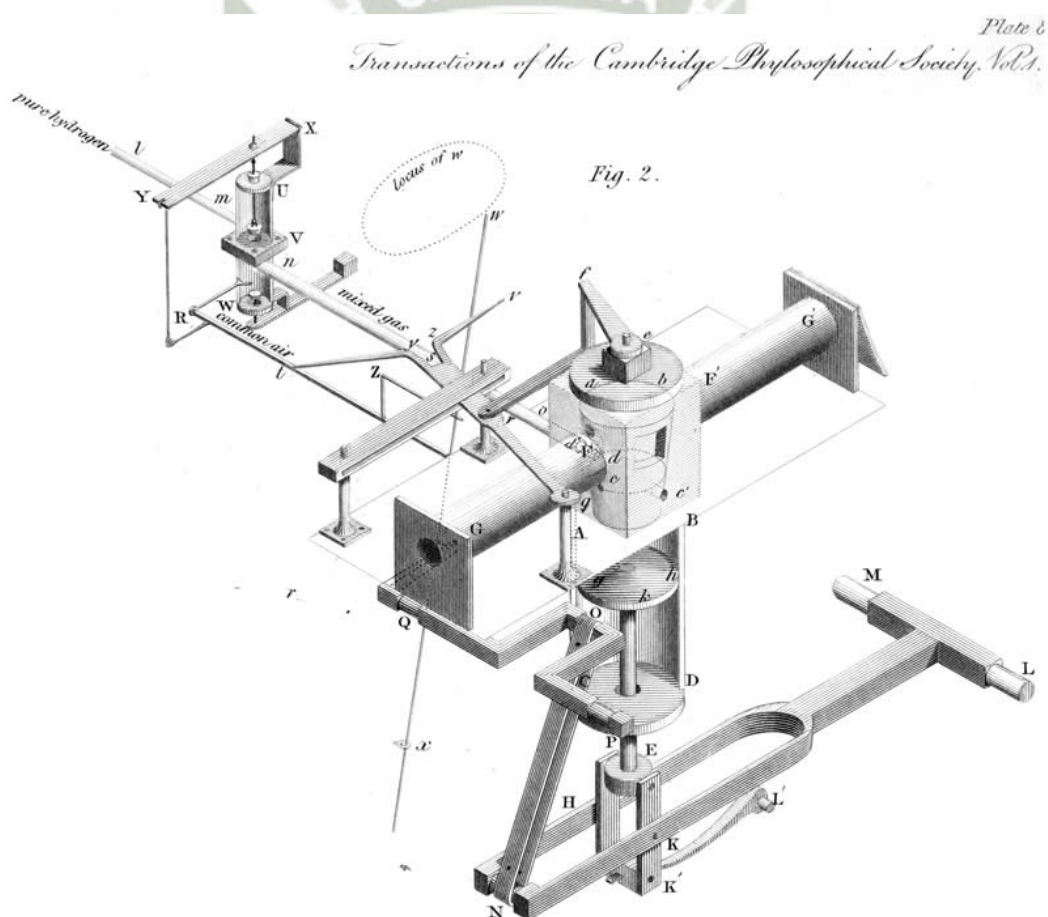
Henry Cavendish, en 1766, observó que este gas era diferente de otros gases inflamables y lo denominó aire inflamable, aunque se equivocó al suponer que procedía del metal y no del ácido.

En 1781, el propio Cavendish observó que cuando este gas ardía en el aire y en el oxígeno, se formaba agua, descubrimiento que indujo a Antoine Lavoisier a llamarlo Hidrógeno, es decir, productor de agua (del francés Hydrogène, a su vez del griego $\nuδρῶ$, “agua” y $γενος-ου$, “generar”).

El hidrógeno fue licuado por primera vez en 1898 por James Dewar (1842 – 1923). Comúnmente se coloca en el grupo primero de la tabla periódica, aunque sus propiedades no tienen nada que ver con las de dicho grupo.

El interés por el hidrógeno como combustible no es tan reciente como se

pueda creer. La tentativa más temprana en desarrollar un motor alimentado por hidrógeno fue divulgada por el reverendo W. Cecil en 1820. Cecil presentó su trabajo ante la Cambridge Philosophical Society en un papel titulado “En la aplicación del gas de hidrógeno para producir energía móvil en una máquina”. El motor funcionó basándose en el principio de vacío, en donde la presión atmosférica mueve el pistón contra el vacío para producir potencia. El vacío se creaba quemando una mezcla de hidrógeno y aire, permitiendo que se expandiese y que posteriormente reenfriarse. Aunque el motor funcionó satisfactoriamente, los motores de vacío nunca llegaron a ser prácticos.



GRÁFICA 2.23. Motor ideado por el reverendo W. Cecil en 1820

Fuente: <http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/projects/cecil/index.html>

Sesenta años más tarde, durante su trabajo con los motores de combustión, durante las décadas de 1860 y 1870, Nikolaus August Otto (el inventor del ciclo Otto), utilizó, según se informa, un productor sintético de gas para el combustible, que probablemente contenía hidrógeno en un 50%. Otto experimentó también con gasolina, pero considerando que era peligroso trabajar con ese combustible, decidió volver a usar los combustibles gaseosos. El desarrollo del carburador, no obstante, inició una nueva era en la cual la gasolina pudo usarse de manera práctica y segura, con lo que desplomó el interés por los demás combustibles.

Varios años más tarde, cuando se comenzaron a construir los dirigibles, que eran básicamente globos de hidrógeno, el ingeniero alemán Rudolph Erren trabajó en un motor para estos aparatos cuyo combustible era el hidrógeno. Llegó a resolver los problemas de autoencendido en el carburador mediante la inyección directa y, de no ser por ciertos acontecimientos (entiéndase el desgraciado accidente del Hindenburg) y por el descubrimiento de grandes y accesibles yacimientos de petróleo, podría haber sido posible la construcción de dirigibles a hidrógeno.

Desde entonces, el hidrógeno se ha utilizado extensivamente en el programa espacial, puesto que dispone de la mejor relación energía/peso de cualquier combustible. Esto, junto a la carrera espacial entre la antigua U.R.R.S. y los Estados Unidos se produjo un gran avance en el manejo del hidrógeno. El hidrógeno en estado líquido es el combustible elegido para los motores espaciales, además de propulsar a varios vehículos en diversas misiones espaciales, incluyendo las misiones Apollo en la Luna, Skylab, las misiones Viking en Marte y la misión Voyager a Saturno.

Durante los últimos años, la preocupación por un aire más limpio, junto con una regulación más estricta de la contaminación atmosférica y el deseo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, han hecho despertar de nuevo el interés por el hidrógeno como posible combustible para vehículos.

5.2. PROPIEDADES COMBUSTIBLES DEL HIDRÓGENO

Las propiedades del hidrógeno ya se han detallado ampliamente. A continuación se hace solo un repaso de aquellas que contribuyen a usarlo como combustible. Estas propiedades son:

- Amplia gama de inflamabilidad.
- Baja energía de ignición.
- Pequeña distancia de apagado.
- Temperatura de autoignición elevada.
- Alta velocidad de llama en condiciones estequiométricas.
- Elevada difusividad.
- Muy baja densidad

5.2.1. AMPLIA GAMA DE INFLAMABILIDAD

El hidrógeno dispone de una amplia gama de inflamabilidad en comparación con el resto de combustibles. Como consecuencia, el hidrógeno puede ser quemado en un motor de combustión interna sobre una amplia gama de mezclas aire/combustible. Una ventaja significativa de esto es que el hidrógeno puede funcionar aún en una mezcla pobre, es decir, donde la cantidad de combustible es menor que la cantidad teórica, estequiométrica o químicamente ideal necesaria para la combustión con una cantidad dada de aire. □

Generalmente, la economía del combustible es mayor y la reacción de combustión es más completa cuando un vehículo funciona con una mezcla pobre de aire/combustible. Además, la temperatura final de la combustión es generalmente más baja, reduciendo así la cantidad de agentes contaminantes, tales como óxidos de nitrógeno, emitidos a través del escape.

5.2.2. BAJA ENERGÍA DE IGNICIÓN

El hidrógeno tiene una energía de ignición muy baja. La cantidad de energía necesitada para prender el hidrógeno es mucho menor que en el caso de la gasolina. Esta característica permite a los motores de combustión interna de hidrógeno quemar mezclas pobres y asegurar una rápida ignición.

□

Desafortunadamente, la baja energía de ignición significa que los gases calientes y las zonas calientes del cilindro, pistón, válvulas... pueden actuar como fuentes de ignición, creando problemas de ignición prematura y retroceso de llama. Prevenir este hecho es uno de los desafíos asociados cuando se diseña un motor de combustión interna de hidrógeno y debido a ello se deben considerar una serie de cambios necesarios para quemar hidrógeno en un motor de combustión interna: □

El primer cambio es referente a las bujías. Deberán ser de tipo frías y no deberán disponer de punta de platino, debido a que el platino es un catalizador, promoviendo la ignición. Los conectores de tipo frío están diseñados para enfriarse rápidamente y, por lo tanto, evitar la posibilidad de actuar como bujía incandescente causando la pre-ignición. Las bujías con punta de alambre fino de iridio son las que mejor actuarían en los motores de combustión interna de hidrógeno. Las bujías deberán situarse con espacios en torno a 0,0381 cm., aunque se han realizado pruebas colocándolas a distancias de tan solo 0,0178 cm. del pistón. No obstante, no se recomiendan distancias superiores a 0,0635 cm. ó más, aunque el motor seguiría funcionando correctamente. □

El segundo cambio se refiere al tipo de aceite lubricante utilizado. Deberá utilizarse aceite sintético con el fin de evitar la pirolisis causada por pequeñas zonas calientes de la cámara de combustión, que llegarían a provocar la preignición del combustible. La pirolisis es un proceso de descomposición térmica que puede llegar a destruir el aceite y descomponerlo. Con el fin de evitar que suceda esto, deberán instalarse

sistemas de ventilación del cárter y separadores de aceite. Además, para reducir la posibilidad de que se filtre aceite en la cámara de combustión se recomienda aplicar recubrimiento de diamante en los asientos de las válvulas, mientras que los pistones deberán fabricarse de material hipereutéctico y deberán ser de tipo “faldón” con tolerancias mucho menores a las normales. Realizando un control en los gases de escape para detectar la presencia de hidrocarburos nos indicará el buen sellado del motor (en lo que se refiere a no permitir que el aceite pase a la cámara de combustión).

5.2.3. PEQUEÑA DISTANCIA DE APAGADO

El hidrógeno, cuando se quema, tiene una distancia de apagado muy pequeña, más pequeña que en el caso de la gasolina. Por este motivo, las llamas de hidrógeno circularán más cerca de las paredes del cilindro que otros combustibles antes de extinguirse. Por lo tanto, resultará más difícil apagar una llama de hidrógeno que una llama de combustible.

La menor distancia de apagado puede incrementar también la tendencia a que se produzca el fenómeno de retroceso de llama, puesto que la llama de la mezcla aire/hidrógeno puede introducirse más fácilmente a través de una válvula de admisión entreabierta que si se tratase de una mezcla aire/gasolina.

5.2.4. TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN ELEVADA

El hidrógeno dispone de una temperatura de autoignición relativamente elevada. Esto tiene implicaciones importantes cuando se comprime una mezcla de aire e hidrógeno. De hecho, la temperatura de autoignición es un factor importante en la determinación de la relación de compresión que debe tener un motor, puesto que el aumento de temperatura durante la compresión está relacionado con la relación de compresión.

El aumento de temperatura viene determinado por la siguiente ecuación:

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma-1}$$

Donde:

- V_1/V_2 = relación de compresión
- T_1 = temperatura inicial absoluta
- T_2 = temperatura final absoluta
- γ = relación de calores específicos

La temperatura final absoluta limita la relación de compresión. La elevada temperatura de autoignición del hidrógeno permite usar mayores relaciones de compresión en este tipo de motores que en motores alimentados por combustibles fósiles.

5.2.5. ALTA VELOCIDAD DE LLAMA

El hidrógeno tiene una alta velocidad de llama en condiciones estequiométricas. Bajo estas condiciones, la velocidad de llama del hidrógeno es bastante más elevada que en el caso de la gasolina. Esto significa que los motores de combustión interna de hidrógeno podrán acercarse más al ciclo termodinámico ideal del motor. No obstante, con mezclas pobres de aire/hidrógeno, la velocidad de la llama disminuye significativamente.

5.2.6. ALTA DIFUSIVIDAD

El hidrógeno tiene una difusividad muy alta. Esta capacidad para dispersarse en el aire es considerablemente mayor que en el caso de la gasolina, y resulta ventajoso por dos razones principales. En primer lugar, facilita la formación de una mezcla uniforme del combustible con el aire. En segundo lugar, en caso de producirse una fuga de hidrógeno, éste se dispersará rápidamente.

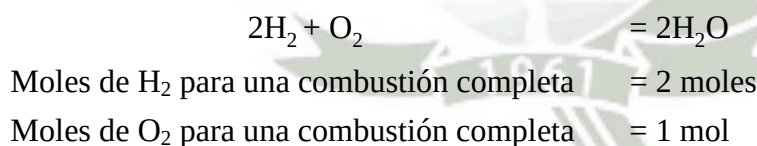
5.2.7. BAJA DENSIDAD

El hidrógeno tiene una densidad muy baja. Esto da lugar a dos problemas cuando se utiliza como combustible en un motor de combustión interna.

En primer lugar afectará al volumen que ocupará el combustible en el interior del cilindro de almacenaje previo a la combustión, siendo necesario un gran volumen de dicho cilindro como para que el vehículo pueda ofrecer unas buenas características de conducción. En segundo lugar, el aumento de volumen del combustible reducirá la cantidad de aire que se puede introducir en el cilindro (y por tanto la densidad de energía de la mezcla aire/hidrógeno), hecho que repercutirá directamente en una disminución de la potencia obtenida. Además, este hecho se convierte en un problema aún mayor al saber que, para conseguir reducir las emisiones de NOx se deben usar mayores cantidades de aire.

5.3. RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

La combustión teórica o estequiométrica del hidrógeno y el oxígeno se da como



Puesto que el aire es utilizado como oxidante, en vez del oxígeno, el nitrógeno que forma parte del aire debe ser incluido en los cálculos:

$$\begin{aligned}\text{Moles de N}_2 \text{ en el aire} &= \text{Moles de O}_2 \cdot (79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire} / 21\% \text{ O}_2 \text{ en el aire}) \\ &= 1 \text{ mol de O}_2 \cdot (79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire} / 21\% \text{ O}_2 \text{ en el aire}) \\ &= 3,762 \text{ moles de N}_2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Número de moles del aire} &= \text{Moles de O}_2 + \text{moles de N}_2 \\ &= 1 + 3,762 \\ &= 4,762 \text{ moles de aire}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del O}_2 &= 1 \text{ mol de O}_2 \cdot 32 \text{ g/mol} \\ &= 32 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del N}_2 &= 3,762 \text{ moles de N}_2 \cdot 28 \text{ g/mol} \\ &= 105,33 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del aire} &= \text{peso del O}_2 + \text{peso del N}_2 \\ &= 32\text{g} + 105,33 \text{ g} \\ &= 137,33 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del H}_2 &= 2 \text{ moles de H}_2 \cdot 2 \text{ g/mol} \\ &= 4 \text{ g}\end{aligned}$$

La relación estequiométrica de aire/combustible (A/C) para el hidrógeno y el aire es:

$$\begin{aligned}\text{A/C basado en la masa:} &= \text{masa del aire/masa del combustible} \\ &= 137,33 \text{ g} / 4 \text{ g} \\ &= 34,33 : 1\end{aligned}$$

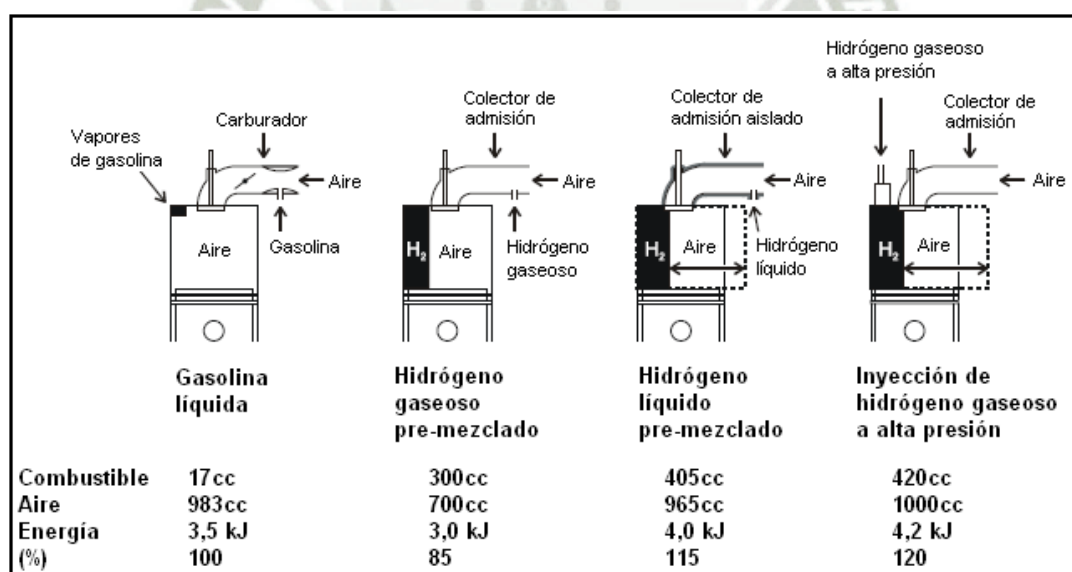
$$\begin{aligned}\text{A/C basado en volumen:} &= \text{volumen (moles) del aire/volumen (moles) del combustible} \\ &= 4,762 / 2 \\ &= 2,4 : 1\end{aligned}$$

Porcentaje de espacio ocupado en la cámara de combustión por una mezcla estequiométrica de hidrógeno:

$$\begin{aligned}\% \text{ H}_2 &= \text{volumen (moles) de H}_2 / \text{volumen total} \\ &= \text{volumen H}_2 / (\text{volumen aire} + \text{volumen de H}_2) \\ &= 2 / (4,762 + 2) \\ &= 29,6\%\end{aligned}$$

Los cálculos demuestran que la relación estequiométrica o químicamente necesaria de aire/combustible, en términos másicos, para la combustión completa de hidrógeno es de 34:1. Esto significa que, para producir una combustión completa, por cada gramo de combustible serán necesarios 34 g de aire. Esta es una relación mucho más elevada que la requerida en motores de gasolina (14,7:1).

Puesto que el hidrógeno es un combustible gaseoso en condiciones ambientales, desplazará mayor parte del volumen de la cámara de combustión que un combustible líquido. Por lo tanto, el aire podrá ocupar menos espacio de la cámara de combustión. En condiciones estequiométricas, el hidrógeno desplaza cerca del 30% del volumen total de la cámara de combustión, en comparación con cerca del 1 – 2% desplazado en el caso de la gasolina.



GRÁFICA 2.24. Comparación de los volúmenes de la cámara de combustión y el contenido en energía para motores de hidrógeno y de gasolina.

Fuente: El hidrógeno y sus aplicaciones Energéticas, Cristóbal Ortiz

Dependiendo del método que utilicemos para introducir el hidrógeno en la cámara de combustión, la energía obtenida a la salida, comparada con la obtenida en un motor de gasolina (100%), variará desde el 85% (inyección por el colector de admisión) hasta el 120% (inyección a alta presión).

Debido al amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno, los motores que utilicen este combustible podrán funcionar con relaciones de aire/combustible desde 34:1 (estequiométrica) hasta 180:1. La relación aire/combustible puede expresarse también en términos de relación equivalente, denominado por ϕ . ϕ es igual a la relación aire/combustible estequiométrica dividida por la relación real. Para una mezcla estequiométrica, la relación aire/combustible real es igual a la relación real, con lo que ϕ se iguala a la unidad (1). Para relaciones aire/combustible pobres, ϕ valdrá menos que la unidad.

Por otra parte, mediante el uso de un turbocompresor instalado en el sistema de escape del motor, tendremos la posibilidad de inyectar mayor cantidad de aire en el interior del motor. No obstante, si se hace uso de un turbocompresor, deberemos tener en cuenta que, a parte de inyectar mayor cantidad de aire en el interior del cilindro, lo estaremos inyectando también a mayor temperatura, hecho que deberemos contrarrestar. Para ello deberá utilizarse un refrigerador de aire de admisión (se recomienda una temperatura máxima de admisión para esta aplicación de 60°C aproximadamente, ya que temperaturas de admisión mayores podrían llegar a causar detonaciones en el combustible, con lo que nos encontraríamos de nuevo con el problema de la preignición).

Por último, el hecho de incorporar un turbocompresor añade el problema del incremento de la temperatura del aceite del motor, ya que será este quien refrigere el turbocompresor. Deberemos tener esto en consideración y solucionarlo, por ejemplo, mediante la instalación de un radiador de aceite.

5.4. PROBLEMAS Y SOLUCIONES DEL PREENCENDIDO

El principal problema que ha surgido con el desarrollo de los motores que operan con hidrógeno es la ignición prematura del mismo. La ignición prematura es un problema mucho mayor en motores de hidrógeno que en cualquier otro tipo de motores de combustión interna, debido a la menor energía de ignición del hidrógeno, un mayor rango de inflamabilidad y una menor distancia de apagado.

Tanto en los motores alimentados por gasolina como en los que funcionan a base de hidrógeno, el mecanismo por el cual se produce el preencendido es el mismo. En cualquiera de los dos casos, los gases de entrada encuentran una fuente de calor con la suficiente intensidad como para iniciar el proceso de combustión de la mezcla mientras la válvula de admisión se encuentra todavía abierta, y cuando todavía no se ha producido el salto de la chispa de la bujía. Las posibles fuentes de calor pueden ser una zona de alta temperatura en la cámara de combustión, como por ejemplo la propia bujía, algún defecto en la cámara de combustión, sustancias depositadas incandescentes, o los propios gases de escape, los cuales podrían conservar todavía una temperatura suficiente para producir la ignición de la mezcla entrante.

Gracias a una serie de experimentos, se ha logrado eliminar algunas de estas posibles causas del preencendido en motores de combustión interna de hidrógeno. En primer término, la posibilidad de que los gases de escape sean los responsables de este problema se desecha debido a que el tiempo durante el cual coexisten éstos gases con la nueva mezcla entrante en el cilindro no es lo suficientemente largo como para que se produzca la ignición. Debido a esto, se ha tratado de eliminar las zonas calientes de la cámara de combustión por medio de la refrigeración de válvulas con sodio o incluyendo bujías construidas con materiales que tengan elevados coeficientes de conductividad térmica.

Se han realizado también otra serie de experimentos con cámaras de combustión inmaculadas y sin ningún tipo de irregularidad en su superficie. Sin embargo, ninguna de estas modificaciones ha conseguido controlar efectivamente el problema del preencendido, con lo que la investigación en este campo se ha encaminado hacia lo microscópico, una vez eliminados los posibles factores macroscópicos.

Se parte de una hipótesis según la cual las partículas sólidas que quedan después de la combustión permanecen a temperaturas mayores que los gases circundantes al final de la carrera de escape, debido a su mayor capacidad calorífica y su mayor masa. Así pues, un primer punto a tener en cuenta consiste en reducir la temperatura de los gases de escape antes de introducir la nueva mezcla, de forma que estas fuentes puntuales de calor no consigan prenderla.

Podría pensarse que un método efectivo consistiría en reducir la temperatura del líquido refrigerante del motor, pero esto no lograría las transferencias de calor necesarias para reducir lo suficiente la temperatura de los gases de escape. También se pueden aplicar técnicas de control de partículas para eliminar esas fuentes puntuales de calor, pero los resultados resultan satisfactorios sólo durante un breve intervalo de tiempo.

La mejor solución consiste en reducir el volumen de la cámara de combustión sin variar de forma significativa la superficie de la misma. Supongamos que se reduce en un 30% el volumen de una determinada cámara de combustión sin cambiar significativamente el área de la superficie del cilindro. Pues bien, entonces los gases residuales serán enfriados un 30% más rápido que antes. Gracias a esto, además, habremos aumentado la relación de compresión en un 37,5%, lo cual implicaría, en un ciclo Otto, un aumento del rendimiento termodinámico del 5%.

Así pues, se ahorraría combustible y se conseguiría un descenso de la temperatura de los gases de escape mediante la reducción de las pérdidas de calor y la mejor conversión de la energía del combustible en trabajo,

además de solucionar el problema del preencendido.

Otro sistema que se ha ideado para evitar los problemas del preencendido es utilizando técnicas de disolución térmica, tales como la recirculación de gases de escape (EGR) o la inyección de agua.

Tal y como indica su nombre, un sistema EGR hace recircular una pequeña cantidad de los gases de escape nuevamente dentro del colector de admisión. La introducción de los gases de escape ayudará a reducir la temperatura de las zonas calientes de la cámara de combustión, reduciendo las posibilidades de que se produzca el preencendido del hidrógeno. Además, haciendo recircular los gases de escape, reduciremos la temperatura máxima de la combustión, con lo que reduciremos las emisiones de NOx. Normalmente, una recirculación de entre el 25% y el 30% de los gases de escape solventan el problema del preencendido.

Por otra parte, al utilizar sistemas EGR, obtendremos menos rendimiento del motor. La presencia de los gases de escape reducirá la cantidad de mezcla de combustible que se puede realizar dentro de la cámara de combustión.

Otra técnica consiste en inyectar agua en la cámara de combustión. Inyectando agua en la corriente de hidrógeno antes de mezclarse con el aire producirá mejores resultados que no introduciéndola en la mezcla aire/hidrógeno dentro del colector de admisión. Una consideración importante a tener en cuenta si se utiliza este sistema es que el agua podría llegar a mezclarse con el aceite del motor, así que debe tenerse especial cuidado en que los aros del pistón sean totalmente estancos.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Teniendo en cuenta los puntos tocados en el capítulo anterior, damos el primer paso evaluando el primer punto importante, sobre como vamos a obtener el hidrógeno, se decidió usar la electrólisis como punto de partida para la generación del hidrógeno en nuestro vehículo de prueba ya que disponemos de energía que el vehículo produce y en cambio otras reacciones químicas producen gases secundarios que contaminarían la combustión del motor, la principal ventaja de obtener el hidrógeno en el mismo vehículo es que se evita los riesgos que implica el almacenarlo y transportarlo a una alta presión, además que por el diseño y la cantidad que se producirá, este servirá como un optimizador del consumo de combustible del vehículo de prueba.

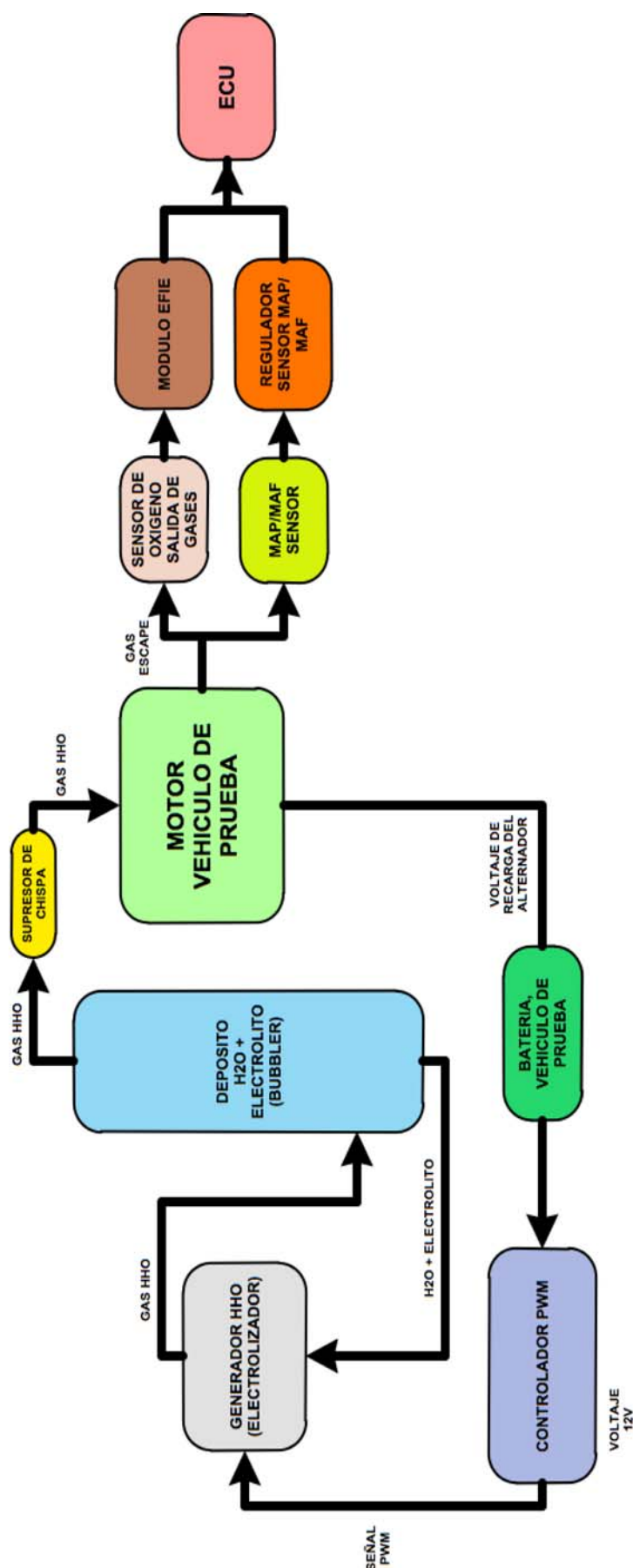
Para lo cual se necesitaría un deposito donde almacenaremos el electrolito que se usara como combustible para nuestro generador, además de tener en cuenta que este servirá también como un lavador de gas ya que este debe literalmente burbujear desde el fondo para luego acumularse en la parte superior del deposito con el fin de que por acción de presión este fluya hacia el motor del vehículo

Finalmente hay que tener en cuenta que el vehículo de prueba tiene un motor con inyección electrónica, lo cual implica que debemos nosotros sintonizar nuestro sistema de tal forma que debemos modificar la lectura de los sensores del vehículo para poder inyectar el hidrógeno de forma segura y evitar inconvenientes como el preencendido del hidrógeno, además que debemos analizar el gas que da como resultado de la combustión usando el sensor de oxígeno del vehículo o uno externo como referencia para sintonizar adecuadamente nuestro sistema

2. DIAGRAMA DE BLOQUES

Presentamos el diagrama de bloques del sistema, donde ubicamos los sensores del vehículo así como la computadora y el sistema de inyección completa de hidrógeno, este diagrama debe se puede usar para otros tipos de vehículos, tanto como para el uso en otros sistemas de combustión ya sea grupos electrógenos tantos como equipos de generación eléctrica que trabajan quemando combustible fósil, ya sea agregando o quitando elementos.



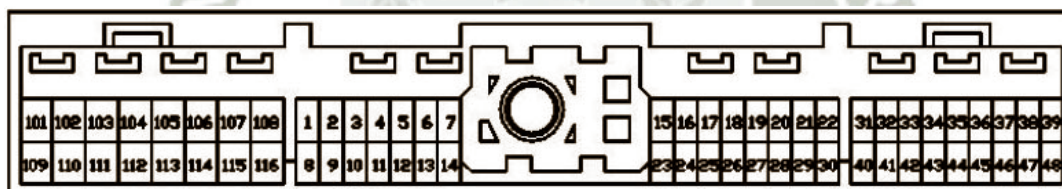


GRÁFICA 3.1. Diagrama de bloques

Fuente: Elaboración Propia

2.1. VEHÍCULO DE PRUEBA

El vehículo donde se implementara el sistema y se harán las pruebas de rendimiento tanto en ciudad como en carretera es un auto sedan marca Nissan, modelo Sentra B14 nacional, del año 96, este vehículo cuenta con un motor a gasolina de 1597cc modelo GA16DNE, las condiciones del vehículo son óptimas pues cuenta con sus mantenimientos preventivos realizados en la concesionaria garantizando que tanto la parte mecánica como eléctrica se encuentran en óptimas condiciones, este vehículo tiene un kilometraje de alrededor de 90000 km de recorrido y utiliza gasolina de 90 octanos, al momento de hacer la instalación del sistema de hidrógeno, más adelante se harán las comparaciones sobre el rendimiento en función a la distancia recorrida y los galones consumidos antes sin hidrógeno y después con el sistema operando.



Pin #	Name	Signal Type
2	Tachometer Signal	RPM
16	Mass Air Flow Sensor	Analog
17	Mass Air Flow Sensor Ground	Ground
18	Engine Coolant Temperature Sensor	Analog
19	O2 Sensor Signal	Analog
20	Throttle Position Sensor	Analog
21	Sensor Ground	Ground
26	Air Temperature Sensor	Analog
32	Vehicle Speed Sensor	Speed
48	Power Ground (Electronic Concentrated Control System)	Ground
101	Injector # 1	Speed
103	Injector # 3	Speed
110	Injector # 2	Speed
112	Injector # 4	Speed
116	Power Ground (Electronic Concentrated Control System)	Ground

GRÁFICA 3.2. Mapa de conexiones de la ECU, vehículo de prueba

Fuente: NISSAN MX

Este vehículo cuenta con un sensor MAF (Mass Air Flow) ubicado en la entrada de aire hacia los cilindros del motor, ubicado en el PIN 16 de la ECU, el cual es básicamente una termoresistencia, para lo cual este sensor debe mantener una temperatura estable de 75°C equilibrándose con el aire frío que ingresa, para que la computadora reciba el valor este sensor trabaja como un divisor de voltaje, según manual de servicio, con el contacto activado y el motor apagado debemos medir un voltaje menor a 1 voltio, y al encender el motor alcanzando su temperatura de trabajo a una marcha mínima debemos tener un valor entre 1.2 y 1.8 voltios, luego acelerando gradualmente debemos notar que el incremento del voltaje sea lineal y no de saltos, este sensor es importante pues ayuda a la computadora a calcular si la mezcla de combustión es la correcta.

Este vehículo en particular no cuenta con EGR (Exhaust Gas Recirculation) que es básicamente la recirculación de una parte de los gases que expulsa el motor que se reingresan con el fin de mantener la temperatura constante en la parte interna de los cilindros, este sistema es eficiente a la hora de querer ahorrar combustible, pero se pierde potencia del motor debido a que estos gases desplazan en parte al aire fresco que ingresa del exterior, junto con este sistema se encuentra un sensor de oxígeno (PIN 19 de la ECU) que sirve para medir cuando oxígeno no se mezcla con la gasolina y es expulsado junto con los gases de combustión, generalmente la computadora usa este dato para ajustar la mezcla para la combustión. El EGR no es útil a la hora de usar hidrógeno pues ocasiona el preencendido del gas debido a la alta temperatura que reingresa al motor, lo que es útil es el sensor de oxígeno que nos puede servir para poder sintonizar nuestro sistema, de lo contrario podemos tomar la muestra en el tubo de escape después del catalizador.



GRÁFICA 3.3. Motor Ga16DNE, vehículo de prueba

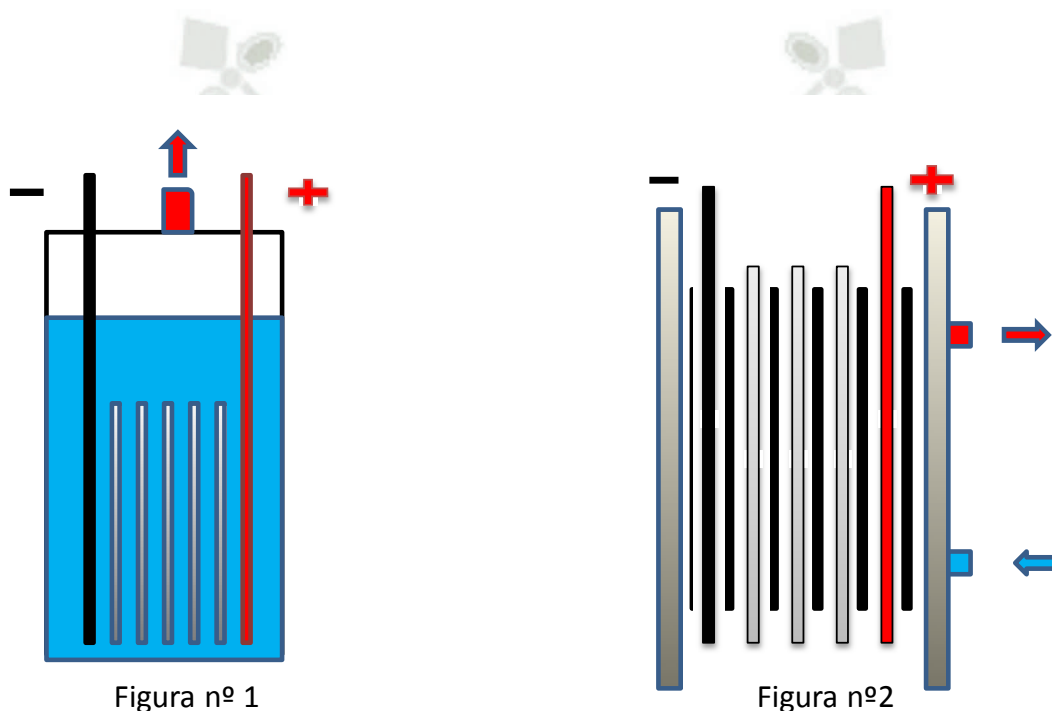
Fuente: Elaboración Propia

2.2. CELDA HUMEDA Y SECA DE HIDRÓGENO

Las celdas de hidrógeno usan el principio de la electrólisis y por lo tanto son un arreglo de placas metálicas dispuestas como electrodos positivos y negativos que dependiendo el montaje pueden ser húmedas o secas, hablamos de húmedas porque estas celdas se encuentran sumergidas dentro de un deposito junto con el electrolito, la desventaja de esta aplicación es que a medida que circula la corriente por las celdas parte se transforma en calor y escapa por los filos que también se encuentran sumergidos, lo cual por la configuración en la que se encuentra es difícil disipar este calor por lo que no es muy viable aplicarlo a un automóvil.

Por otro lado la celda seca se le llama así porque el electrolito fluye por la parte interna de las celdas permitiendo que la parte externa de las celdas disipen el calor generado con ayuda a la corriente de aire que fluye al interior por el motor del automóvil

Para ambos casos usan los electrodos y placas intermedias neutrales que cumplen la función de reducir la aceleración de electrones entre placas y la alta temperatura.



GRÁFICA 3.4. Celdas de hidrógeno, Húmeda (FIGURA 1) y Seca (FIGURA 2)

Fuente: Elaboración Propia

Para iniciar el diseño debemos determinar la densidad de amperaje en la celda definida como la cantidad de corriente que circula por unidad de superficie de un electrodo, para lo cual partimos de la siguiente ecuación.

$$d_c = \frac{I_E}{S_E} = \frac{I_E}{n \times S_E} \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

donde:

d_c : densidad de corriente

I_E : intensidad que circula a través del electrodo

n : número de agrupaciones de celdas

S_E : superficie del electrodo

Para el diseño se necesita tener en cuenta que debemos partir por tener un valor alto de densidad de corriente ya que si partimos por dimensionar primero tendremos problemas ya que si las celdas no son lo suficientemente grandes estas necesitarán de mayor voltaje a medida que aumente la corriente por lo que habrán pérdidas por la disipación por calor.

Como máximo necesitamos una densidad de 500 A/m², para lo cual calculamos.

$$\begin{aligned} 500 \frac{A}{m^2} &= \frac{30A}{S_E} \\ S_E &= \frac{30}{500} m^2 \\ S_E &= 0.06 m^2 = 0.24m \times 0.24m \end{aligned}$$

Esto nos da una celda de regular tamaño, por lo que para poder reducir su tamaño usaremos agrupaciones de celdas en paralelo, una celda normalmente usa 2 agrupaciones de electrodos, para nuestro caso hemos optado por usar 4 agrupaciones ya que ayudarán a disipar más fácilmente el calor que se genere y producir mayor cantidad de hidrógeno, entonces tenemos:

$$500 \frac{A}{m^2} = \frac{30A}{4 \times S_E}$$

$$S_E = \frac{30}{4 \times 500} m^2$$

$$S_E = 0.015 m^2 = 0.12 m \times 0.12 m$$

Vemos como el tamaño se redujo considerablemente de 24 a 12 centímetros por lado.

Ahora que tenemos claro las dimensiones de nuestra celda, hace falta determinar las placas neutrales para cada agrupación de electrodos, hay que recordar que por teoría de la electrólisis sabemos que necesitamos de 1.23V a 1.47V como mínimo pero en la practica este rango se encuentra más alto debido principalmente a las características del electrolito utilizado y su concentración que se encuentra entre 2V y 2.4V.

Para calcular el numero de placas partimos de la siguiente ecuación.

$$n = \frac{V_T}{V_C} + 1$$

donde:

n : número de placas por agrupación

V_T : voltaje total de la celda

V_C : voltaje calculado entre electrodos

Tenemos que la alimentación de la celda es la que recibe de la batería del vehículo que es de 12V, pero hay que tener en cuenta que al estar el vehículo encendido el voltaje sube por el alternador y es de 13V; a parte usamos el valor real alto que se da en la electrólisis de 2.4V, tenemos lo siguiente.

$$n = \frac{13V}{2.4V} + 1 = 5.42 + 1$$
$$n = 6 \text{ placas}$$

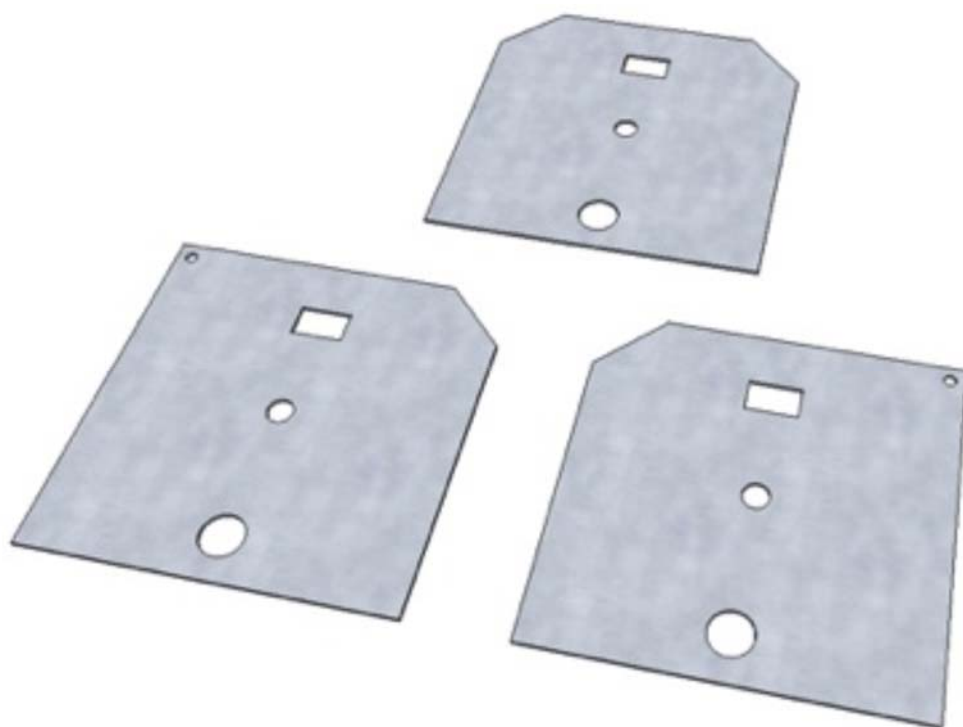
Ahora sabemos que cada agrupación debe estar formado por 6 placas donde 2 placas son los electrodos y 4 las placas neutrales.

El mejor material para la fabricación de los electrodos, por sus propiedades eléctricas, es el níquel. No obstante, éste presenta algunos problemas por la fragilización por hidrógeno, por lo que no se recomienda el uso aislado de este material, que además tiene un coste elevado. En su lugar se utiliza acero inoxidable. De esta manera obtenemos unos electrodos con buenas propiedades eléctricas, así como resistentes a la fragilización y a la corrosión. Para que sean todavía más resistentes, se recomienda el uso de acero del grado 316, más resistente a la corrosión.

Para ganar algo de superficie de reacción, los platos se suelen lijar con una lija muy fina en forma de cruz (primero en vertical y luego en horizontal), de manera que se crean pequeños espacios en la superficie del electrodo que, a pesar de ser apenas visibles a simple vista, aumentan la superficie reactiva del electrodo.

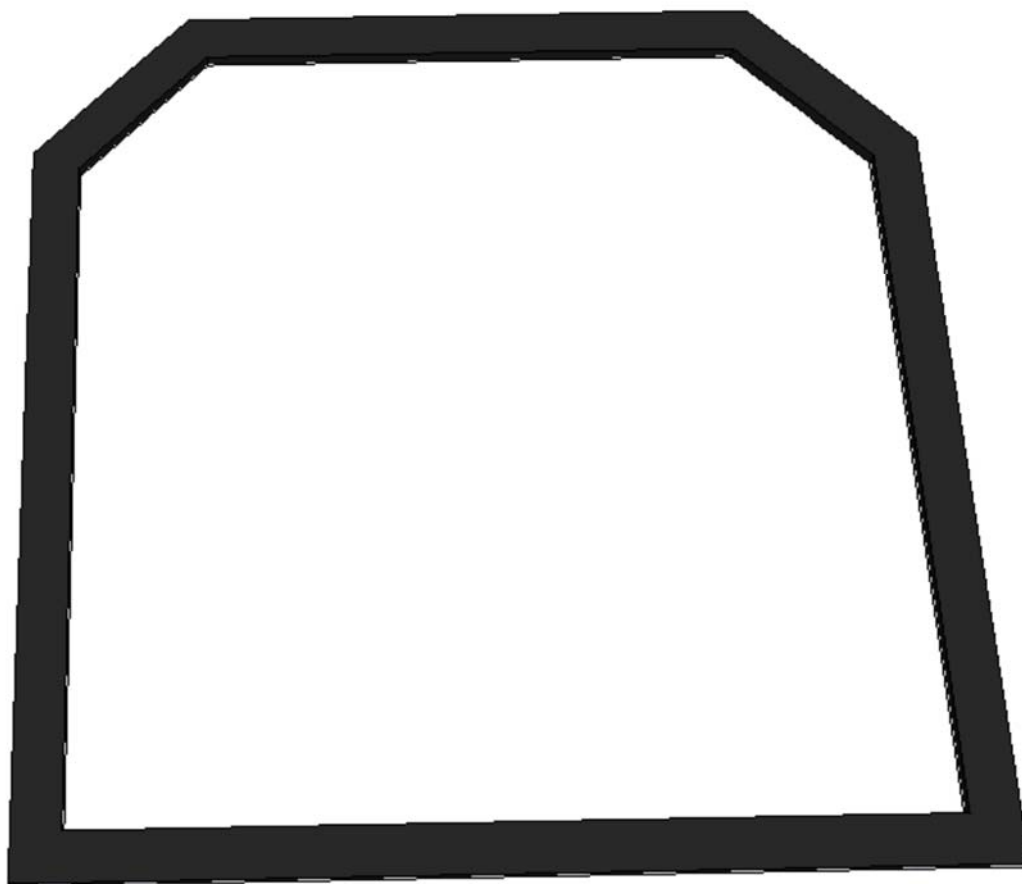
Para que el electrolito fluya por las placas estas deben tener agujeros, lo que implica una pérdida por lo que se está reduciendo el área de contacto, al final se optó por el tamaño de placas de 15cm x 15cm tomando en cuenta que se debe colocar juntas de 1cm de ancho en forma de marco y de 1.5mm de espesor.

Las placas que se usaran como electrodos tienen unas orejas por donde se colocaran el perno pasante para formar los terminales de la celda



GRÁFICA 3.5. Placas de acero inox 316L, Superior (neutra), inferiores (electrodos)

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.6. Goma separadora de alta resistencia

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente para concluir con el armado de las celdas usamos unas planchas de metacrilato o pvc para el prensado de todas las placas usando pernos pasantes de 4 pulgadas con volandas y tuercas, usando la siguiente configuración:

+nnnn-nnnn+nnnn-nnnn+



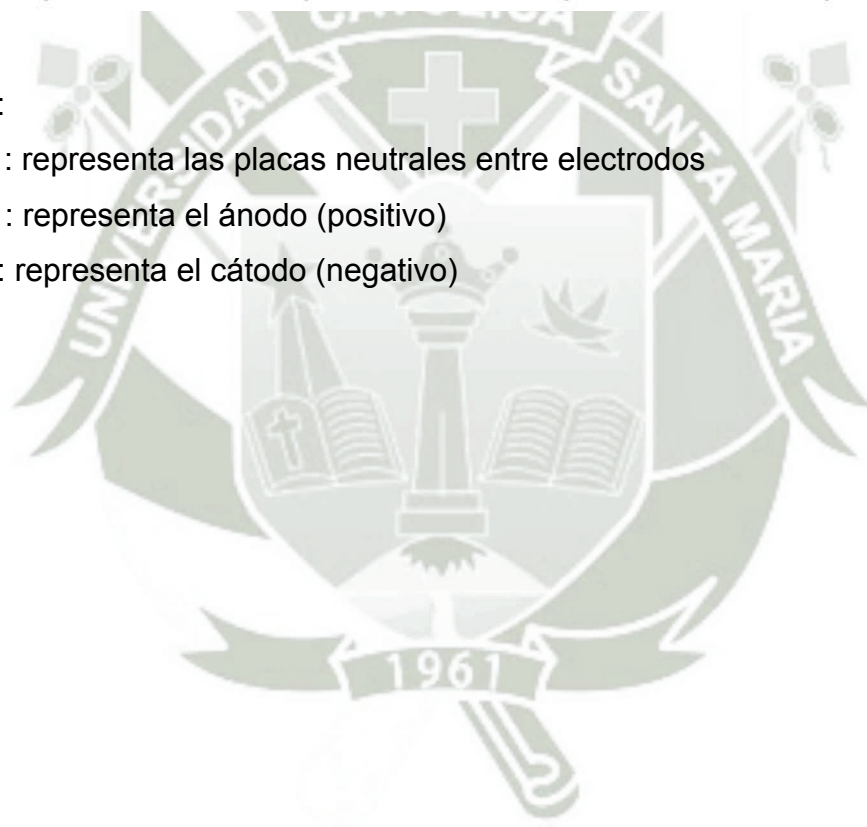
grupo 1 grupo 2 grupo 3 grupo 4

Donde:

n : representa las placas neutrales entre electrodos

+ : representa el ánodo (positivo)

- : representa el cátodo (negativo)





GRÁFICA 3.7. Generador de Hidrógeno Final de 21 placas

Fuente: Elaboración Propia



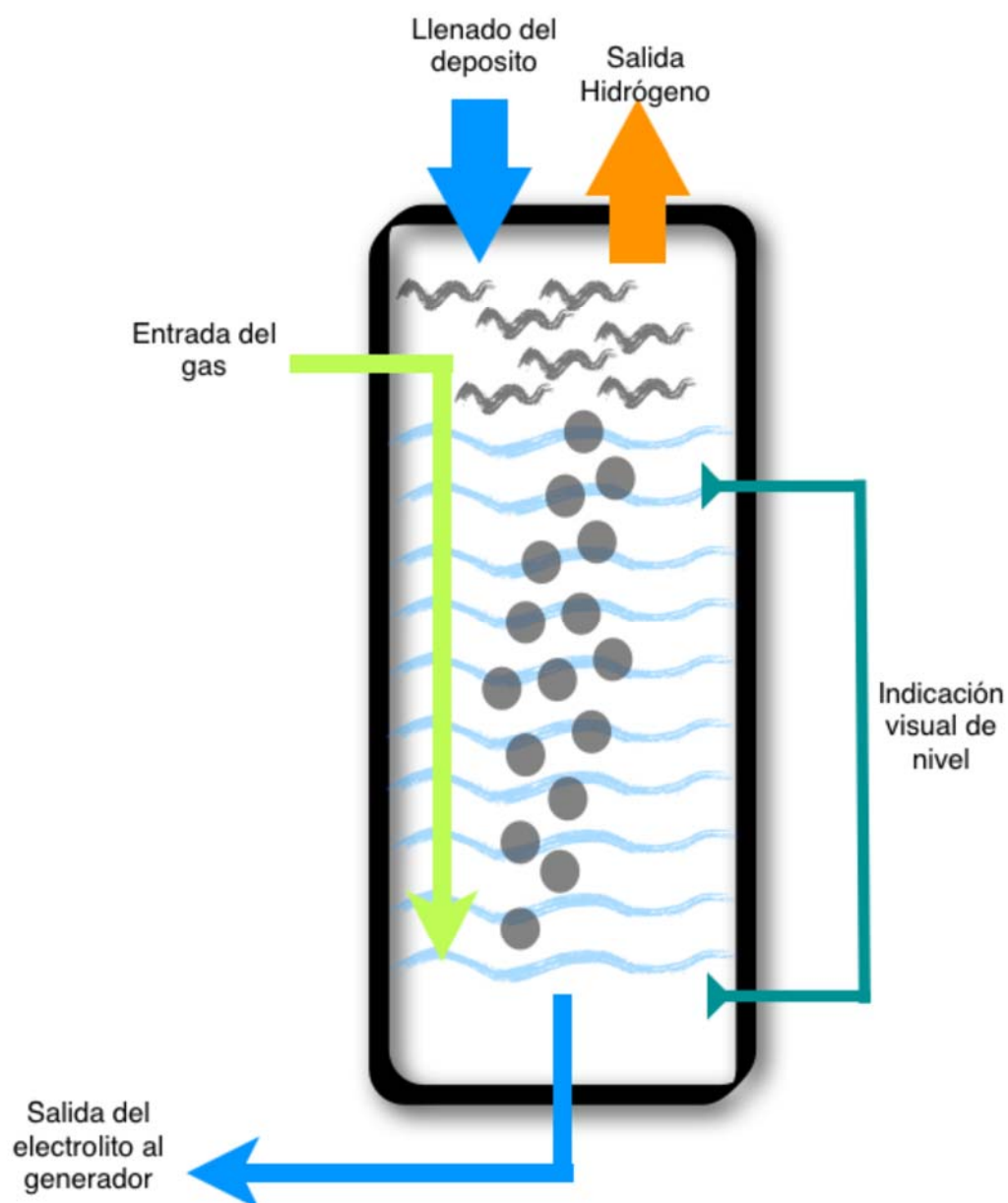
GRÁFICA 3.8. Prototipo 2 Generador de hidrógeno de 11 placas

Fuente: Elaboración Propia

2.3. DEPÓSITO DEL ELECTROLITO

Otra etapa importante es la del depósito porque ahí será donde se almacene el agua junto con el electrolito que alimentará a nuestro generador y a medida que el sistema entre en funcionamiento este debe ser capaz de soportar temperatura elevada y además de lavar el gas para que luego pueda ser inyectado al motor del vehículo de prueba por acción de presión, este depósito debe ser fabricado con materiales que resistan a la corrosión, debido que el electrolito utilizado es altamente corrosivo y por lo tanto dañaría las paredes del depósito entrando material que contaminaría el proceso

A este depósito también se le conoce como burbujeador, debido a que el generador se llena con el electrolito del depósito y a su vez el gas resultante del generador retorna al fondo del depósito donde se formarán burbujas que ascenderán y se acumularán en la parte superior del depósito formándose un pulmón, se le hace burbujear para que el gas se lave literalmente de cualquier partícula ajena al gas como el mismo electrolito.

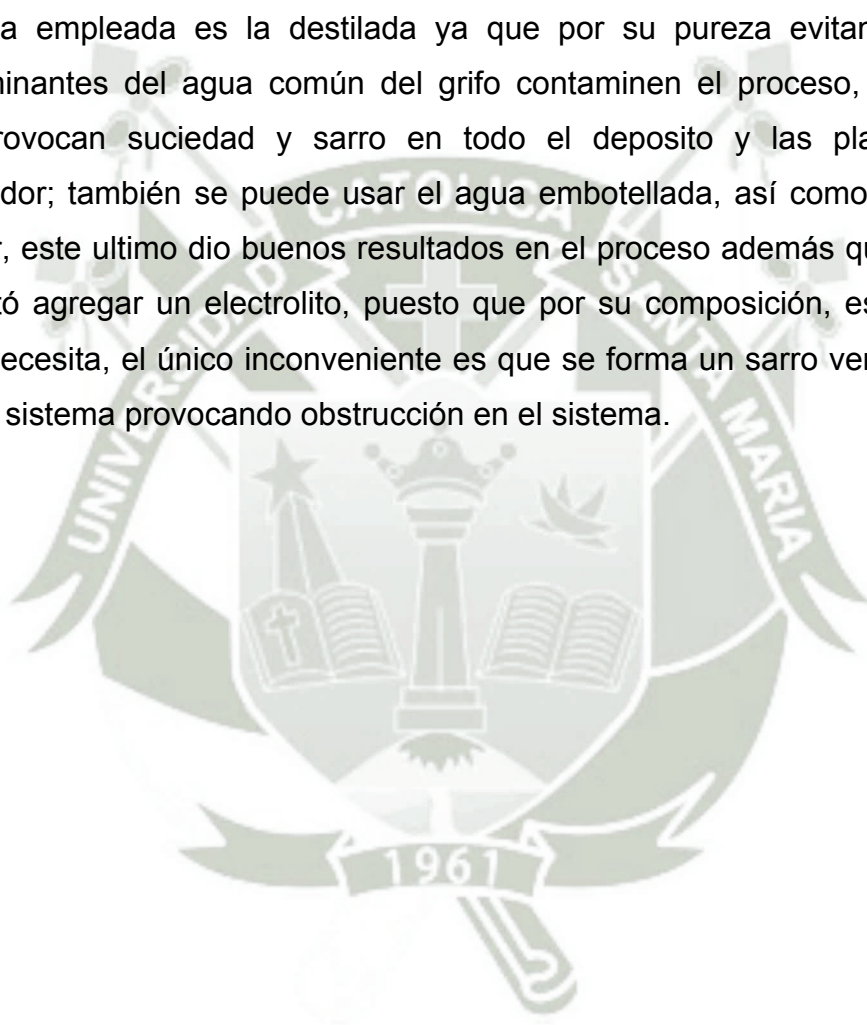


GRÁFICA 3.9. Esquema del deposito

Fuente: Elaboración Propia

El electrolito que se ha decidido usar es el KOH (hidróxido de potasio, potasa), esta selección es como resultado a las pruebas realizadas por los fabricantes y plantas de desarrollo que concluyen que el KOH es la base más óptima para ser usada en la electrólisis, descartando otras bases como el NaOH, la vinagre y ácidos fuertes como el sulfúrico, que generan contaminantes y demandan mayor mantenimiento del sistema además de dañan tuberías y a las placas del generador.

El agua empleada es la destilada ya que por su pureza evitamos que contaminantes del agua común del grifo contaminen el proceso, además que provocan suciedad y sarro en todo el depósito y las placas del generador; también se puede usar el agua embotellada, así como el agua de mar, este último dio buenos resultados en el proceso además que no se necesitó agregar un electrolito, puesto que por su composición, esta agua no lo necesita, el único inconveniente es que se forma un sarro verdoso en todo el sistema provocando obstrucción en el sistema.





GRÁFICA 3.10. Hidróxido de potasio

Fuente: Elaboración Propia

La mezcla usada es de 5 gramos por cada litro de agua destilada, al llenar el deposito hay que esperar que el agua llene también el generador para luego completar el llenado del deposito, El volumen aproximado del deposito diseñado es aproximadamente 3.2 litros y el volumen de la celda es de 0.5 litros aproximados

2.4. CONTROLADOR PWM

La modulación de ancho de pulso, es un método de transmitir información sobre una serie de impulsos. El PWM, tal como se aplica al control del generador, es una manera de suministrar energía a través de una sucesión de impulsos, cambiando la frecuencia, en lugar de una variación continua (analógica) de la señal.

La finalidad es poder mantener las celdas trabajando a una temperatura óptima, además de poder tener control sobre la cantidad necesaria generada para inyectar al motor, ya que producir demasiado gas tendríamos problemas con el preencendido del mismo.

Para nuestro caso hemos tomado un controlador PWM donde el control está implementado con amplificadores operacionales y la etapa de potencia por un Mosfet con su Driver y la alimentación la regulamos con un regulador de voltaje con la finalidad de proteger el circuito de las variaciones de tensión causadas en el vehículo.

A continuación se muestra el circuito completo del controlador, el cual lo revisaremos por etapas de tal manera que entendamos en que consiste su funcionamiento.

Este circuito es popular para el control de velocidad de motores DC, el cual nos es útil ya que este está diseñado para resistir hasta corrientes de 30A, y es relativamente fácil de conseguir, generalmente lo encontramos como kit electrónico y al importarlo en grandes cantidades su precio unitario es mucho menor lo cual justifica su compra.

Podemos usar cualquier otra alternativa ya sea con el integrado 555, microcontroladores, etc. Lo fundamental es tener la señal de control a un bajo costo.

Este circuito debe se capaz de variar el ciclo de trabajo de 0% a 100% ajustando el potenciómetro RV1 de 47k, y partiendo de la ecuación para calcular la frecuencia de trabajo

$$F = \frac{R6}{4 \times R7 \times R1 \times C1}$$

Despejando:

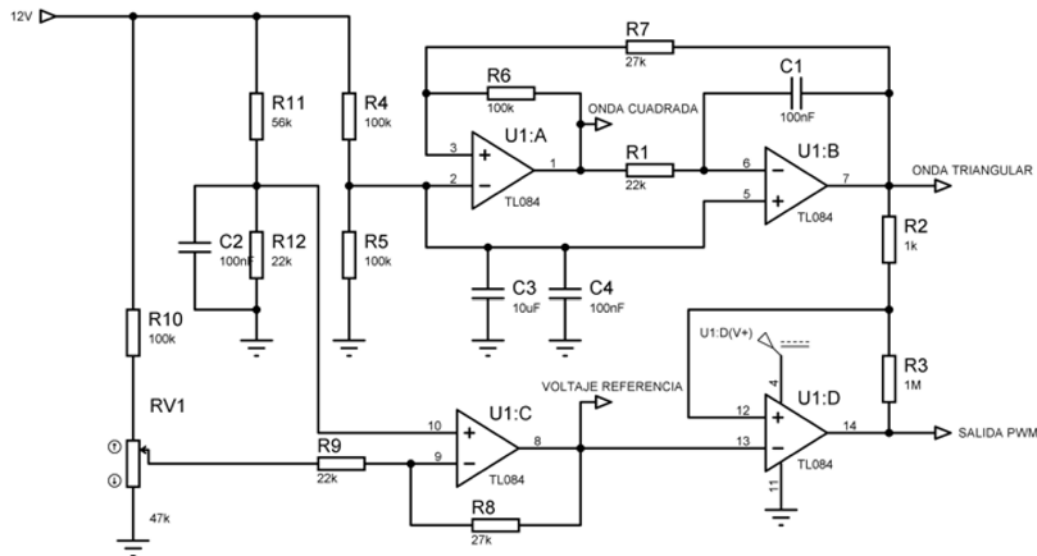
$$F = \frac{100K\Omega}{4 \times 27K\Omega \times 22K\Omega \times 100nF}$$

$$F = 0.43KHz$$



Inicialmente partimos del Opamp U1:A el cual es conocido como el disparador de Shmitt el cual trabaja como un comparador donde un voltaje de referencia ingresa por la entrada inversora (PIN 2) cargando el condensador C3 el de tal forma que se va comparar con el voltaje que se realimenta e ingresa por la entrada no inversora (PIN 3) en un primer momento con el condensador C3 completamente cargado va ser mayor que el voltaje del PIN 3 obteniendo en la salida el voltaje mínimo de la alimentación (0v, Gnd), hasta llegar un momento que el condensador se descargue y pase a tener un voltaje menor que el PIN 3 obteniendo en la salida el valor máximo de la alimentación (12v, Vcc), y así el ciclo se repite y obtenemos nuestra señal de onda cuadrada. Para luego pasar al Opamp U1:B conocido como el integrador de Miller, con el cual vamos a integrar la onda cuadrada que obtuvimos previamente, donde para tendremos una rampa ascendente al tener un valor alto y una rampa descendente cuando tengamos un valor bajo en nuestra onda cuadrada, la frecuencia de trabajo depende del valor de R1 y C1 que calculamos previamente.

Finalmente el Opamp U1:D es el comparador el cual por la entrada no inversora ingresa la onda triangular y por la entrada inversora ingresa el voltaje de referencia que es un valor constante y variable con el potenciómetro RV1 de 47K y que es obtenido del Opamp U1:C el cual trabaja como un amplificador inversor, como resultado tendremos en los puntos donde el voltaje de referencia intercepte a la onda triangular, los valores por debajo serán tomados como 0v y los valores por encima como 12v, dependiendo del punto donde ambas señales chocan es lo que va determinar el ancho de pulso.



GRÁFICA 3.12. Etapa de control PWM

Fuente: Elaboración Propia

Hacemos el cálculo de los voltajes máximo y mínimo de la onda triangular, para lo cual tenemos:

$$V_H = \left[\frac{1}{2} \times (V_{CC} - V_{EE}) \times \left(1 + \frac{R1}{R6} \right) \right] + V_{EE}$$

$$V_L = \left[\frac{1}{2} \times (V_{CC} - V_{EE}) \times \left(1 - \frac{R1}{R6} \right) \right] + V_{EE}$$

En ambos casos reemplazamos valores y tenemos:

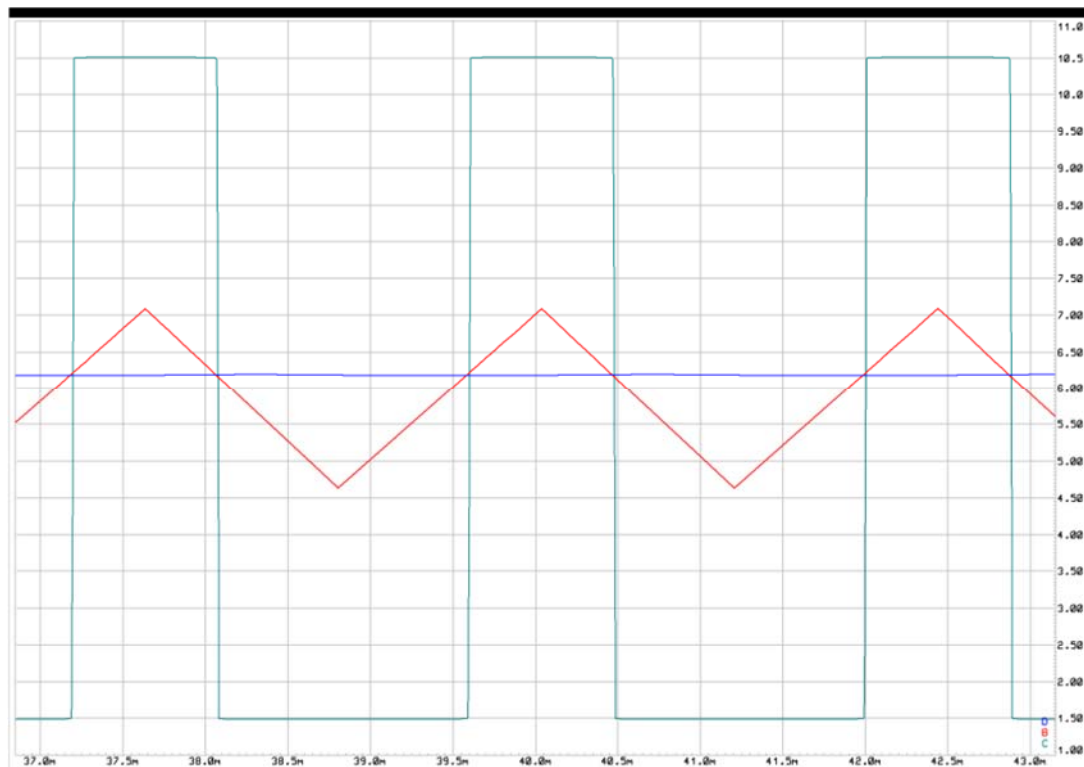
$$V_H = \left[\frac{1}{2} \times (12v - 0v) \times \left(1 + \frac{22K\Omega}{100K\Omega} \right) \right] + 0v$$

$$V_H = 7.32v$$

$$V_L = \left[\frac{1}{2} \times (12v - 0v) \times \left(1 - \frac{22K\Omega}{100K\Omega} \right) \right] + 0v$$

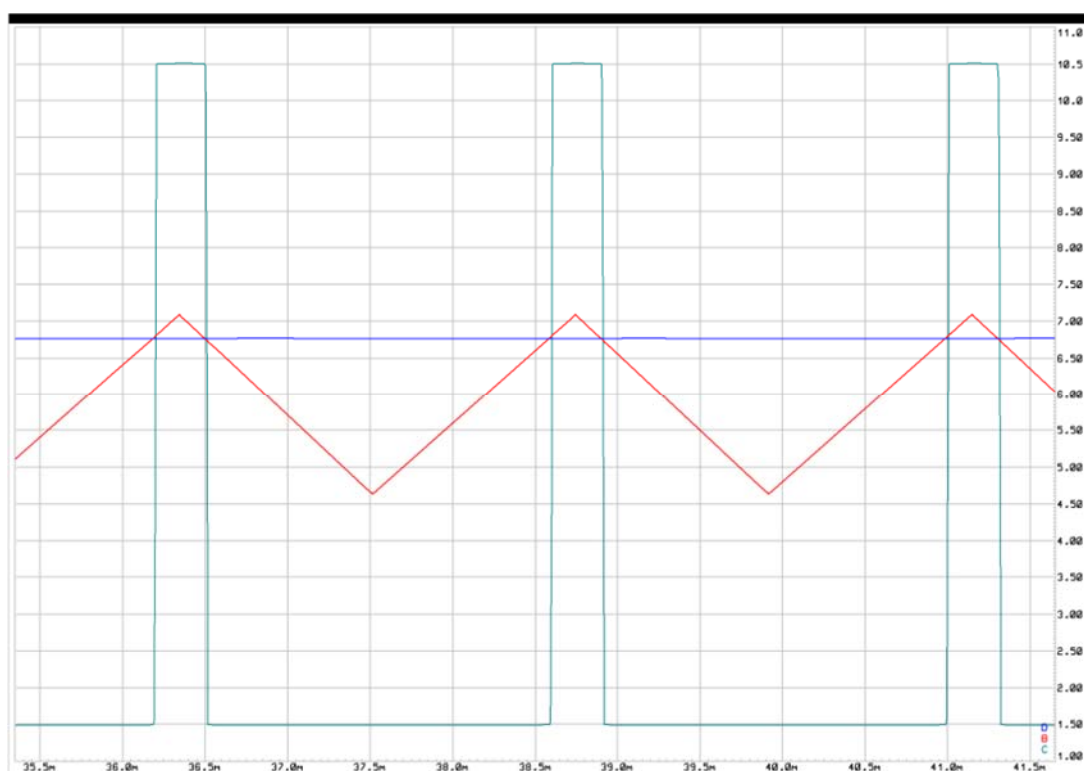
$$V_L = 4.68v$$

Estos valores podemos verificarlos en las gráficas, resultado de la simulación.



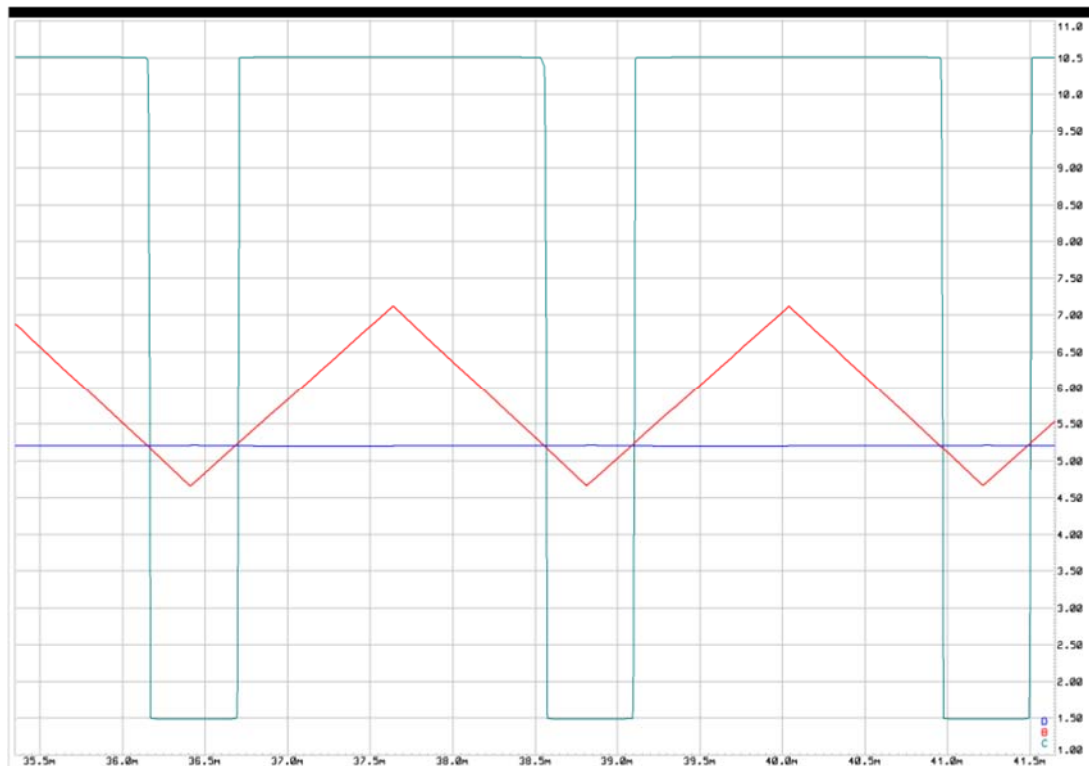
GRÁFICA 3.13. Señales de Osciloscopio, La onda triangular (rojo) se intercepta con el voltaje de referencia (azul) dando como resultado a la señal PWM (verde) de 47% de ciclo de trabajo

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.14. Señales de Osciloscopio, señal PWM de 10% de ciclo de trabajo

Fuente: Elaboración Propia



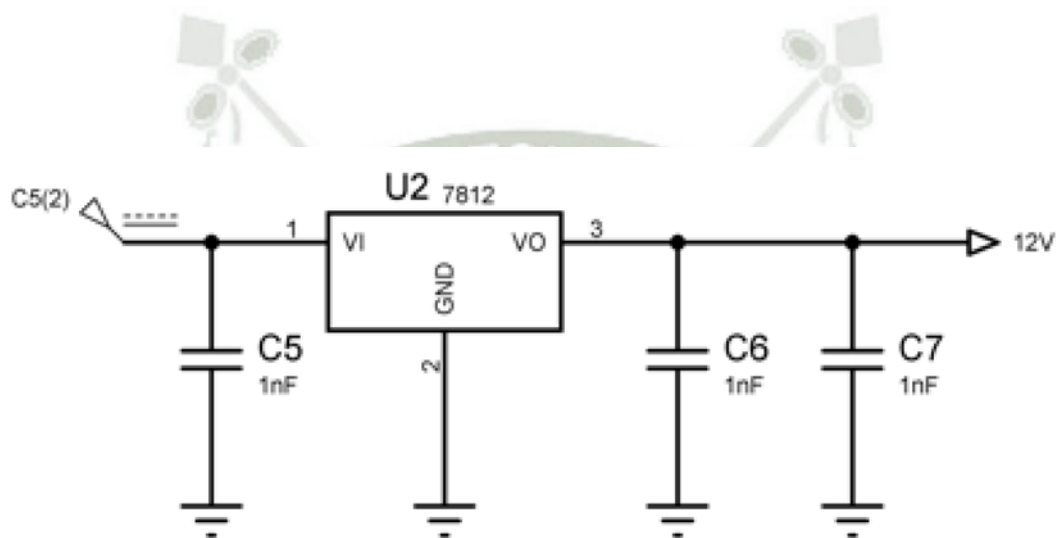
GRÁFICA 3.15. Señales de Osciloscopio, señal PWM de 82% de ciclo de trabajo

Fuente: Elaboración Propia

Para ambos todos los casos podemos calcular el ciclo de trabajo usando la siguiente fórmula:

$$\text{Ciclo de Trabajo} = \frac{V_{\text{ref}} - V_L}{V_H - V_L}$$

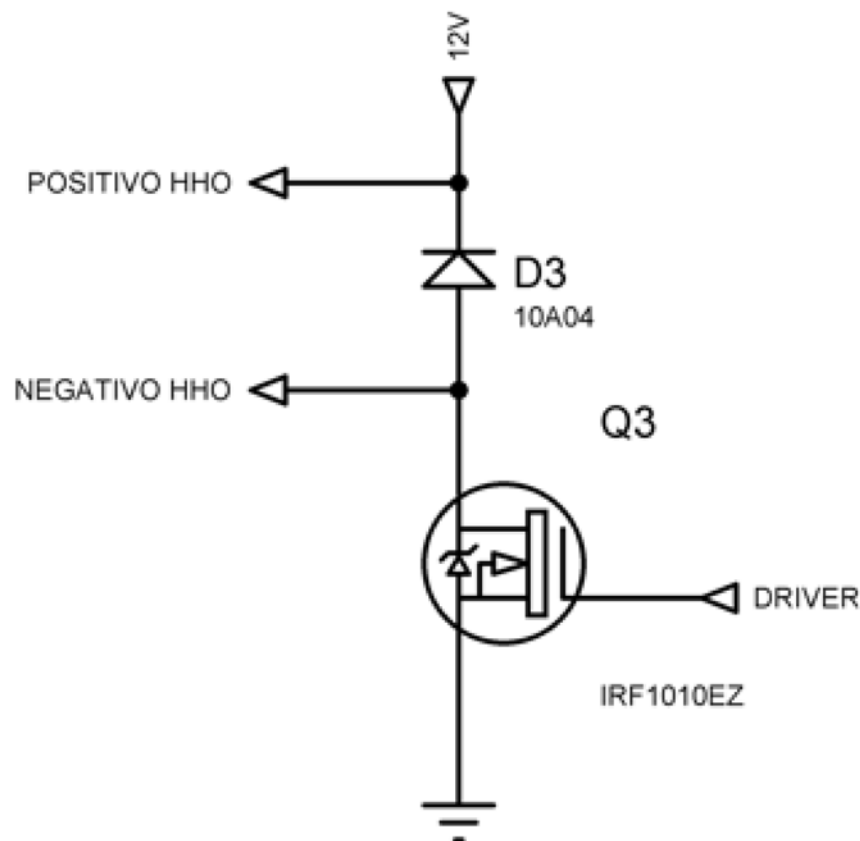
Continuando con el análisis vemos la etapa de alimentación del circuito ya que es importante debido a que se debe tener en cuenta que la electrónica que trabaja en los automóviles debe ser robusta debido a que deben de ser capaces de resistir picos altos de voltaje causados por la ignición y por el ruido introducido por el alternador además que en un vehículo en marcha el voltaje de sube de 12v a 13.4v, para lo cual usamos un regulador de voltaje para evitar estos problemas



GRÁFICA 3.16. Regulador de Voltaje de 12V

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenida la señal del PWM debemos tener en cuenta que nuestro generador va consumir bastante corriente ya que con los cálculos de diseño de la celda tenemos que consume alrededor de 30A y parte de la cual se disipa en forma de temperatura dependiendo de cuanto lo regulamos, por lo tanto debemos emplear una etapa de potencia, en este caso se esta empleando un Mosfet



GRÁFICA 3.17. Power Mosfet HHO Driver

Fuente: Elaboración Propia

Sabemos que esta configuración, el mosfet debe trabajar como un interruptor, para lo cual debemos tener en cuenta lo siguiente:

$$V_{DRIVER(H)} \Rightarrow V_{HHO} = Gnd \text{ (corte)}$$

$$V_{DRIVER(L)} \Rightarrow V_{HHO} = 12V \text{ (saturación)}$$

Vemos que el mosfet va invertir la señal debido a sus características de conmutación, pasando de la región de corte a la de saturación.

Calculamos para una frecuencia de 0.5Khz, y dado el tiempo mínimo del IRF1010

$$t_r = 54ns$$

$$t_f = 90ns$$

$$t_r + t_f = 144ns$$

Esto quiere decir que el mínimo valor que puede tener el Ciclo de Trabajo es de (0.5Khz = 2ms).

$$\text{Ciclo de Trabajo} > \frac{144ns}{2ms} \times 100\%$$

$$\text{Ciclo de Trabajo} > 0.007\%$$

Para tener esas velocidades de conmutación debemos suministrar la corriente necesaria:

$$I_{ON} = \frac{Q}{t_{ON}} = \frac{58nC}{19ns} = 3.05A$$

$$I_{OFF} = \frac{Q}{t_{OFF}} = \frac{58nC}{38ns} = 1.53A$$

Nosotros estamos limitando la corriente máxima como fuente a 2A, entonces si podría absorber la corriente que devuelve el Gate mosfet en el tiempo de apagado (loff), sin embargo no puede suministrar la corriente necesaria para encenderla en el tiempo requerido(lon).

Para lo cual agregamos una resistencia (R17=R18=Rgate) entre la salida del driver y el gate para limitar la corriente.

Y la calculamos con la siguiente formula:

$$R_{gate} = \frac{V_{ON}}{I_{MAX}} - R_{OUT_DRIVER}$$

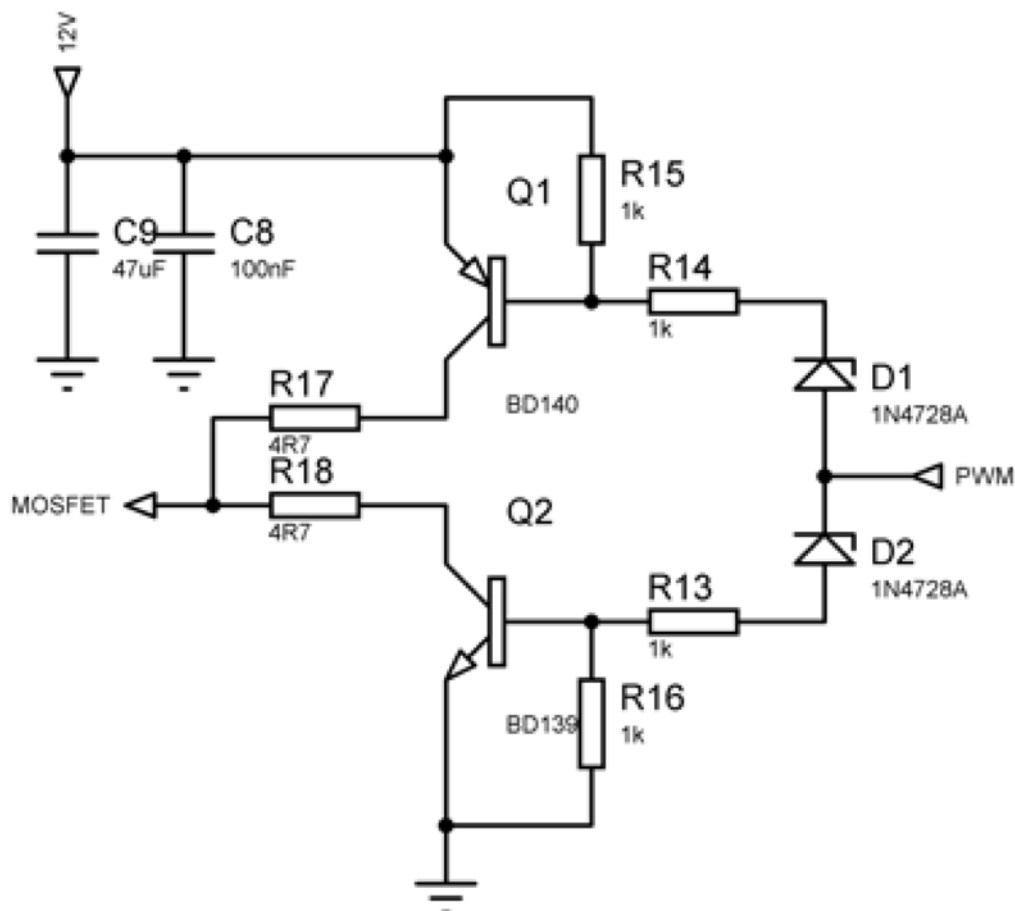
Donde Rgate es la resistencia que debemos colocar entre el driver y el gate mosfet, Von es el voltaje que proporcionara el driver en el encendido, Imax es el valor al que limitamos la corriente en este caso 2A, Rout_driver la estimamos del datasheet del driver como sigue:

La corriente de cortocircuito cuando Vo=12V y Io=6.7A, por lo que:

$$R_{OUT_DRIVER} = \frac{12V}{6.7A} = 1.79\Omega$$

Entonces resolvemos:

$$R_{gate} = \frac{12V}{2A} - 1.79\Omega = 4.21\Omega \Rightarrow 4.7\Omega \text{ valor comercial}$$



GRÁFICA 3.18. Mosfet Driver

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente tenemos el driver para el Mosfet es cual consta de una configuración Push Pull, hay que tener en cuenta que los Mosfet se activan por tensión y no por corriente, es por eso que debe evitarse cualquier tipo de inductancia o capacitancia, es por esto que esta configuración de transistores es la óptima ya que al llegar un pulso alto el transistor npn se satura y el pnp entra en cortocircuito pasando toda la tensión directa al gate del Mosfet y al pasar un pulso bajo el transistor npn entra en cortocircuito y el pnp se satura haciendo que rápidamente todo se descargue a tierra, es importante tener en cuenta los valores de resistencia R17 y R18, ya que en otro tipos de driver esta resistencia debe ser elevada con la finalidad de absorber cualquier tipo de retardo que ocurra, para esta aplicación se ha

optado con una resistencia de 47ohms, lo cual en la practica se ve que no recalienta mucho el mosfet en trabajo



GRÁFICA 3.19. Placa del controlador
Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.20. Módulo PWM

Fuente: Elaboración Propia

2.5. REGULADOR DEL SENSOR MAF

Nuestro vehículo de prueba cuenta un sensor MAF (Mass Air Flow, Masificador de Flujo de Aire), que consta básicamente de una termoresistencia que al encender el vehículo comienza a calentar y según el flujo de aire que esta ingresando al motor este debe mantenerse a una temperatura constante, según el manual de servicio de nuestro vehículo, debe mantenerse a una temperatura de 75°C.



GRÁFICA 3.21. Sensor MAF

Fuente: Nissan Spare Parts



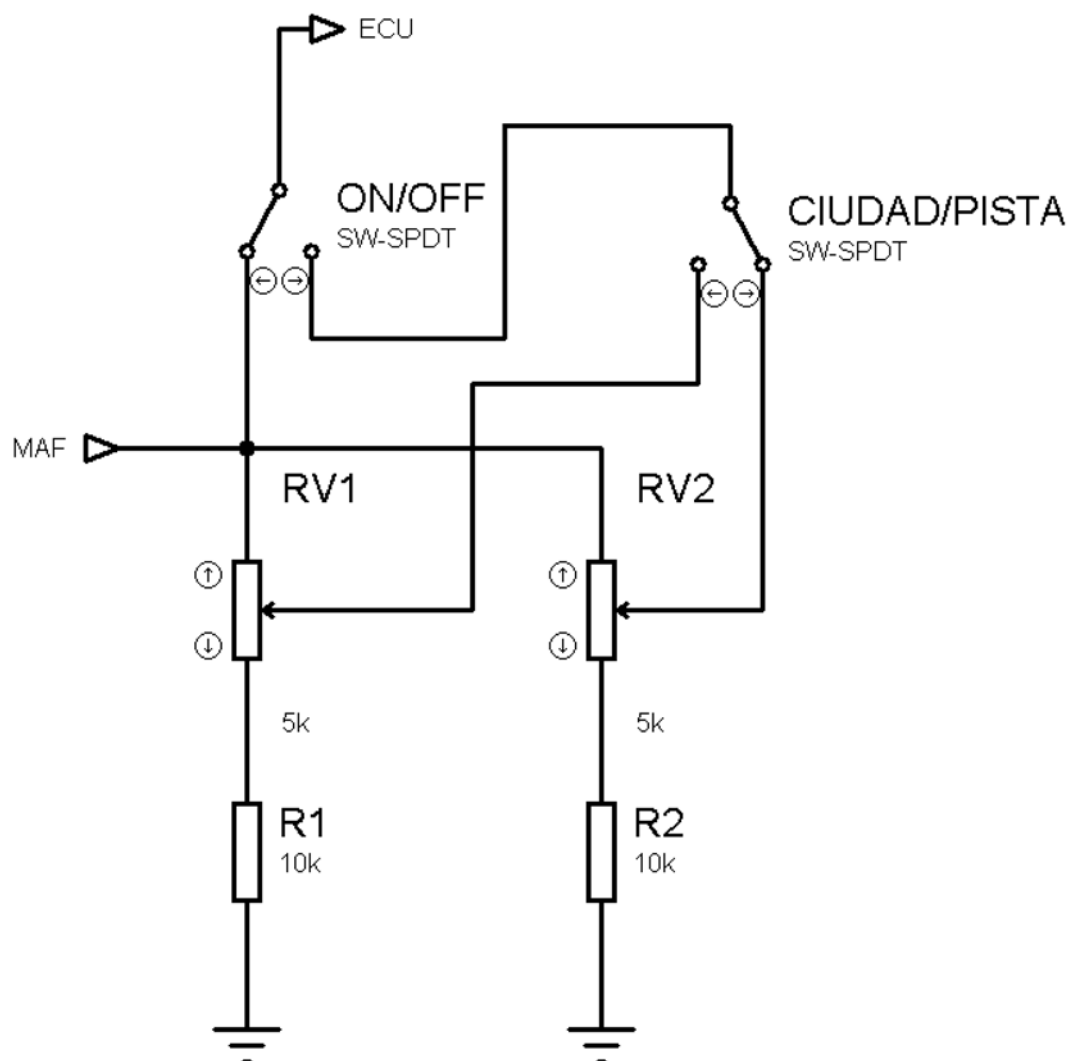
GRÁFICA 3.22. Ubicación del sensor MAF en la toma de aire

Fuente: Elaboración Propia

Al ser una resistencia que varía con la temperatura, debemos modificar su lectura debido que ya no solo va ingresar aire, sino también hidrógeno a una temperatura de trabajo, por lo que su lectura será errada además que la mezcla será más rica y por lo tanto debemos indicarle a la computadora del vehículo que inyecte menos gasolina para compensar la presencia del hidrógeno.

Anteriormente mencionamos que el sensor MAF, ubicado en el PIN 16 de la ECU, trabaja como un divisor de voltaje, al encender el motor alcanzando su temperatura de trabajo a una marcha mínima debemos tener un valor

entre 1.2 y 1.8 voltios, luego acelerando gradualmente debemos notar que el incremento del voltaje sea lineal y no de saltos, para poder modificar la lectura de este sensor debemos variar el valor de resistencia que de tal forma que podamos desplazar del voltaje estándar a un valor superior con la finalidad de indicar a la computadora que la mezcla es rica y que no necesita inyectar más combustible



GRÁFICA 3.23. Circuito para modificar la medición del MAF

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.24. Presentación del modificador de lectura del MAF

Fuente: OGO

Básicamente debemos poder tener 2 tipos de ajuste, con un potencionmetro ajustamos un valor para ciudad y con el otro para carretera pues, nos es conveniente sacrificar un poco de potencia para la ciudad ya que no se va a manejar a velocidades constantes, de tal forma que podemos dejarlo en un valor establecido para ambos casos y con el selector escogemos la opción que más nos convenga, y finalmente con el otro selector podemos escoger si deseamos activar la lectura modificada o dejar la lectura de fábrica, esta también es una opción siempre y cuando nosotros necesitemos al máximo la capacidad del vehículo, hay que tener en cuenta que lo notaremos mas potente y se vera en las revoluciones del motor.

El procedimiento para sintonizarlo consta en que debemos ajustar el potenciómetro que deseamos inicialmente con el vehículo detenido y el motor en marcha, debemos notar en que punto el motor se apaga, y si es muy pronto debemos aumentar el ciclo de trabajo del generador PWM.

Una vez más encendemos el motor y regulamos hasta un punto donde notemos que el motor comience a ahogarse por falta de combustible evitando que se apague, gradualmente vamos acelerando y vamos reajustando el potenciómetro para que el motor no le cueste trabajo subir sus revoluciones, lo probamos en la ciudad y quedará listo, para sintonizar el de pista, podemos tomar un valor intermedio comparado al ajuste para ciudad.

2.6. MÓDULO EFIE

El modulo EFIE (Electronic Fuel Injection Enhancer, o Mejorador de la Inyección Electrónica de Combustible), trabaja dependiendo si el vehículo de prueba cuenta con sensores de oxígeno, puesto que el funcionamiento de los sensores de oxígeno es medir la cantidad de oxígeno que es expulsado junto con los gases producto de la combustión, esta lectura la recibe la computadora del vehículo y determina si la mezcla de aire - combustible es rica o pobre.

Para nuestro caso no es algo necesario ya que el vehículo no cuenta con sensores de oxígeno, pero podemos colocarle de tal forma que nos indique como se esta comportando el hidrógeno en nuestro motor.

Al inyectar hidrógeno vamos a tener una mayor cantidad de oxígeno liberado en el escape lo cual un vehículo con sensor de oxígeno interpretaría que la mezcla es pobre y como resultado inyectaría más combustible, por lo tanto nosotros pretendemos es engañar la lectura del

sensor de oxígeno con la finalidad de que el vehículo interprete que la combustión es rica y no inyecte más combustible.

Generalmente los sensores transmiten la lectura de oxígeno en relación a milivoltios, para lo cual se consiguió un modificador digital de esta lectura usado en otros sistemas como el GLP, el cual usando divisores de voltaje y un potenciómetro podemos variar la lectura del sensor recibida por la computadora del vehículo

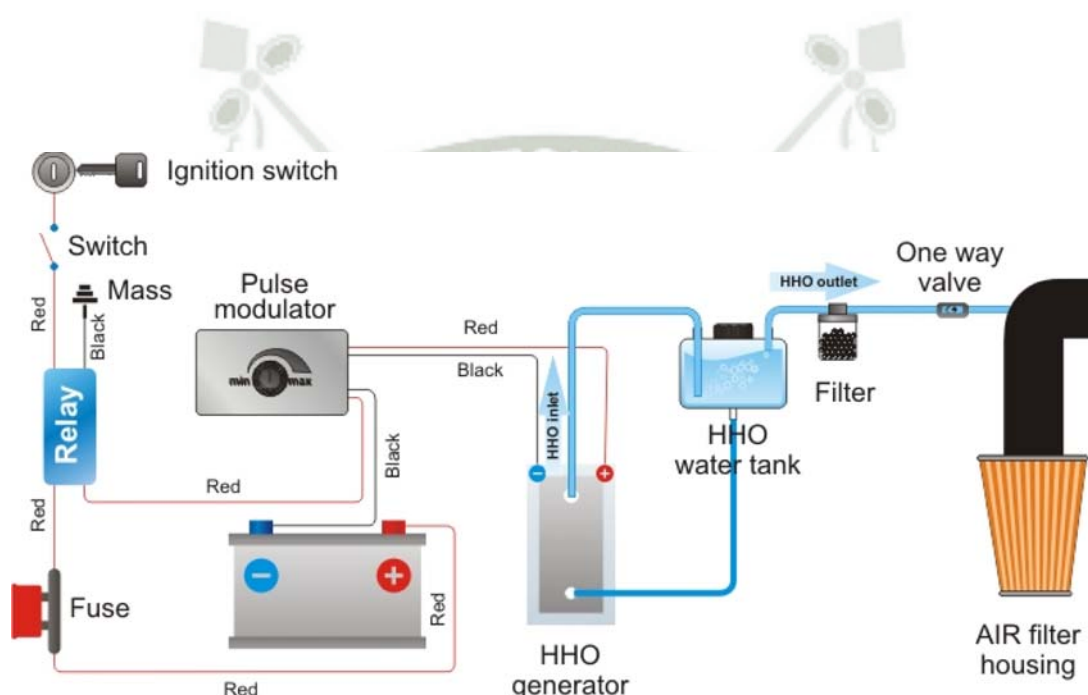


GRÁFICA 3.25. Módulo EFIE

Fuente: OGO

3. INSTALACIÓN DEL SISTEMA HHO

Finalmente teniendo claro y dependiendo del vehículo donde vamos a instalar el sistema hacemos la instalación, empezando con ubicar el generador y el deposito en un lugar alejado del calor donde el aire que fluye pueda llegar al sistema, el maletero es una opción pero hay que tener en cuenta la distancia de las mangueras además del cuidado que hay que tener al ubicarlas al interior del vehículo.



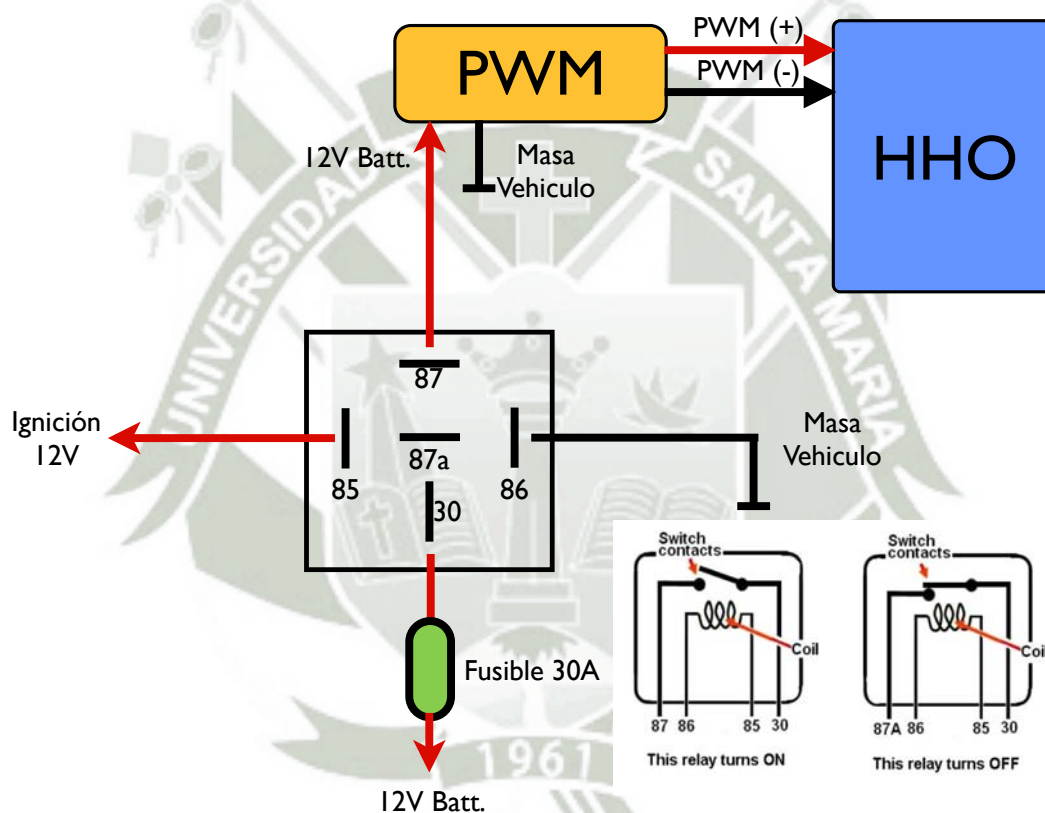
GRÁFICA 3.26. Esquema de Instalación

Fuente: HHO POWER

Se ha optado por hacer la instalación en el motor del vehículo para lo cual ubicamos el deposito de tal forma que sea fácil visualizarlo y accesible para poder llenarlo cuando sea necesario.

Una ultima parte importante a tener en cuenta es que el sistema debe trabajar únicamente cuando el motor se encienda ya que si dejamos que siempre opere o que solo girando la llave para accesorios encienda es muy

peligroso, ya que con el vehículo y el motor detenido vamos a producir hidrogeno que se ira almacenando en la parte interna del motor habiendo fugas y posibles daños materiales tanto como personales, para esto debemos hacer que el sistema funcione solo cuando entre el contacto de encendido del motor, para conseguir esto usamos los relays comunes en la electrónica automotriz



GRÁFICA 3.27. Esquema Eléctrico Automotriz

Fuente: Elaboración Propia

Recordemos que en la electrónica automotriz todo lo relacionado a accesorios trabajan con Relays de 12v generalmente todos usan la misma codificación donde el pin 85 y 86 son la bobina y el 30 con 87 el contacto, hay que tener cuidado al manipular los cables bajo el tablero ya que podemos provocar un corto y causar daños al sistema eléctrico, para identificar el cable que proviene de la ignición debemos ubicar el arnés de cables que proviene del timón y hacer pruebas girando la llave, podemos usar un multímetro o un probador que es simplemente un foco de 12v, donde un extremo lo colocamos a tierra del vehículo y con la pinza vamos probando cada cable hasta que encienda el foco del probador.



GRÁFICA 3.28. Relay Automotriz

Fuente: Elaboración Propia

También hay que tomar en cuenta el tipo de cables que vamos a usar, para lo cual se usó el mismo cable usado en los sistemas de audio que soportan altas corrientes y elevadas temperaturas además que tienen protección contra fuego y resisten los químicos corrosivos, generalmente de calibre 12AWG, y para mejorar la calidad de la instalación debemos colocarle un forro plástico corrugado, colocando el cable siguiendo una ruta donde no se dañe evitando las zonas de alto calor y lugares donde pueda ensuciarse o rozar con partes mecánicas todo debidamente sujetado con sujetadores de cables.



GRÁFICA 3.29. Sistema instalado

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.30. Adecuada instalación del cableado bajo el capó

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.31. Sistema HHO

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.32. Generador en funcionamiento

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.33. Ubicación Controlador PWM

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.34. Ubicación del Modificador MAF

Fuente: Elaboración Propia



GRÁFICA 3.35. Relay automotriz instalado

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

1. PRUEBAS

Inicialmente las pruebas que se realizaron fueron las de fugas y control de temperatura, una vez resuelto estos detalles, se prosiguió con la sintonización del sistema para lo cual debemos regular la lectura del sensor MAF, y para esto debemos probar el vehículo en marcha de tal forma que al regular notaremos que el vehículo se sacude por falta de combustible lo cual podemos compensarlo aumentando los pulsos del generador PWM, de tal forma de tratar de compensar.

Una vez alcanzado el equilibrio podemos revisar el comportamiento del vehículo, así como algo notorio es el cambio del sonido del motor además que no se podrá apreciar más cambios rápidos debido a que el hidrógeno debe trabajar en el motor por unos 2000Km para poder notar los cambios importantes como la limpieza de los cilindros al ser una combustión más limpia y pareja en las cámaras.

Una vez alcanzado el kilometraje necesario usando hidrógeno, se notó cambios notorios en el sonido del motor tanto como en su aceleración y velocidad máxima, una prueba muy importante es la de controlar como están los gases en la salida de escape, por lo que teniendo la última Revisión Técnica se tiene que el vehículo antes del hidrógeno producía un 16.7% de CO₂, por lo que actualmente habiendo renovado el certificado de Revisión Técnica tenemos que la contaminación del vehículo ha bajado a 10.8% de CO₂, lo cual es algo bueno ya que intentamos reducir la contaminación.

2. RESULTADOS

Los resultados en el vehículo de prueba no fueron instantáneos, a medida que se fue dándole uso al vehículo, empezó a notarse el cambio más o menos a partir de los 2000 km de recorrido tanto en el consumo, el torque o aceleración del vehículo y las revoluciones del motor.

Para evaluar el consumo, el vehículo cuenta con una bitácora donde se ha llevado el control de su consumo, esta bitácora se inició en el 2006 hasta el presente, la información que contiene es, la fecha de llenado, monto pagado, kilometraje del vehículo, costo del galón de gasolina y finalmente galones que ingresaron; lo cual nos sirve para hacer los análisis de costo de vida y las estimaciones con el nuevo sistema que veremos más adelante, para nuestro caso de estudio hemos extraído los datos donde se ha realizado el llenado completo del tanque y en relación con el kilometraje parcial recorrido calculamos la distancia recorrida por galón consumido de gasolina



FECHA	KILOMETRAJE	KM RECORRIDO	GALONES	G/KM	PRECIO GALON	PRECIO TOTAL
16/05/2006	42289	112	3.40	32.94	14.70	S/.50
01/08/2006	42568	72	2.04	35.28	14.70	S/.30
25/11/2006	42971	120	3.55	33.80	14.10	S/.50
14/01/2007	43766	109	3.55	30.70	14.10	S/.50
14/04/2007	44797	123	3.72	33.06	13.45	S/.50
03/05/2007	45027	230	6.11	37.64	13.60	S/.83
20/05/2007	45535	132	3.68	35.91	13.60	S/.50
29/05/2007	45605	70	1.77	39.57	15.30	S/.27
02/12/2007	46647	110	3.23	34.10	15.50	S/.50
08/01/2008	47114	121	3.23	37.51	15.50	S/.50
01/02/2008	47375	114	3.23	35.34	15.50	S/.50
22/02/2008	47658	123	4.52	27.23	15.50	S/.70
08/03/2008	47723	65	1.94	33.51	15.50	S/.30
21/03/2008	47958	235	5.47	42.99	15.50	S/.85
26/06/2008	49111	116	4.27	27.18	16.40	S/.70
30/07/2008	49586	141	6.10	23.12	16.40	S/.100
12/11/2008	51279	177	6.25	28.32	16.00	S/.100
16/01/2009	52541	195	5.74	34.00	13.95	S/.80
12/04/2009	54343	123	3.50	35.12	12.85	S/.45
30/05/2009	55202	112	3.89	28.78	12.85	S/.50
25/09/2009	57090	154	5.02	30.67	11.95	S/.60
31/10/2009	57596	135	4.18	32.27	11.95	S/.50
17/12/2009	58468	319	7.94	40.19	12.53	S/.99
26/03/2010	60481	131	4.03	32.49	12.50	S/.50
14/05/2010	61335	177	5.39	32.82	12.98	S/.70
18/07/2010	62322	151	3.82	39.56	13.10	S/.50
05/10/2010	64243	145	3.85	37.64	12.98	S/.50
20/11/2010	65204	166	6.12	27.15	13.50	S/.83
01/01/2011	66240	180	5.69	31.65	13.95	S/.79
06/02/2011	66913	149	5.74	25.98	13.95	S/.80
13/02/2011	67472	119	3.04	39.09	13.80	S/.42
20/02/2011	67984	68	2.86	23.81	11.89	S/.34
05/03/2011	68294	187	6.98	26.79	11.51	S/.80
06/04/2011	68953	83	3.87	21.43	15.49	S/.60
17/04/2011	69288	113	3.48	32.46	11.49	S/.40
21/04/2011	69431	143	4.97	28.77	11.75	S/.58

04/05/2011	70483	60	2.10	28.59	11.75	S/.25
22/05/2011	71022	136	5.29	25.71	11.97	S/.63
11/06/2011	71748	175	5.77	30.35	12.49	S/.72
28/06/2011	72175	148	4.77	31.03	12.58	S/.60
29/07/2011	73171	250	7.67	32.58	12.38	S/.95
16/08/2011	74306	239	7.29	32.79	12.49	S/.91
04/10/2011	76281	246	6.16	39.92	12.98	S/.80
22/12/2011	78304	188	5.62	33.46	13.35	S/.75
10/02/2012	80100	187	5.85	31.96	12.99	S/.76
25/02/2012	80790	117	4.02	29.11	13.69	S/.55
09/03/2012	81035	53	2.27	23.33	13.65	S/.31
29/05/2012	84046	113	3.94	28.69	13.99	S/.55
30/06/2012	84649	126	3.29	38.30	13.99	S/.46
29/07/2012	85536	245	6.18	39.64	12.95	S/.80
10/09/2012	86659	196	4.89	40.07	13.29	S/.65
28/10/2012	88679	201	7.32	27.47	12.98	S/.95

TABLA 4.1. Rendimiento de Galones por distancia recorrida antes de la mejora

Fuente: Elaboración Propia

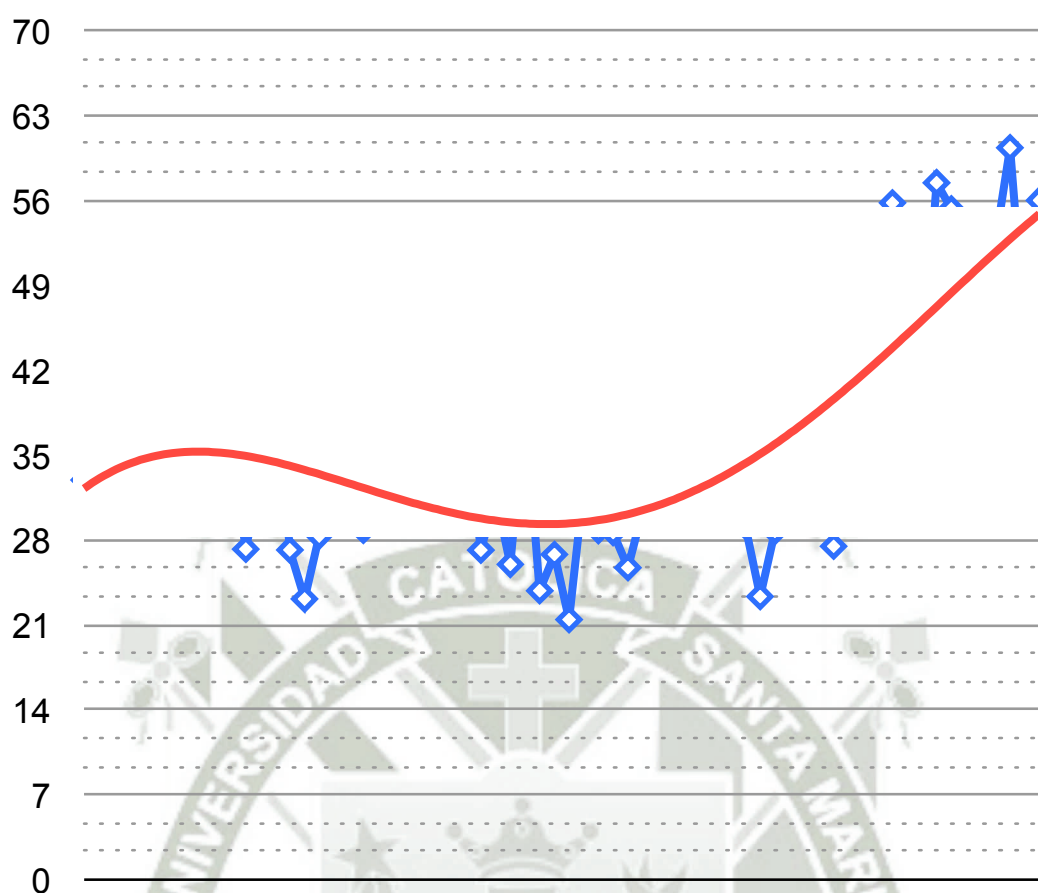
Vemos que el vehículo sin modificaciones ha presentado un consumo de 30 a 40 km/galón, teniendo en cuenta que la variación depende mucho del estilo de manejo y los lugares como ciudad y carretera.

FECHA	KILOMETRAJE	KM RECORRIDO	GALONES	G/KM	PRECIO GALON	PRECIO TOTAL
16/11/2012	89359	134	2.87	46.62	12.18	S/35
28/11/2012	89664	305	5.75	53.03	12.18	S/70
07/12/2012	89776	112	2.87	38.97	12.18	S/35
09/12/2012	90140	364	6.53	55.76	13.79	S/90
09/12/2012	90285	145	3.29	44.09	12.18	S/40
30/12/2012	90505	220	5.34	41.20	12.18	S/65
01/01/2013	90859	354	6.17	57.42	13.79	S/85
09/01/2013	91041	182	3.29	55.27	12.18	S/40
14/01/2013	91229	188	4.19	44.90	12.18	S/51
26/01/2013	91457	228	5.75	39.67	12.98	S/75
27/01/2013	91780	323	6.16	52.43	12.18	S/75
24/02/2013	92488	368	6.10	60.30	14.75	S/90
24/02/2013	92717	229	5.06	45.27	12.85	S/65
03/03/2013	93072	249	4.45	55.97	13.49	S/60

TABLA 4.2. Rendimiento de Galones por distancia recorrida con la mejora instalada

Fuente: Elaboración Propia

Ahora con los datos recientes vemos que el consumo a subido de 40 a 60 km/galón, lo cual es un notorio cambio en el consumo, además que no se ha cambiado el estilo de manejo y ademas que algunas de las variaciones se deben a temas de mantenimiento del sistema como la recarga del deposito de agua.



3. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

El mantenimiento es muy importante ya que de esto dependerá la cantidad de hidrógeno que se genere.

Inicialmente hay que revisar si hay algún tipo de fuga por los conectores y mangueras, luego hay que revisar el color del agua del deposito, si este aun se mantiene claro no necesitamos hacer limpieza del deposito, de lo contrario hay que drenar el agua y limpiar el deposito.

El generador de hidrógeno es la parte más importante y por lo tanto con el cuidado necesario no tendremos problemas con la generación de hidrógeno si lo mantenemos adecuadamente. Esto implica retirarlo, según las pruebas que se han hecho es conveniente retirarlo para mantenimiento cada 5000 Km de tal forma que al desmontarlo y luego desarmarlo, observemos el estado de las placas metálicas



GRÁFICA 4.2. Placas metálicas con signos de corrosión y sarro

Fuente: Elaboración Propia

Vemos como las caras de las placas se tornan un color amarillento, esto debido a la presencia de oxígeno como resultado del a electrólisis que corroen las placas ademas de las posibles impurezas en el agua que se acumulan también en las placas.

Entonces procedemos a pulir las placas con una hoja de lijar gruesa con la finalidad de retirar toda señal de corrosión y sarro, luego lavamos las placas y armamos nuevamente el generador, pero usando guantes debido a que si tocamos las placas con las manos dejamos grasa o suciedad de nuestras manos que perjudican el funcionamiento, recomendable es armar el sistema con las placas húmedas



GRÁFICA 4.3. Placa pulida y armado del generador

Fuente: Elaboración Propia

Una vez armado el sistema nuevamente preparamos el agua destilada con el KOH, hay que tener en cuenta que si el agua que retiramos no esta turbia, podemos reutilizarla, pero en el caso de estar sucia hay que almacenarla en un deposito debidamente etiquetado para luego ser eliminado, de preferencia con algún laboratorio cercano, esto es importante porque echarla al drenaje contaminamos seriamente el agua ya que como parte del Tratamiento del agua es difícil eliminar los químicos, y ya que este proyecto pretende estar con el medio ambiente debemos encontrar formas seguras y apropiadas de eliminarlo.



CAPÍTULO V

ESTUDIO ECONÓMICO Y DE CONFIABILIDAD

1. ANÁLISIS DE COSTO DE VIDA

Los datos que usamos para analizar el rendimiento del vehículo son la distancia recorrida en función a los galones comprados, promediando el total por año de uso del vehículo.

	2006(parci al)	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Km	1728	3492	5262	6213	7592	12458	11987
Galones	35.32	81.43	122.21	155.38	174.50	270.37	251.10
Costo	S/.500.15	S/.1,170. 16	S/.1,943. 28	S/.1,975. 92	S/.2,262. 76	S/.3,46 4	S/.3,460. 43
Km/G	48.93	42.88	43.06	39.99	43.51	46.08	47.74
Precio G	S/.14.16	S/.14.37	S/.15.90	S/.12.72	S/.12.97	S/.12.8 1	S/.13.78
Total	S/.14,776.6 4						
Total Km	48732						

TABLA 5.1. Rendimiento Anual del vehículo

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla vemos la distancia total recorrida en cada año, hay que tener en cuenta que del año 2006 a fines del 2010 el vehículo se encontraba en la ciudad de Ilo en el departamento de Moquegua y usaba gasolina de 95 octanos, debido a que no había de 90 octanos, y finalmente para los años 2011 y 2012, el vehículo se encontraba en la ciudad de Arequipa y empezó

a usar gasolina de 90 octanos además que a fines del 2012 se instaló el sistema para hacer pruebas en el vehículo.

Para poder estimar se hace complicado debido ya que los precios del combustible tienden a subir, tomamos como referencia de consumo el promedio del rendimiento del vehículo con el sistema instalado tenemos un valor de 49.39 Km/G, además que asumimos que el recorrido del vehículo será de 950Km a partir de marzo ya que se tiene datos de enero y febrero, entonces tenemos lo siguiente.

2013	Km	Galones	Costo	Precio G.	Km/G	Total
enero	1275	25.55	S/.325.76	S/.12.66	49.90	S/.3,261.20
febrero	937	19.76	S/.263.04	S/.13.39	47.41	
marzo	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	Total Km
abril	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	12062
mayo	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	
junio	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	Total Galones
julio	1000	20.25	S/.271.31	S/.13.40	49.39	244.74
agosto	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	
setiembre	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	
octubre	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	
noviembre	950	19.23	S/.257.74	S/.13.40	49.39	
diciembre	1250	25.31	S/.339.14	S/.13.40	49.39	

TABLA 5.2. Estimación de consumo para el año 2013

Fuente: Elaboración Propia

	Km	Galones	Costo
2011	12458	270.37	S/.3,464.00
2012	11987	251.10	S/.3,460.43
2013	12062	244.74	S/.3,261.20

TABLA 5.3. Comparación de rendimiento

Fuente: Elaboración Propia

Podemos ver en las tablas un descenso en la compra de galones por distancia recorrida lo cual es un buen síntoma de que el sistema experimental esta dando resultados, aun podemos perfeccionarlo y mejorar los resultados

2. COSTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA

Una vez logrado mejorar el desempeño y haber conocido el comportamiento del sistema en el tiempo, podemos hacer una estimación de su costo de instalación en cualquier tipo de vehículo.

Para lo cual hacemos una lista de materiales, cantidades y sus costo individuales



MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Celda de hidrógeno	1	UND	S/.600.0	S/.600.0
Depósito de 1galón	1	UND	S/.80.0	S/.80.0
Conectores de gas de 1/4 NPT	8	UND	S/.9.0	S/.72.0
Supresor de Chispa	1	UND	S/.50.0	S/.50.0
Manguera de jebe resistente al calor	3	METROS	S/.12.0	S/.36.0
Abrazaderas de 1/4	8	UND	S/.2.5	S/.20.0
Relé Automotriz con base	1	UND	S/.12.0	S/.12.0
Portafusible y fusible de 30A	1	UND	S/.12.0	S/.12.0
Terminales eléctricos	20	UND	S/.1.5	S/.30.0
Controlador PWM 30A	1	UND	S/.88.0	S/.88.0
Regulador MAP/MAF	1	UND	S/.76.0	S/.76.0
Módulo EFIE 2 canales (OPCIONAL)	1	UND	S/.180.0	S/.180.0
Kit de instalación Eléctrica Automotriz	1	UND	S/.75.0	S/.75.0
Agua Destilada con Electrolito	1	GALÓN	S/.7.0	S/.7.0
			TOTAL	S/.1,338.0

TABLA 5.4. Costo de Materiales
Fuente: Elaboración Propia

Esto representa el costo total invertido en el vehículo de prueba, sin tomar en cuenta los rediseños y ensayos realizados, lo cual pueden disminuir al realizar la compra de los materiales directo a los proveedores mayoristas lo cual reduciría considerablemente los gastos finales de los materiales, ademas mostramos los gastos del servicio de instalación, asesoramiento y mantenimiento del sistema.

DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
Servicio de Instalación	S/.300.0
Capacitación al usuario nuevo	S/.100.0
TOTAL	S/.400.0

TABLA 5.5. Costo de Instalación

Fuente: Elaboración Propia

Cabe resaltar que antes de poder realizar la instalación del sistema, parte del asesoramiento es revisar el estado del motor del vehículo, ya que debe encontrarse en óptimas condiciones, lo cual debemos monitorear el comportamiento del vehículo, para poder dar los resultados que se desean.



CONCLUSIONES

1. Se ha logrado implementar un sistema portátil de producción de hidrógeno a partir del agua para luego inyectarlo de forma segura a un motor de combustión interna
2. Como resultado de la combustión de hidrógeno tenemos en la salida de escape presencia de vapor de agua, lo cual implica que debemos tomar en cuenta el usar materiales inoxidables en la fabricación de los tubos de escape y revisar periódicamente el aceite del motor revisando si este se contamina con el agua
3. Es muy importante que el vehículo donde vamos a instalar el sistema debe estar en muy buenas condiciones mecánicas ya que se desea aumentar el desempeño y no quitarle la vida útil al motor
4. Las computadoras de los automóviles en general buscan optimizar y garantizar una combustión estequiométrica tomando diferentes mediciones con la finalidad de garantizar la eficiencia y óptima economía del vehículo.
5. Se logró determinar el diseño y adecuado dimensionamiento de una celda seca de hidrógeno con la finalidad de asegurar los requisitos básicos para que pueda llevarse a cabo la hidrólisis
6. El uso de un controlador PWM es importante ya que nos da facilidad de tener un mejor control del consumo de energía y la cantidad necesaria de hidrógeno que se necesita, además que evitamos las pérdidas de corriente que se disipa en forma de calor.
7. El sistema se puede adecuar para cualquier tipo de vehículo dependiendo de los sensores con los que trabaja y adecuando el

sistema dependiendo de cilindraje del motor

8. Se puede evaluar opcionalmente la instalación de sensores de oxígeno para poder usarlo como referencia a la hora de sintonizar nuestro sistema cabe resalta que implica algunas modificaciones mecánicas como la instalación de bridas en las tomas del escape
9. No existen sensores de hidrógenos propios para la aplicación que estamos desarrollando puesto que al no haber aun necesidad ni interés inmediato por su uso, no se han desarrollado
10. La acción del hidrógeno en el vehículo no es inmediata, ya que el vehículo estuvo trabajando con gasolina y carboniza las cámaras de combustión, al formar parte de la combustión el hidrogeno va limpiar las cámaras de combustión ya que su combustión es limpia y espontánea
11. El mantenimiento del sistema es clave para garantizar el óptimo funcionamiento ya que poco a poco se ira generando menos cantidad de hidrogeno y el sistema recalentara puesto que la mayor parte de la corriente se disipara en forma de calor, para lo cual debe incluirse en el mantenimiento periódico del vehículo
12. En la electrónica automotriz importa mucho las consideraciones que deben haber a la hora de realizar el cableado del sistema y su recorrido ya que debe evitarse las zonas de elevada temperatura además que debemos protegerlo con un forro de plástico corrugado ya que el cable debe ser capaz de resistir el calor y la humedad.

RECOMENDACIONES

1. Tomar este trabajo de tesis como punto de partida para el análisis y estudio de otras posibles aplicaciones con la finalidad de complementar lo ya aprendido y poder aplicarlo a otros tipos de transporte
2. Realizar un estudio sobre las diferentes generaciones del sistema de GLP o GNV con la finalidad de sustentar la migración a hidrógeno
3. Intentar obtener los materiales necesarios, principalmente la membrana de intercambio protónico, para poder desarrollar una pila de hidrogeno la cual haría la parte inversa que corresponde a la fusión de los iones de hidrógeno y oxígeno con la finalidad de producir agua y energía
4. Realizar un estudio más profundo viendo el tema mecánico acerca del comportamiento del hidrógeno en el interior de un motor de combustión con la finalidad de mejorar la manera como este es inyectado
5. Analizar el impacto social y económico que provocaría el inicio de la economía del hidrogeno en nuestro país.
6. Desarrollar métodos y protocolos sencillos para la manipulación segura no capacitada del hidrogeno para poder aplicarlo y usarlo de forma segura por los diferentes usuarios en nuestro país
7. Tratar de desarrollar una forma para medir de manera directa o indirecta la presencia de hidrogeno de tal manera de poder estimar el volumen producido

BIBLIOGRAFIA

COLLINS RUDOLF, Jhon. Is 'Peak Oil' Behind Us?. The New York Times (en línea). November 14, 2010. Disponible en Internet: <<http://green.blogs.nytimes.com/2010/11/14/is-peak-oil-behind-us/>>.

MASON, Inman. Has the World Already Passed "Peak Oil"? National Geographic News. November 9, 2010 Disponible en Internet: <<http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2010/11/101109-peak-oil-ia-world-energy-outlook/>>.

INDEX MUNDI. Perfil de desarrollo del Perú. Disponible en Internet: <<http://www.indexmundi.com/es/peru/>>.

Stoots, C. M., O'Brien, J. E., McKellar, M. G., Hawkes, G. L., and Herring, J. S. 2005. —Engineering Process Model for High-Temperature Steam Electrolysis System Performance Evaluation, II AIChE. Annual Meeting, Cincinnati, Oct. 30 – Nov. 4, 2005

Heffel JW. 2003. NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation. Int J Hydrogen Energy. 28:901–908

PICO TRUNCADO. Planta experimental de hidrógeno, 2010. Disponible en Internet: <<http://www.h2truncado.com.ar/h2011/index.htm>>.

IGLESIAS, J. "Instalación de producción y almacenamiento de H₂ para generación eléctrica". julio 2006, Disponible en Internet <http://www.sotaventogalicia.com/pdf/anteproyecto_H2_sotavento.pdf>

Bechtold, Daniel. "Seminario: Otras aplicaciones de hidrógeno y futuros escenarios". 27 de octubre 2011. Disponible en Internet

<http://www.sotaventogalicia.com/pdf/Otras_aplicaciones_de_H2_%20futuros_escenarios.pdf>

Wikipedia, the free encyclopedia, “GA16DNE”. Disponible en Internet
<<http://en.wikipedia.org/wiki/GA16DNE>>

LARSEN, Brian, “10 Questions for a Materials Scientist”, Enero 24, 2013.
Disponible en Internet <<http://energy.gov/articles/10-questions-materials-scientist-brian-larsen>>

ORTIZ, Cristóbal, “El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas”, diciembre 2010, Disponible en Internet <<http://es.scribd.com/doc/112231477/El-hidrogeno-y-sus-aplicaciones-energeticas>>

LLORCA, Jordi. “El Hidrógeno y Nuestro Futuro Energético” Ediciones UPC, 2010

RIFKIN, Jeremy. “La economía del Hidrógeno: La creación de la Red Energética Mundial y la redistribución del poder en la tierra”, PAIDOS IBERICA, 2002