



Universidad del Azuay
Facultad de Ciencia y Tecnología
Escuela de Ingeniería Mecánica

**Análisis del funcionamiento de los vehículos con celdas de
combustible de hidrógeno y con paneles solares**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

AUTOR:

LUIS FROILAN PESÁNTEZ PESÁNTEZ

DIRECTOR:

ING. MATEO FERNANDO COELLO SALCEDO

Cuenca – Ecuador

2014

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mi familia. A Dios por mostrarme día a día que con humildad, paciencia y esfuerzo todo es posible, a mi familia por todo el esfuerzo que realizaron para mi bienestar y su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y sobre todo por enseñarme a ser responsable para lograr cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTO

Agradezco especialmente a mi tío por brindarme la oportunidad de estudiar y terminar esta carrera, a mi papa que a pesar de tantas diferencias siempre me alentó en cada momento, a mi mama por todo su esfuerzo y sacrificio en guiarme y acompañarme de forma incondicional en cada etapa de mi vida, y especialmente a la Universidad por acogerme dentro de sus instalaciones y brindarme de una excelente enseñanza con todo el aporte de los profesores de la facultad compartiendo sus experiencias y conocimientos de la mejor manera.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: ANÁLISIS DEL USO DE ENERGÍAS LIMPIAS EN EL ÁREA AUTOMOTRIZ	
1.1 Generalidades.....	2
1.2 Tipos de energías limpias utilizadas en el vehículo.....	3
1.2.1 Biocombustibles.....	3
Primera generación.....	3
Segunda generación.....	4
Tercera generación.....	4
1.2.1.1 Tipos de biocombustibles.....	4
a. El biodiesel.....	4
b. El bioetanol.....	5
c. El biogás.....	5
1.2.1.2 Vehículos con biocombustibles.....	5
1.2.2 La energía solar.....	7
1.2.3 La electricidad.....	8
1.2.3.1 Los híbridos.....	9
1.2.4 El hidrógeno.....	10
1.2.4.1 Ventajas y desventajas del hidrógeno.....	13
1.3 La huella de carbono en las energías renovables.....	14
1.3.1 Impacto de los biocombustibles.....	17
1.3.2 Impacto de la energía solar.....	18
1.3.3 Impacto de los vehículos eléctricos e híbridos.....	19

1.3.4 Impacto del Hidrógeno.....	20
----------------------------------	----

CAPITULO II: DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO Y CON PANELES SOLARES EN LOS VEHÍCULOS.

2.1 La electrolisis.....	21
2.1.1 La electrolisis del agua.....	22
2.1.2 Reacción química del agua.....	22
2.1.3 Voltaje para la electrolisis del agua.....	23
2.1.3.1 La energía libre de Gibbs.....	24
2.1.3.2 Trabajo eléctrico.....	24
2.1.3.3 Determinación del voltaje para la electrolisis del agua.....	24
2.1.4 Cantidad de hidrógeno obtenido.....	26
2.1.5 Componentes para la electrolisis.....	27
2.1.5.1 Electrolizador.....	27
2.1.5.2 Electrodo.....	28
2.1.5.3 Electrolito.....	28
2.2 Panel solar.....	28
2.2.1 Principio de funcionamiento.....	29
2.2.2 Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas.....	29
2.2.3 Tipo de conexiones de los paneles solares.....	31
2.2.3.1 Conexión en serie de los paneles solares.....	32
2.2.3.2 Conexión en paralelo de los paneles solares.....	32
2.2.3.3 Conexión mixta de los paneles solares.....	33
2.2.4 Componentes del sistema fotovoltaico.....	33
2.3 Pila de combustible de hidrógeno.....	33
2.3.1 Tipos de pila de combustible de hidrógeno.....	35
2.3.1.1 Pila de combustible intercambiadora de protones (PEMFC).....	36
2.3.2. Estructura básica de la pila (PEMFC).....	36
2.3.2.1 Placa de cierre.....	37
2.3.2.2 Soportes.....	38
2.3.2.3 Conjunto MEA.....	38
2.3.2.4 Placas refrigeradoras.....	38
2.3.2.5 Membrana PEM.....	39

2.3.3 Funcionamiento de la pila de combustible.....	39
2.3.3.1 Teoría de los gases	39
2.3.3.2 Voltaje de la celda de combustible de hidrógeno.....	40
2.3.3.3 Potencia de la celda de combustible de hidrógeno	43
2.3.3.4 Rendimiento termodinámico de la pila de combustible.....	43
2.3.3.5 Rendimiento electroquímico de la pila de combustible	44
2.4 Elementos del vehículo con pila de combustible de hidrógeno	48
2.4.1 Depósito de combustible de hidrógeno	48
2.4.2 Pila de combustible de hidrógeno	48
2.4.3 Motor eléctrico	49
2.4.4 Control electrónico.....	49
2.4.5 Acumulador de energía	49
2.4.5.1 Baterías.....	50
2.4.5.2 Supercondensadores	50
2.4.5.3 Acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE).....	50

CAPITULO III: PROPUESTA TÉCNICA PARA IMPULSAR UN VEHÍCULO LIVIANO.

3.1 Introducción.....	51
3.2 Análisis para el funcionamiento del vehículo.....	51
3.3. Condiciones del vehículo.....	52
3.3.1. Condiciones de la pila de combustible de hidrógeno.....	52
3.4. Resistencia al avance del vehículo.....	53
3.4.1 Resistencia a la rodadura	53
3.4.2 Resistencia a aerodinámica.....	53
3.4.3 Resistencia a la pendiente.....	54
3.4.4 Cálculos.....	54
3.4.4.1 Cálculo a la resistencia a la rodadura.....	54
3.4.4.2 Cálculo a la resistencia aerodinámica.....	54
3.4.4.3 Cálculo a la resistencia a la pendiente.....	55
3.4.5 La potencia.....	55
3.4.5.1 Potencia a diferentes velocidades.....	56
3.5. Calculo del tamaño de la pila de combustible de hidrógeno.....	57

3.5.1	Calculo de la cantidad de hidrógeno.....	58
3.5.2.	Calculo de la Cantidad de oxígeno.....	60
3.6	Panel solar y electrolisis.....	61
3.6.1	Cálculos para la electrolisis con el panel solar en el vehículo.....	62
3.6.2	Capacidad de la batería fotovoltaica.....	62
3.6.3	Análisis de la producción de hidrógeno por electrolisis.....	63
3.7	Volumen del tanque de hidrógeno.	64
3.7.1	Volumen del tanque de hidrógeno principal	64
3.7.2	Volumen del tanque de hidrógeno secundario.....	67
3.8.	Dimensión del tanque de almacenamiento.....	68
3.8.1	Dimensión del tanque de almacenamiento principal.....	69
3.8.2.	Dimensión del tanque de almacenamiento secundario.....	70
3.9	Flujo del hidrógeno a la pila	71
3.10	Autonomía.....	72
3.11	Esquema y funcionamiento de la pila de combustible de hidrógeno y paneles solares en el vehículo.....	73

Capítulo IV: ANÁLISIS DE COSTOS

4.1	Empresas y centros de investigación.....	75
4.2	Proyectos a nivel mundial.....	76
4.2.1	Financiación de proyectos y búsqueda de ayudas públicas.....	77
4.3	Fabricantes de los principales componentes.....	78
4.3.1	Electrolizadores.....	78
4.3.2	Paneles solares.....	79
4.3.3	Pilas de combustible de hidrógeno.....	80
4.3.4	Estaciones de abastecimiento de hidrógeno.....	82
4.3.5	Software para energías renovables.....	83
4.4	Vehículos FCV.....	84
	Conclusiones y recomendaciones.....	86
	Bibliografía.....	89
	Anexos.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Vehículo Flex fuel.....	6
Fig. 1.2 Vehículo biodiesel.	7
Fig. 1.3 Vehículo con vela solar.....	8
Fig. 1.4 Vehículo eléctrico.	9
Fig. 1.5 Constitución del vehículo hibrido.	10
Fig. 1.6 Vehículo con motor de hidrógeno.	12
Fig. 1.7 Vehículo con pila de combustible de hidrógeno.	13
Fig. 1.8 Resultado de la calificación de gases del Toyota Prius 2013.....	15
Fig. 2.1 Proceso de Electrolisis.....	22
Fig. 2.2 Componentes del electrolizador.....	27
Fig. 2.3 Panel solar.	30
Fig. 2.4 Conexión en serie de las celdas fotovoltaicas.....	30
Fig. 2.5 Posición del lado positivo y negativo de una celda fotovoltaica.....	31
Fig. 2.6 Conexión en serie de los paneles solares.....	31
Fig. 2.7 Conexión en serie de los paneles solares.....	32
Fig. 2.8 Componentes para una instalación con paneles solares.....	33
Fig. 2.9 Electrovan GM, 1966.....	34
Fig. 2.10 Electrovan expuesto en el museo del Automóvil Petersen en los Ángeles California.	35
Fig. 2.11 Conjunto completo con placas de cierre.	37
Fig. 2.12 Conjunto MEA.	38
Fig. 2.13 Voltaje real de la pila.....	45
Fig. 2.14 Stack de celdas que forma la pila de combustible.....	49
Fig. 3.1 Grafico comparativo del voltaje nominal, numero de celdas e intensidad de corriente.....	58
Fig. 3.2 El panel solar en el Toyota Prius.....	61
Fig. 3.3 Grafico de la variación del volumen de hidrógeno a diferentes presiones	67
Fig. 3.4 Vehículo con pila de combustible.....	70
Fig. 3.5 Esquema del circuito con pila de combustible de hidrógeno y paneles solares en el vehículo.	73

Fig.3.6 Válvula de entrada de hidrógeno.....74

Fig. 4.1 Esquema de una estación de hidrógeno con paneles solares.....77

Fig. 4.2: Electrolizador alcalino en las instalaciones de la Fundación Hidrógeno Aragón.....79

Fig.4.3: Pila de combustible desarrollada por NISSAN.....82

Fig. 4.4 Estación de servicio con electrolizadores y paneles solares.....84

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Numero de octanos de algunos combustibles.....11

Tabla 1.2 Métodos de obtención del Hidrógeno.....13

Tabla 1.3 Resultado de las emisiones contaminantes del Toyota Prius 2013.....16

Tabla 1. 4 Rango de Emisiones de g CO2 / k.....16

Tabla 2.1 Entropías molares y entalpias de diferentes sustancias.....25

Tabla 3.1. Resultado de la resistencia al avance del vehículo y la potencia a diferentes velocidades.....56

Tabla 3.2. Resultado de la variación del voltaje nominal de la pila de combustible de hidrógeno.....57

Tabla 3.3. Masa total de hidrógeno a la entrada de la pila de combustible de hidrógeno.....60

Tabla 3.4. Factor de compresibilidad (temperatura °K).....65

Tabla 3.5. Resultado del volumen de almacenaje de hidrógeno a diferentes presiones.....66

Tabla 3.6 Resultado del tiempo de consumo a una determinada velocidad del hidrógeno almacenado a diferentes presiones.....69

Tabla 3.7. Radio del cilindro de almacenaje de hidrógeno a diferentes presiones...70

Tabla 3.8 Resultado del flujo de hidrógeno a la entrada de la pila de combustible.....72

Tabla 3.9 Tiempo de funcionamiento del vehículo en función de la velocidad....72

Tabla 4.1 Electrolizadores comerciales de baja potencia < 17 kW.....79

Tabla 4.2 Compañías que fabrican las celdas de combustible.....81

INDICE DE ECUACIONES

2.1. Ecuación libre de Gibbs.....	24
2.2. Ecuación del trabajo eléctrico.....	24
2.3. Ecuación del potencial eléctrico.....	25
2.4. Ecuación de la masa de hidrógeno producida.....	26
2.5. Ecuación de la potencia fotovoltaica.....	31
2.6. Ecuación del número de celdas.....	31
2.7. Ecuación de los gases ideales.....	40
2.8. Ecuación del voltaje de una celda de combustible.....	40
2.9. Funciones de Helmholtz y Gibbs.....	42
2.10. Ecuación del potencial de la celda de combustible de hidrógeno.....	43
2.11. Rendimiento termodinámico de la pila de combustible.....	44
2.12. Ecuación del voltaje real de la pila de combustible.....	46
2.13. Ecuación del voltaje de activación.....	46
2.14. Ecuación del sobrepotencial en ambos electrodos.....	47
2.15. Ecuación del voltaje óhmico.....	47
2.16. Ecuación de Nernst.....	47
3.1. Resistencia a la rodadura.....	53
3.2. Resistencia aerodinámica.....	53
3.3. Resistencia a la pendiente.....	54
3.4. Ecuación de la potencia del vehículo.....	55
3.5. Ecuación de la relación del consumo y entrada de hidrógeno.....	59
3.6. Ecuación de la intensidad de corriente.....	59
3.7. Ecuación de la capacidad de la batería.....	62
3.8. Ecuación del volumen de la compresibilidad del gas.....	62
3.9. Ecuación del volumen de un cilindro.....	65
3.10. Ecuación del flujo del hidrógeno.....	65
3.11. Ecuación del volumen de un cilindro	68
3.12. Ecuación del flujo del hidrógeno.....	71
3.13. Ecuación de la densidad del hidrógeno obtenido.....	71

INDICE DE ANEXOS

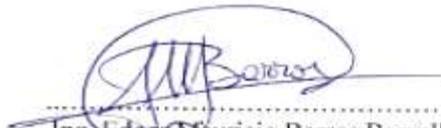
Anexo1. Ecuación de la energía libre de Gibbs.....	100
Anexo2. Reacción química del agua.....	102
Anexo 3. Voltaje de la celda de combustible.....	104

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS CON CELDA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO Y CON PANELES SOLARES

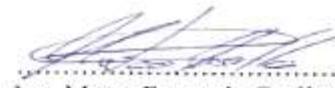
RESUMEN

El siguiente proyecto comprende el análisis del diseño de una pila de combustible a hidrógeno aplicada a un vehículo de marca Toyota Prius modelo 2013. Este diseño estuvo en función de la reacción electroquímica del hidrógeno y del oxígeno, obtenido por la electrolisis del agua a través de paneles solares. Inicialmente se determinó la cantidad de gas de hidrógeno requerido para generar energía eléctrica, de manera que genere el movimiento de un motor eléctrico síncrono de imán permanente conectado al eje de las ruedas motrices para la propulsión del vehículo. Como conclusión se evidenció las características principales en el funcionamiento del prototipo, obteniendo como resultado una similitud a un vehículo eléctrico con varias ventajas y desventajas entre ellas mayor autonomía, batería sin tiempos de carga e hidrógeno abastecido por zonas estacionarias, sin embargo como desventaja implica en implementación y en construcción.

PALABRAS CLAVE: Electrolisis del agua, motor eléctrico síncrono de imán permanente, pila de combustible de hidrógeno, stack de celdas de combustible, comprensibilidad del gas de hidrógeno.



 Ing. Edgar Mauricio Barros Barzallo
 PRESIDENTE DE LA ESCUELA DE
 INGENIERIA MECANICA AUTOMOTRIZ



 Ing. Mateo Fernando Coello Salcedo
 DIRECTOR DE TESIS



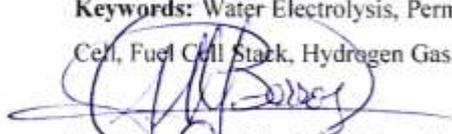
 Luis Froilán Pesantez Pesantez
 ESTUDIANTE

**ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF HYDROGEN FUEL CELLS
VEHICLES WITH SOLAR PANELS**

ABSTRACT

This project consists of the analysis of a hydrogen fuel cell design applied to a Toyota Prius 2013 vehicle. This design was made based on the electrochemical reaction of hydrogen and oxygen, obtained by water electrolysis through solar panels. Initially, the amount of hydrogen gas required for power generation was determined so as to generate the drive of a permanent-magnet synchronous motor connected to the driving wheel axis for vehicle propulsion. In conclusion, the main features were evidenced in the performance of the prototype, which resulted similar to an electric vehicle with several advantages and disadvantages. Among the advantages we can name greater autonomy, battery without loading time, and hydrogen supplied by stationary areas; however, as disadvantages are its implementation and construction.

Keywords: Water Electrolysis, Permanent-Magnet Synchronous Motor, Hydrogen Fuel Cell, Fuel Cell Stack, Hydrogen Gas Compressibility.


Ing. Edgar Mauricio Barros Barzallo
SCHOOL DIRECTOR


Ing. Mateo Fernando Coello Salcedo
THESIS DIRECTOR


Luis Froilán Pesantez Pesantez
AUTHOR




Translated by
Lic. Lourdes Crespo

Luis Froilán Pesántez Pesántez

Ing. Mateo Fernando Coello Salcedo

Trabajo de graduación

Noviembre 2014

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS CON CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO Y CON PANELES SOLARES

INTRODUCCIÓN

La aplicación de las energías limpias en los vehículos en la actualidad es una alternativa para sustituir el uso del petróleo y cuidar el medio ambiente, entre algunas de las energías limpias encontramos la aplicación de la celda de combustible de hidrógeno y el panel solar; estas energías combinadas ofrecen varias ventajas para ser aplicadas en los vehículos y están divididas en dos partes para conseguir su mejor rendimiento.

La primera parte del proceso se da por medio de la energía solar con los paneles solares conectados entre sí para acumular y guardar una cantidad de energía con el objetivo de ser utilizada para el proceso de la electrolisis del agua y obtener el hidrógeno en forma de gas con la condición de almacenarlo en el vehículo o tener una zona de servicio de abastecimiento de combustible de hidrógeno.

La segunda parte del proceso es el funcionamiento de la pila de combustible de hidrógeno mediante la combinación del gas de hidrógeno y oxígeno para la producción de energía eléctrica capaz de ser aplicada en un motor eléctrico y proporcionar el movimiento del vehículo; de esta manera funcionando como un vehículo eléctrico con la diferencia que utilizaría un abastecimiento de combustible limpio que no contamina el medio ambiente.

CAPITULO 1

ANÁLISIS DEL USO DE ENERGÍAS LIMPIAS EN EL ÁREA AUTOMOTRIZ

En este capítulo se describe los avances de las energías limpias más actuales que encontramos en proceso y uso que permiten sustituir a los combustibles fósiles en los vehículos, con lo cual, el objetivo es disminuir la gran cantidad de gases que ocasionan la huella de carbono en el medio ambiente. También se indican las principales consecuencias por implementar y fabricar estos tipos de vehículos que asumen ser el futuro de una nueva tecnología limpia.

Se prestará especial atención a los vehículos que utilizan la pila de combustible de hidrógeno y paneles solares para su funcionamiento, además de presentar cuales son las principales consecuencias que pueden darse por su fabricación e implementación contra el medio ambiente.

1.1.Generalidades

Las energías limpias en la actualidad se encuentran en un proceso de adaptación y tienen grandes expectativas debido a su relación positiva con el medio ambiente, por este motivo, son también llamadas “*energías verdes*”¹ debido a que no generan ningún tipo de residuo contaminante, en comparación con el petróleo que cada vez se encuentra más escaso, costoso y lo más importante se ha convertido en el principal factor contaminante para el débil medio ambiente, finalmente, todavía no se encuentra completamente una energía capaz de sustituirlo principalmente en el sector automotriz, por lo tanto, conlleva a realizar varias investigaciones y pruebas con distintas formas de energía y entre una de ellas encontramos al hidrógeno.²

¹ERENOVABLE, **ENERGÍAS LIMPIAS**. [En línea]. [21 de marzo del 2013]. <http://erenovable.com/energias-limpias/>

²ENTER.CO. **FUENTES DE ENERGÍA PARA LOS VEHÍCULOS: ¿DIREMOS ADIÓS A LA GASOLINA?** [En línea]. [25 de marzo del 2013]. <<http://www.enter.co/autotecnologia/fuentes-de-energia-para-los-vehiculos-%C2%BFdaremos-adios-a-la-gasolina>>

1.2. Tipos de energías limpias utilizadas en el vehículo

El impacto ambiental por la gran cantidad de emisión de gases debido al uso de los combustibles fósiles han ocasionado que los vehículos se encuentren entre los principales responsables de este factor, de tal manera, la nueva tecnología implementada en el funcionamiento del vehículo muestra diferentes formas de sustituir los motores de combustión interna con otras fuentes de energía y produzca las emisiones de gases de menor cantidad o casi totalmente nula.

1.2.1. Biocombustibles

Los biocombustibles no son prácticamente una tecnología nueva puesto que inicialmente aparecieron cuando los combustibles fósiles y los motores a combustión interna comenzaban a ser utilizados, por otra parte en 1908 Rudolf Diesel presento un prototipo de un motor que utilizaba aceite de cacahuete o maní, sin embargo, no fue tomado en cuenta ya que el petróleo era más fácil y económico de obtener y desde ese entonces se comenzaron a utilizar los combustibles fósiles hasta la actualidad, no obstante se han vuelto a tomar en cuenta sobre todo para reducir la contaminación por ese motivo han surgido en los últimos años varias generaciones como se indica a continuación.³

- **Primera generación.**

La primera generación empezó por la obtención de los cultivos, los mismos que pasan por un proceso de fermentación entre ellos los más principales son a base de los azúcares que se obtiene de la caña de azúcar, la remolacha y los almidones, como el maíz y la yuca, el principal inconveniente de esta generación tiene consecuencia en las áreas de cultivos ya que son separadas para el uso del combustible y esto complica o limita la alimentación de una población.⁴

³ENERGÍAS RENOVABLES Y VERDES. **ORÍGENES E HISTORIA DE LOS BIOCMBUSTIBLES**. [En línea]. [27 de marzo del 2013]. <<http://www.renovablesverdes.com/origenes-e-historia-de-los-biocombustibles/>>

⁴ SAGRAPA. **GENERACIONES DE LOS BIOCMBUSTIBLES**. [En línea]. [27 de marzo del 2013]. <<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/introduccion/generaciones-de-los-biocombustibles.html>>

- **Segunda generación.**

Inicia por la elaboración de las materias primas que pueden convertirse en celulosa, como los desechos de los cultivos alimenticios (los tallos del trigo o del maíz) e incluso el aserrín o plantas con un alto contenido de materia lignocelulosa (que es la estructura biológica que hace que la planta se mantenga erguida) o el miscanthus que es un pasto o hierba, la consecuencia de esta generación es el poco alcance en producción ya que se necesita una alta demanda de inversión económica de tal forma todavía aun no es rentable pero si una posibilidad para el futuro.⁵

- **Tercera generación**

Inicia desde los cultivos específicos, como las algas que tienen un potencial energético que puede llegar a ser 30 veces mayor que los obtenidos a base de los cultivos energéticos en tierra, ya que capturan una gran cantidad energía solar y se reproducen rápidamente, por consiguiente esta generación se encuentra en inicios debido a que se encuentra en la etapa experimental por lo tanto el uso de esta tecnología para la producción en masa de biocombustibles no es económicamente viable.⁶

1.2.1.1. Tipos de Biocombustibles

Los biocombustibles se mezclan con combustibles convencionales en diferentes proporciones por este motivo, son controlados por organizaciones encargadas para el beneficio del medio ambiente, de la misma manera, según la combinación que se haga resultan varios tipos de biocombustibles, a continuación los más utilizados en el uso automotriz.

a. El biodiesel

El biodiesel es un combustible renovable que tiene el mayor potencial de desarrollo en todo el mundo, se puede usar puro o mezclado con el combustible en cualquier proporción para motores a diésel, se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas de animales, por

⁵ SAGRAPA. **GENERACIONES DE LOS BIOCMBUSTIBLES.** [En línea]. [27 de marzo del 2013]. <<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/introduccion/generaciones-de-los-biocombustibles.html>>

⁶ F. PABLO. **LOS BIOCMBUSTIBLES.** [En línea]. [27 de marzo del 2013]. <http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/e_biocombus.htm#introduc>

lo tanto, se lo utiliza como un aditivo del diésel fósil de modo que contribuye a disminuir las emisiones del monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles⁷

b. El bioetanol

El bioetanol es un alcohol que se obtiene destilando los hidratos de carbono, provenientes de la materia orgánica, que se encuentran en los cereales, cultivos con alta composición de azúcares, materia prima de residuos de procesos industriales, agrícolas o forestales con un alto contenido de biomasa y se emplea en mezclas de distinta concentración para obtener biocombustibles, por lo tanto, permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que sobrecalientan la superficie terrestre y aceleran el cambio climático.⁸

c. El biogás

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica mediante la acción de los microorganismos de la basura, por otro lado, al ser utilizado en el vehículo las emisiones son un 20% menor que en los de gasolina. Por otra parte, es uno de los más implementados para el uso regenerativo en una ciudad como energía eléctrica.⁹

1.2.1.2. Vehículos con biocombustibles

Existen varias marcas de vehículos con biocombustible en todo el mundo, entre uno de ellos es el caso de la marca Volkswagen con su modelo Flex fuel en el Brasil, su principal característica es un motor de combustión interna que está diseñado para funcionar con más de un tipo de combustible además de tener un depósito de almacenamiento común, por lo tanto, sus cantidades de emisiones de CO₂ son mínimas.¹⁰

⁷ F. PABLO. **LOS BIOCMBUSTIBLES.** [En línea]. [27 de marzo del 2013]. <http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/e_biocombus.htm#introduc>

⁸BIOKIT. **BIOETANOL Y BIOCMBUSTIBLES.** [En línea]. [28 de marzo del 2013] <<http://www.biokitmotor.com/info/bioetanol>>

⁹ PLANTHOGAR.NET. **QUE ES EL BIOGÁS.** [En línea]. [28 de marzo del 2013] <<http://www.planthogar.net/encyclopedia/jump.asp?doc=00000293.htm>>

¹⁰LANACION.COM. **LOS MOTORES FLEX DOMINAN EL MERCADO EN BRASIL.** [En línea]. [28 de marzo del 2013] <<http://www.lanacion.com.ar/771859-los-motores-flex-dominan-el-mercado-en-brasil>>

Fig. 1.1 Vehículo Flex fuel.



Fuente:<http://www.lanacion.com.ar/771859-los-motores-flex-dominan-el-mercado-en-brasil>

La empresa Bosch de Brasil ha desarrollado un sistema para que la gasolina se mezcla con un biocombustible diferente con el objetivo de reducir las emisiones de gases, el modelo de este vehículo es el Flex fuel o multiflex permitiéndole al conductor elegir el uso de tres combustibles diferentes, ya sea sólo por gas natural, por alcohol, por gasolina o por una mezcla de alcohol/gasolina, accionando por medio de una tecla en el panel de control.¹¹

La ventaja del tri fuel es su autonomía en relación a los sistemas actuales ya que tiene dos tanques de combustible, uno para gas y otro para alcohol/gasolina, de manera que el vehículo recorre una mayor distancia y cuando un sistema se termina automáticamente se realiza el cambio a alimentación por alcohol/combustible pasando a funcionar como un vehículo Flex fuel normal, de otra manera, puede suceder el caso inverso si el combustible líquido se acaba, el gas natural entra en funcionamiento.¹²

En el caso de los biodiesel, el combustible en forma de diesel fabricado de aceites vegetales, grasas de animales o reciclados de los restaurantes, es seguro, biodegradable que se pueden usar en forma pura o mezclados con diesel de petróleo en motores a diesel.¹³

¹¹ MECÁNICOSCOSTARICA.COM. **LOS VEHÍCULOS CON LA TECNOLOGÍA “FUEL-FLEX”**. [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://www.mecanicoscostarica.com/ARTICULOS/Fuel%20flex.htm>>

¹² MECÁNICOSCOSTARICA.COM. **LOS VEHÍCULOS CON LA TECNOLOGÍA “FUEL-FLEX”**. [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://www.mecanicoscostarica.com/ARTICULOS/Fuel%20flex.htm>>

¹³ ENERGY. **BIODIESEL**. [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://www.fueleconomy.gov/feg/esbiodiesel.shtml>>

Fig.1.2 Vehículo biodiesel.



Fuente: <http://energiacasera.wordpress.com/2010/04/01/autoprodutores-de-biodiesel-casero/>

1.2.2. La energía solar

El principio del vehículo con paneles solares inicio en el año de 1982, cuando un visionario aventurero australiano de origen danés Hans Tholstrup y el piloto de carreras Larry Perkins, construyeron y manejaron el primer auto solar con el propósito de mostrar al mundo que la energía solar era una fuente muy importante y suficientemente desarrollada para sustituir a los combustibles fósiles.¹⁴

El vehículo eléctrico no utiliza una caja de velocidades, ya que tiene un motor eléctrico en cada rueda, la energía solar es convertida directamente en electricidad por las celdas solares y almacenadas en unas baterías conectadas en un controlador que se encarga de poner en movimiento al motor eléctrico, por otra parte, utiliza materiales resistentes y ligeros, como el kevlar, la fibra de carbono y la fibra de aramida (fibra sintética compuesta por kevlar y Twaron) permitiendo formas aerodinámicas que reducen las pérdidas mecánicas por fricción de rodamientos y en la transmisión a las ruedas y logra recorrer grandes distancias a una velocidades bajas.¹⁵

¹⁴ MUNDO SOLAR. **HISTORIA DE LOS AUTOS SOLARES.** [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://www.dforcesolar.com/energia-solar/historia-de-los-autos-solares/>>

¹⁵ QUEMOTORES.COM. **FUNCIONAMIENTO DE LOS AUTOS SOLARES.** [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://www.quemotores.com/funcionamiento-de-los-autos-solares/>>

Fig. 1.3 Vehículo con vela solar.



Fuente: <http://slamdemberck.blogspot.com/2010/05/vehiculo-ra-velero-solar.html>

1.2.3. La electricidad.

El vehículo eléctrico fue construido el 31 de agosto de 1894 por el ingeniero Henry Morris y su amigo Pedro Salom y además fue considerado como una alternativa seria por la industria,¹⁶ los vehículos eléctricos actuales tienen una batería de litio, su energía circula al ordenador el mismo que controla, gestiona, y regula la potencia del vehículo y en cada de desaceleración y frenadas las baterías se recargan, por lo tanto, no emite ni gases, ni partículas, ni emisiones de CO₂.¹⁷

Sin embargo, está limitado a un tiempo de funcionamiento por la cantidad de energía que gasta en recorrer largas distancias para ello necesita recargar la batería de alta tensión con ello su tiempo de carga conlleva a que el vehículo permanezca un cierto límite de tiempo detenido, por lo tanto, poseen un cargador para la recarga de las baterías a través de un enchufe convencional de casa.¹⁸

¹⁶ PASEO POR LA HISTORIA. **EL PRIMER COCHE ELÉCTRICO DE LA HISTORIA.** [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://paseandohistoria.blogspot.com/2011/04/el-primer-coche-electrico-de-la.html>>

¹⁷ VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. **VENTAJAS Y DESVENTAJAS.** [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://electricmotorsccc.blogspot.com/2008/10/ventajas-y-desventajas.html>>

¹⁸ AVELE. **EL VEHICULO ELÉCTRICO.** [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <http://www.avele.org/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=23>

Fig. 1.4 Vehículo eléctrico.



Fuente: <http://desenchufados.net/movele-2011-ayudas-para-la-compra-de-coches-electrico/>

1.2.3.1. Los híbridos

Inicio en el año de 1899 por Ferdinand Porsche quien ideó el primer híbrido de la historia, desde ese entonces, su funcionamiento es básicamente la misma que se utiliza ahora de tal manera que el motor de combustión interna se combina con un motor eléctrico y una batería de alto voltaje, del mismo modo encontramos varias marcas de vehículos que utilizan esta tecnología y se encuentran clasificados según su diseño de tres formas diferente en serie, en paralelo y mixtos.¹⁹

Es importante indicar que el motor de combustión interna nunca genera directamente el movimiento de las ruedas, por lo tanto, para iniciar el desplazamiento del vehículo a bajas revoluciones utiliza simplemente la energía de la batería, por otra parte, si en aquellas condiciones la batería no tiene suficiente energía utiliza al motor de combustión interna para dar potencia al generador y recargar la energía de la batería; en el momento que alcanza mayor velocidad, el motor de combustión interna se enciende conjuntamente con el generador y entrega mayor energía para el movimiento de las ruedas, en ese momento, cuando ya se alcanza la máxima velocidad se combinan las tres fuentes para proporcionar la máxima potencia, es decir, la batería de alto voltaje, el generador y el motor de combustión interna.²⁰

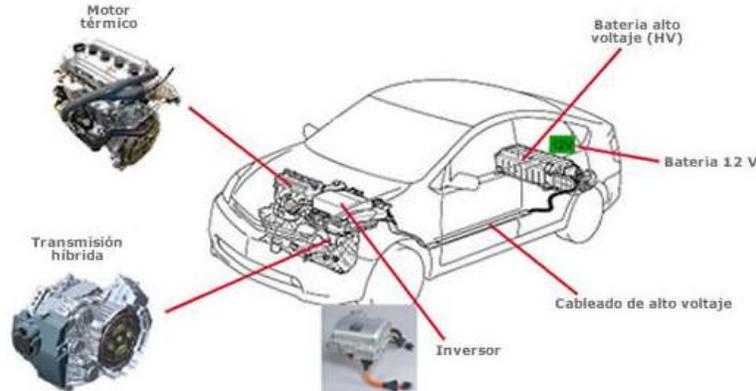
En los momentos que se acciona el pedal del freno para reducir la velocidad del vehículo el motor eléctrico controla la distribución de potencia a las ruedas y el motor de combustión

¹⁹ MOTOR FULL. EL PRIMER VEHÍCULO HÍBRIDO DEL MUNDO. [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <<http://motorfull.com/2011/04/el-primer-automovil-hibrido-del-mundo>>

²⁰ Zambrano D. (2013). *Curso de graduación: Funcionamiento y mantenimiento de vehículos híbridos*. Universidad del Azuay. Cuenca.

interna actúa como un gran generador, de manera, que se recuperan los niveles de energía de la batería de alto voltaje, finalmente, cuando se detiene el vehículo el motor de combustión interna se apaga y solo el motor eléctrico funciona, por esta razón, como resultado se alcanza tener menores emisiones de gases de escape.”²¹

Fig. 1.5 Constitución del vehículo híbrido



Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>

1.2.4. El hidrógeno

El inicio del motor de combustión interna de hidrógeno inicio en 1807 por Francois Isaac de Rivaz, sin embargo, se lo reconoció en 1970 por medio de una patente en Estados Unidos.²² Mientras que el primer vehículo con una pila de combustible de hidrógeno fue presentado por General Motors en 1967 en una furgoneta cuyo motor estaba alimentado por una pila de combustible de 32 celdas, no obstante, fue declarado muy peligroso por sus grandes tanques de hidrógeno y oxígeno que ocupaban gran parte del habitáculo de la furgoneta.²³

El hidrógeno es el elemento más ligero que no dispone de ningún átomo de carbón pesado y posee un elevado número de octano a diferencia de otros combustibles como se indica en

²¹ TOYOTA PRIUS HIBRIDO. FUNCIONAMIENTO DEL VEHÍCULO HIBRIDO. [En línea]. [28 de marzo del 2013]. <http://auto.idoneos.com/index.php/Notas_Tecnicas/Toyota_Prius_Hibrido>

²² COCHE ESPAÑOL. HISTORIA DE LOS COCHES CON MOTOR A HIDRÓGENO. [En línea]. [06 de junio del 2013]. <<http://www.automotriz.biz/coches/fuels/alternative-fuels/134081.html>>

²³ HISTORIA DEL AUTOMÓVIL A TRAVÉS DE SUS MARCAS. PILA DE COMBUSTIBLE. [En línea]. [06 de junio del 2013]. <http://losorigenes.net/curiosidades/pila_combustible/pila_combustible.html>

la tabla N°1, por lo tanto, su relación peso y energía es alta por este motivo resiste a golpeteos aun cuando se realizan combustiones con mezclas muy pobres.²⁴

Tabla 1.1 Numero de octanos de algunos combustibles.

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

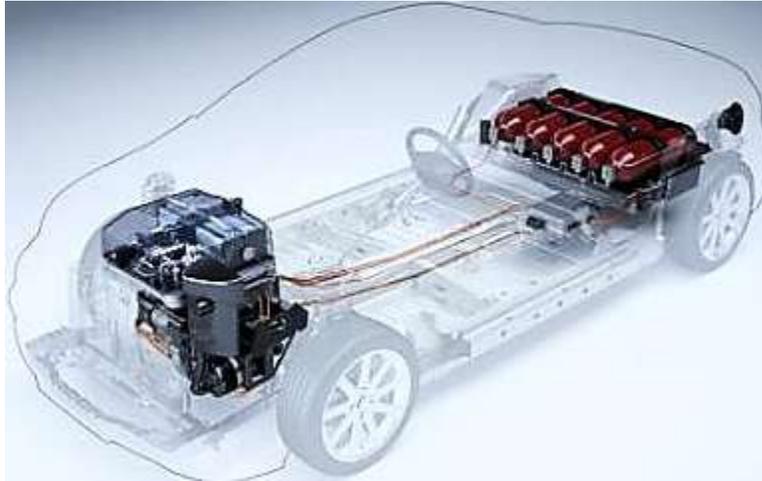
Fuente: <http://altereco21.org/productos-y-servicios/ahorradores-de-combustible/propiedades-del-hidrogeno-y-del-hho/>

Existen dos formas de utilizar al hidrógeno en un vehículo como fuente de energía, la primera forma es aplicarlo en los motores de combustión interna y la segunda forma es utilizarlo aplicando la pila o celda de combustible de hidrógeno, con la condición que el vehículo evite la emisión de gases al medio ambiente; los motores de combustión interna con hidrógeno funcionan de la misma manera que los motores a gasolina, su diferencia se debe a que desarrollan un mayor rendimiento energético por el alto número de octanos, de modo que le permite elevar la relación de compresión y su alta llama de fuego laminar, por tanto, logra conseguir un aumento del rendimiento del motor entre 25 a 30 % y en consecuencia se reduce los NOx dando como resultado la reducción de las emisiones de gases de escape.²⁵

²⁴ ALTERECO. **PROPIEDADES DEL HIDROGENO Y DEL HHO.** [En línea]. [06 de junio del 2013]. <<http://altereco21.org/productos-y-servicios/ahorradores-de-combustible/propiedades-del-hidrogeno-y-del-hho/>>

²⁵ MOTOR DE HIDROGENO. **¿QUE ES EL MOTOR DE HIDROGENO?** [En línea]. [06 de junio del 2013]. <<http://www.motordehidrogeno.net/que-es-el-motor-de-hidrogeno>>

Fig. 1.6 Vehículo con motor de hidrógeno.



Fuente: <http://www.vidadigitalradio.com/motores-hidrogeno/>

Los vehículos con pila de combustible de hidrógeno para su funcionamiento aplica los procesos químicos para producir la energía por medio de la combinación entre los iones del gas del hidrógeno y del oxígeno, por consiguiente se produce una corriente eléctrica como en una batería, por el contrario, esta nunca se descarga mientras se disponga de hidrógeno en el depósito, obteniendo como resultado ninguna emisión de gases, total silencio en su funcionamiento y grandes ventajas en comparación con los motores que utilizan combustibles fósiles²⁶.

²⁶ MOTOR DE HIDROGENO. ¿QUE ES EL MOTOR DE HIDROGENO? [En línea]. [06 de junio del 2013]. <<http://www.motordehidrogeno.net/que-es-el-motor-de-hidrogeno>>

Fig. 1.7 Vehículo con pila de combustible de hidrógeno.



Fuente: <http://www.sfgate.com/news/article/A-peek-under-the-floorboard-of-a-fuel-cell-car-2659950.php>

El hidrógeno a nivel mundial para conseguirlo necesita de algunos procesos, de tal manera puede obtenerse por medio de los combustibles fósiles ofreciendo mejores facilidades económicas en su producción a diferencia con la segunda opción que es utilizar el uso de las energías renovables, por lo tanto, a continuación se indica los procesos que se utilizan para estas dos formas:

Tabla 1.2 Métodos de obtención del Hidrógeno

FUENTES FOSILES	FUENTES RENOVABLES
Gasificación del carbón	Electrolisis (a partir de fuentes renovables)
Oxidación parcial	Ciclos termoquímicos
Reformado de vapor	Gasificación de la biomasa
Reformado autotérmico	Craqueo solar térmico
Reformado por plasma	Procesos biológicos
Electrolisis (a partir de fuentes fósiles)	Fotólisis

Fuente: Grupo SEAS, hidrógeno y pilas de combustible, Capitulo1 archivo pdf.

1.2.4.1. Ventajas y desventajas del hidrógeno.

Ventajas:

- ▲ *“El hidrógeno es un combustible que se obtiene abundantemente a través del agua*
- ▲ *El hidrógeno se puede utilizar tanto para los motores de combustión interna o para producir electricidad para los motores eléctricos.*

- ✦ *La combustión del hidrógeno con el aire es limpia, evitando así la contaminación del medio ambiente.*
- ✦ *Los productos de la combustión son en su mayoría vapores de agua, los cuales son productos no contaminantes.*
- ✦ *El hidrógeno como combustible tiene una gran eficiencia y rendimiento*
- ✦ *No muestra altos números de decibeles de ruido.*²⁷

Desventajas:

- ✦ *“Cómo no es un combustible primario entonces se incurre en un gasto para su obtención.*
- ✦ *El hidrógeno necesita un sistema de almacenamiento costoso y aún poco desarrollado*
- ✦ *Elevado precio del hidrógeno puro.*
- ✦ *Es muy inflamable cuando se libera*²⁸

1.3. La huella de carbono en las energías renovables.

La huella de carbono es un instrumento para medir las emisiones de gases de efecto invernadero de una persona, organización, países o de actividades humanas,²⁹ las condiciones que se necesita para obtener un combustible limpio que no contamine el medio ambiente conlleva a realizar una investigación, por el contrario, utiliza la propia materia prima obtenida de los procesos industriales especialmente con combustibles fósiles para poderlos fabricar, entonces como resultado encontramos que la energía limpia todavía depende de las aplicaciones de los combustibles fósiles.

Todas las emisiones de gases de efecto invernadero que impactan el cambio climático son medidas por medio de la huella de carbono en base al protocolo de Kioto, por tanto tiene la restricción de eliminar los gases como el Metano (CH_4), Hidrofluorcarburos (HFC_S), Hexafluoruro de azufre (SF_6), Perfluorocarbonos (PFC_S), Dióxido de carbono

²⁷ECOMOTRIZ. **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE, VENTAJAS Y DESVENTAJAS**. [En línea]. [05 de junio del 2013]. <<http://www.ecomotriz.com/2011/10/hidrogeno-ventajas-y-desventajas/#.Ua-sLtLs9zg>>

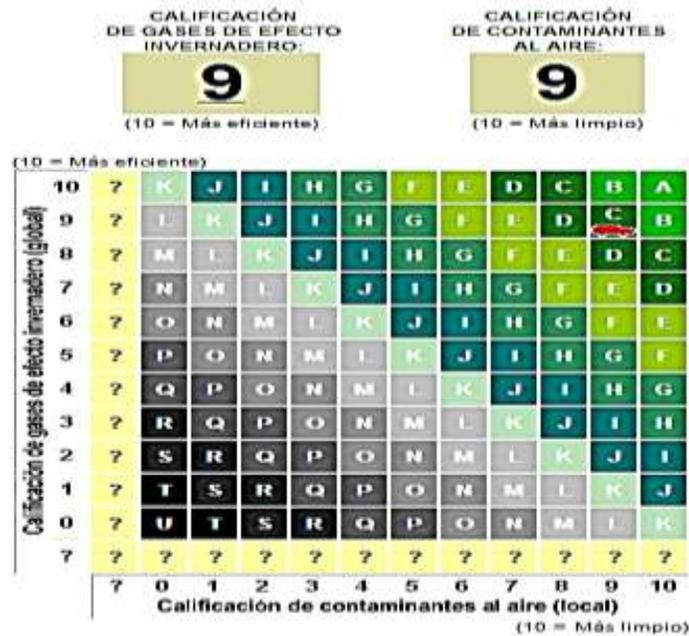
²⁸ECOMOTRIZ. **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE, VENTAJAS Y DESVENTAJAS**. [En línea]. [05 de junio del 2013]. <<http://www.ecomotriz.com/2011/10/hidrogeno-ventajas-y-desventajas/#.Ua-sLtLs9zg>>

²⁹RENOVABLES VERDES. **LA HUELLA DE CARBONO Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES**. [En línea]. [12 de junio del 2013]. <<http://www.renovablesverdes.com/la-huella-de-carbono-y-las-energias-renovables/>>

(CO₂) y el Óxido de Nitrógeno (N₂O). Por lo tanto se controla las emisiones que se producen en la producción en las diferentes etapas, de manera que se calcula las emisiones desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final obteniendo así la huella de carbono por el desarrollo del producto.³⁰ Por lo tanto, existen varias empresas por ejemplo como Carbón Footprint o Green Solutions que se encargan en realizar estos cálculos utilizando un software de apoyo considerando intervalos de contaminación.³¹

Se pueden encontrar información por medio del internet en varias páginas web los valores de la eficiencia energética y emisiones de algunos modelos de vehículos, por ejemplo en la siguiente página web (<http://www.ecovehiculos.gob.mx/>) tenemos las características y emisiones contaminantes de distintos y actuales modelos de vehículos con una calificación medida sobre diez respecto a la eficiencia de gases de efecto invernadero y de contaminantes al aire, tomando como ejemplo el informe sobre el Toyota Prius del 2013 tiene el siguiente resultado:

Fig. 1.8 Resultado de la calificación de gases del Toyota Prius 2013



Fuente: http://www.ecovehiculos.gob.mx/ecoetiquetado.php?vehiculo_id=12358

³⁰ GREEN SOLUTIONS. **HUELLA DE CARBONO**. [En línea]. [12 de junio del 2013]. <<http://www.greensolutions.cl/gshuelladecarbono.html>>

³¹ CARBONFOOTPRINT. **HUELLA DE CARBONO**. [En línea]. [12 de junio del 2013]. <<http://www.carbonfootprint.com/carbonsoftware.html>>

En la anterior tabla se presentan los resultados del Toyota Prius 2013 por medio de la página web indicada anteriormente, indicándonos que es un vehículo eficiente y limpio para el medio ambiente, por lo tanto, cumple con las normas ambientales de acuerdo a un rango designado para las emisiones de CO₂ que permiten calificar a los vehículos si es o no contaminante, a continuación se indica que el Toyota Prius está considerado poco contaminante de por medio de las siguientes tablas:

Tabla 1.3 Resultado de las emisiones contaminantes del Toyota Prius 2013

EMISIONES CONTAMINANTES	
Emisión CO₂:	114 g/km
Emisión Anual	2,205 kg
Emisión NO_x:	2 g/1000km

Fuente: http://www.ecovehiculos.gob.mx/ecoetiquetado.php?vehiculo_id=12358

Tabla 1. 4 Rango de Emisiones de g CO₂ / km

g CO₂ / km	Calificación
más de 200	Excesivamente contaminante
200-160	Muy contaminante
140-160	Bastante contaminante
120-140	Contaminante
100-120	Poco contaminante
Menos de 100 gr/km	Los menos contaminantes

Fuente: <http://www.ecologistasenaccion.org/articulo16233.html>

Por medio de algunos estudios y análisis la huella de carbono de un vehículo tendría que producir semanalmente menor a 450 Kg de CO₂,³² por lo tanto, las normas Europeas han tomado de referencia a las emisiones de gases de los vehículos vendidos durante el año 2012 para indicar que los vehículos en el 2020 tendrán que emitir 95 gr/km de CO₂ para

³² HUELLA DE CARBONO. COMO REDUCIR LA HUELLA DE CARBONO. [En línea]. [31 de marzo del 2013]. <<http://www.huellacarbono.es/apartado/general/reducir-huella-co2.html>>

conseguir el siguiente resultado de 128 gr/km en España y de 132,3 gr/km de CO₂ en toda Europa.³³

1.3.1. Impacto de los biocombustibles

El etanol o alcohol etílico y otros biocombustibles se obtienen de forma industrial a partir de la fermentación de los carbohidratos presentes en las plantas, para ello se necesitan de grandes cantidades de cultivos lo que significa realizar una deforestación de varias superficies, *“algunos estudios indican que puede ocasionar el aumento del calentamiento global, debido que los bosques y muchos otros ecosistemas naturales fijan el dióxido de carbono por medio de la fotosíntesis y al convertirlos en tierras de cultivo se libera a la atmósfera casi 420 veces más CO₂ en comparación con los biocombustibles.”*³⁴ Además, trae como resultados desfavorables la incidencia directa sobre el sector alimenticio debido a las zonas utilizadas para los cultivos de biocombustibles que provoca una competencia entre productos destinados a la alimentación y la producción de biodiesel, por lo tanto afecta en el costo de los productos alimenticios.³⁵

El biogás produce menos energía por unidad de volumen, tiene una dificultad para almacenarlo y un peligro al transportarlo en grandes cantidades a sí mismo es muy peligroso por su capacidad de inflamarse fácilmente, en consecuencia su mayor impacto es la construcción de la planta debido a requiere de un amplio espacio abierto para ensamblar varios tanques de almacenamiento y otro para las grandes cantidades de basura o acumulación de la materia orgánica de los animales, también se considera las distancias que se deben recorrer para transportar sus materiales de construcción y toda la materia orgánica diariamente, además un control para evitar malos olores que dañan el medio ambiente y la salud.³⁶

La recolección de la materia orgánica de los animales en granjas para la obtención del biogás tiene una consecuencia recurrente en los propios sectores donde están ubicados los

³³ CIRCULA SEGURO. **MOVILIDAD SOSTENIBLE**. [En línea]. [31 de marzo del 2013]. <<http://www.circulaseguro.com/en-el-2020-los-vehiculos-deberan-emitar-95-gr-km-de-co2/>>

³⁴ UNAM. **LOS BIOCMBUSTIBLES**. [En línea]. [3 de junio del 2013]. <<http://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/123/los-biocombustibles>>

³⁵ INDUSTRIA Y SERVICIOS. **EL IMPACTO MEDIO AMBIENTAL QUE PRODUCEN LOS BIOCMBUSTIBLES**. [En línea]. [31 de marzo del 2013]. <<http://blogs.creamoselfuturo.com/industria-y-servicios/2008/05/05/el-impacto-medio-ambiental-que-producen-los-biocombustibles/>>

³⁶ LÓPEZ LUGONES BÁRBARO. **ANÁLISIS DE BIODIGESTORES**. [En línea]. [03 de junio del 2013]. <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia22/html/articulo04.htm>>

animales, por lo tanto afecta a las poblaciones aledañas y la acumulación de sus residuos produce gases como el dióxido de carbono y el metano ocasiona algunos riesgos contra la salud y la vida propia de los animales.³⁷

1.3.2. Impacto de la energía solar

La celda fotovoltaica su principal material para construirlo es el silicio, sin embargo, a pesar que se encuentra distribuido en la corteza terrestre no está completamente puro en la naturaleza de manera que está en forma de cuarzo cuarcita, arena sílice, ágata, ópalo, vidrio volcánico etc. Por lo tanto, para su obtención atraviesa por procesos químicos que le ayudan a su purificación obteniendo un silicio semiconductor, luego necesita pasar por maquinas industriales donde se lo funde y cristaliza dando como resultado un bloque de silicio monocristalino o policristalino e inmediatamente son cortados en capas de un espesor aproximadamente 0.3mm para recién ser entregadas a diferentes empresas por unidades para el ensamble y construcción del panel solar según sus condiciones de funcionamiento.³⁸

Lo más importante a diferencia con los otros procesos de otras materias primas especialmente como la fabricación del acero, cobre y aluminio que a menudo se utilizan como materia prima tiene como consecuencia problemas ambientales por sus emisiones, por lo tanto, en la elaboración de los paneles solares el efecto principal se encuentra en el proceso industrial debido a la producción de polvos y compuestos fluorados que son los únicos gases que participan en el efecto invernadero de origen natural provocado por la mano del hombre.³⁹ Cuando se aprovecha la energía solar no se genera contaminación directa por sustancias de las células fotovoltaicas, pero los sistemas colectores contienen a menudo sustancias para la transmisión térmica que pueden producir contaminaciones si se mezclan con el medio ambiente.⁴⁰

³⁷ MI CARTAGO. **IMPACTO AMBIENTAL DE CHANCHERAS**. [En línea]. [03 de junio del 2013]. <<http://www.micartago.com/index.php?news=3425>>

³⁸ TAU SOLAR. **ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y MEDIO AMBIENTE**. [En línea]. [2 de abril del 2013]. <http://tausolar.solarstromag.net/upload/v12_file_d33_5.pdf>

³⁹ ECOLOGISMO. **GASES DEL EFECTO INVERNADERO, GASES FLUORADOS**. [En línea]. [03 de junio del 2013]. <<http://www.ecologismo.com/2008/08/21/gases-del-efecto-invernadero-gases-fluorados/>>

⁴⁰ TEDEL. **IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA**. [En línea]. [03 de junio del 2013]. <http://tedel.org/nuestroambiente/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=>

1.3.3. Impacto de los vehículos eléctricos e híbridos

El impacto ambiental que encontramos en los vehículos eléctricos e híbridos es debido al uso de las baterías a litio, dado a que presentan inconvenientes para su obtención, elaboración, ensamble y comercialización de los mismos influyendo un impacto contra el medio ambiente. La principal consecuencia es que el litio no lo encontramos en un estado puro en la naturaleza, por lo tanto, trae consecuencias en su proceso de obtención y producción ya que primero se lo extrae de una mina y luego es transportado hasta llegar a una fábrica para su purificación y construcción utilizando diferentes procesos mecánicos, electrónicos y químicos, para luego de ahí diseñar las láminas para formar el pack de baterías que son enviadas directo a la empresa principal de ensamble de cada fabricante de vehículo donde son instaladas en los diferentes modelos y ser comercializados en todo el mundo.⁴¹

La nueva tecnología en los vehículos eléctricos e híbridos debido a su desventaja ha impuesto cambiar el tipo de batería, por esta razón, se fabrican ahora las baterías de níquel hidruro metálico (NiMH) que ofrece una duración de 242 mil kilómetros⁴² *“contienen gran cantidad de níquel y contaminan por su gran toxicidad, no así las compuestas por Ion-Litio que no perjudican al medio ambiente, sin embargo cada batería contiene tres kilos de litio, no obstante, las reservas de litio se encuentran limitadas en el mundo entre 14 y 17 millones de toneladas.”*⁴³

1.3.4. Impacto del Hidrógeno

Existen varios tipos de Celdas de Combustible por lo tanto según el tipo de celda varían sus materiales pero principalmente utilizan placas de electrodo bipolar que se fabrican generalmente de nanotubos de metal, de níquel o de carbón, y están cubiertas por un catalizador fabricado de platino o paladio que permiten conseguir una eficacia más alta y el electrolito en este caso es una membrana. Los impactos ambientales directos para obtener

⁴¹ UNIVISION.COM. **HÍBRIDOS & ELÉCTRICOS**. [En línea]. [31 de marzo del 2013]. <<http://autos.univision.com/hibridos-electricos/article/2011-03-09/los-hibridos-contaminan-mas>>

⁴² AUTOS HÍBRIDOS. **EL IMPACTO DE LAS BATERÍAS**. [En línea]. [31 de marzo del 2013]. <<http://autoshibridos-tarea.blogspot.com/2012/05/el-impacto-de-las-baterias.html>>

⁴³ MOTOR FULL. **LA DURA INCERTIDUMBRE DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL FUTURO**. [En línea]. [31 de marzo del 2013]. <<http://motorfull.com/2010/09/la-dura-incertidumbre-de-los-vehiculos-electricos-en-el-futuro>>

el hidrógeno utilizando combustibles fósiles a través de procesos industriales producen muchas toneladas de CO₂.⁴⁴

La organización de investigación medio ambiental World Watch Institute indica que la gran cantidad de producción de hidrógeno se obtiene mediante el uso de otros combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y otros métodos de manera que dificulta la implementación de esta tecnología en el mercado mundial,⁴⁵ además según un artículo de los Científicos del Instituto Tecnológico de Massachusetts *“el hidrógeno al ser un gas ligero, alcanza rápidamente la atmósfera triplicando el número de moléculas presentes y reaccionan con el oxígeno para formar agua de forma que a esa altura la multiplicación de las moléculas de agua perturban la química del ozono provocando un aumento del agujero ya formado en la altura de los polos dando una pérdida adicional del 8% de la capa de ozono.”*⁴⁶

Otro problema que surge con el transporte del hidrógeno el mismo que se puede realizar de dos formas, la primera es en forma de estado gaseoso, sin embargo, necesita un alto nivel de concentración para llegar a ser similar a la gasolina actual, en estas condiciones el hidrógeno es volátil y debido a su alta presión de almacenaje es muy peligroso a los golpes. La segunda forma es líquida, el hidrógeno puede adquirir este estado pero a temperaturas excesivamente bajas, por debajo de los 200°C, lo que es peor, el hidrógeno líquido disuelto en la vía ocasionaría un accidente fatal.⁴⁷

⁴⁴GUIOTECA. **HIDROGENO: EL COMBUSTIBLE DEL FUTURO EN LOS AUTOS.** [En línea]. [4 de junio del 2013]. <<http://www.guioteca.com/autos/hidrogeno-el-combustible-del-futuro-en-los-autos/>>

⁴⁵ MAGAZINE. **PILA DE HIDROGENO NUEVA TECNOLOGÍA PARA LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.** [En línea]. [4 de junio del 2013]. <<http://www.ibecmagazine.com/TECNOLOG%C3%8DAGADGETS/TabId/459/ArtMID/1165/ArticleID/83/La-Pila-de-hidr243geno-nueva-tecnolog237a-para-la-contaminaci243n-ambiental.aspx>>

⁴⁶ TENDENCIAS SOCIALES. **EL HIDROGENO PUEDE SER MAS DAÑINO PARA EL MEDIO AMBIENTE QUE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES.** [En línea]. [4 de junio del 2013]. <http://www.tendencias21.net/El-hidrogeno-puede-ser-mas-danino-para-el-medio-ambiente-que-los-combustibles-fosiles_a187.html>

⁴⁷GUIOTECA. **HIDROGENO: EL COMBUSTIBLE DEL FUTURO EN LOS AUTOS.** [En línea]. [4 de junio del 2013]. <<http://www.guioteca.com/autos/hidrogeno-el-combustible-del-futuro-en-los-autos/>>

CAPITULO II

DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO Y CON PANELES SOLARES EN LOS VEHÍCULOS.

Existen diferentes métodos para la obtención del hidrógeno, de manera que en este capítulo solo se analizara el método de la electrolisis del agua con la condición de obtener en forma de gas el hidrógeno, por este motivo, para conseguir la descomposición de la molécula del agua se necesita utilizar una fuente de energía, por lo tanto, se analizara la energía proveniente del sol debido a que es una fuente limpia y renovable para finalmente analizar la energía del hidrógeno obtenido del resultado anterior proceso, utilizando el funcionamiento de la pila de combustible de hidrógeno.

El análisis estará en función de los procesos químicos, principios de funcionamiento y las características de construcción de todos los elementos involucrados para realizar la aplicación de este método, en consecuencia, como resultado podrá aplicarse la energía para el movimiento de un motor eléctrico y de esta manera utilizarlo en el vehículo para su funcionamiento.

Además en este capítulo no se pretende que se constituya en un tratado de termodinámica, por lo tanto no se hacen deducciones innecesarias, por lo general la termodinámica se relaciona con las diversas formas de energía de los distintos procesos tales como el trabajo, el calor y la energía por lo tanto algunos conceptos y ecuaciones el lector deducirlos.

2.1.La electrolisis

La electrolisis es un proceso donde la energía eléctrica cambia por medio de un efecto electroquímico a energía química, por lo tanto, consiste en aplicar una energía eléctrica a

través de unos electrodos en una solución acuosa o sales disueltas que reaccionan produciéndose una descomposición química de la solución.⁴⁸

2.1.1. La Electrolisis del agua

La electrolisis del agua es uno de los procesos más limpios para la obtención del hidrógeno, se realiza por medio de la disociación de la molécula de agua con un aporte externo de energía eléctrica para obtener en forma de gas al hidrógeno y oxígeno, por este motivo, se necesita de una cierta cantidad de energía que puede ser calorífica o eléctrica, por lo tanto, se realiza a 25°C con una aportación de 285,83 MJ/Kmol, sin embargo, solo es necesario aportar con 237,19 MJ/Kmol en forma de trabajo eléctrico ya que la diferencia la recibe en forma de calor. Los componentes necesarios para llevar a cabo la electrolisis es una celda electrolítica constituida por dos electrodos, ánodo y cátodo y un electrolito para facilitar la migración de los iones.⁴⁹

Fig. 2.1 Proceso de Electrolisis



Fuente: Elaboración propia del autor

2.1.2. Reacción química del agua.

“En el electrodo negativo se crea una carga negativa por la conexión a la batería externa provocando que los electrones de la sustancia se dirijan al extremo del cátodo, la molécula del agua en ese momento se rompe y se descompone en un ión H^+ (es un átomo de hidrógeno pero sin su electrón) y un ión de hidróxido OH^- , de forma que el suceso de la reacción de la molécula del agua en el cátodo se la describe así:

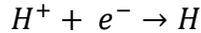


No sucede una separación de átomos con carga neutra, por consecuencia que el átomo de oxígeno atrae con más fuerza el electrón del átomo de hidrógeno, por estas razones el átomo de oxígeno es más electronegativo que el átomo del hidrógeno, de manera que el ión

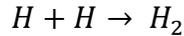
⁴⁸LENNTech. LA ELECTROLISIS. [En línea]. [4 de junio del 2013]. <<http://www.lenntech.es/electrolisis.htm>>

⁴⁹AGUER MARIO, MIRANDA ANGEL. EL HIDRÓGENO FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO, EDICION SEGUNDA. EDITORIAL. EDITORIAL DIAZ DE SANTOS 2007, (.pp. 94)

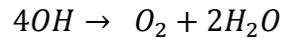
de hidrógeno es un simple protón libre de tomar un electrón del cátodo de forma que se convierte en un átomo de hidrógeno neutral descrito de la siguiente manera:



Este átomo de hidrógeno neutral se une con otro átomo igual de hidrógeno generado por el mismo suceso y el resultado de esta molécula asciende a la superficie en forma de hidrógeno y se describe de la siguiente forma:



El hidróxido cargado negativamente se desplaza hasta el ánodo y el momento que llega se desprende del electrón que había tomado del átomo de hidrógeno, entonces el ión de hidróxido se combina con otros tres iones de hidróxido generados por el mismo proceso, formando una molécula de oxígeno y dos moléculas de agua que se describe de la siguiente forma:



La molécula de oxígeno que se genera es muy estable, al igual que el hidrógeno que luego ascienden hasta la superficie en forma de gas".⁵⁰

2.1.3. Voltaje para la electrolisis del agua.

La descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso, no se produce de manera espontánea, se necesita de una energía que rompa la molécula y está determinada por la relación del cambio correspondiente de energía libre de Gibbs (ΔG) en condiciones estándares y el trabajo eléctrico.⁵¹

2.1.3.1. La energía libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs es la energía liberada por un sistema para realizar un trabajo útil a presión constante, esta se representa con el símbolo G . La variación de la energía libre (ΔG), es una función de estado y tiene unidades de energía, si en una reacción química

⁵⁰ PINO PRIEGO ANTONIO. TESIS: "APROVECHAMIENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES NO INTEGRABLES EN LA RED ELÉCTRICA. EL CASO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO". UNIVERSIDAD DE SEVILLA, OCTUBRE 2009. [en línea]. [26 de junio del 2013]. <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/%C3%8Dndice+General.pdf>>

⁵¹ Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 95).

se libera trabajo útil sin importar lo que ocurra en el universo la ΔG es negativo y por lo tanto será una reacción espontánea, de esta manera se consigue la siguiente ecuación:⁵²

Ecuación.	Nomenclatura
$\Delta G = \Delta H + T\Delta S$ (2.1)	ΔG : Variación de la energía libre de Gibbs ΔH : Variación de la entalpia T: Temperatura ΔS : Variación de la entropía

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg. 68]

2.1.3.2. Trabajo eléctrico

El trabajo eléctrico está relacionado con el potencial eléctrico de esta manera, una carga ejercerá una fuerza sobre cualquier otra carga y la energía potencial surge del conjunto de cargas, por lo tanto, el trabajo eléctrico es la fuerza que produce el movimiento de cargas y está determinado por la siguiente ecuación:

Ecuación.	Nomenclatura
$W_{elec} = n \times F \times \mathcal{E}$ (2.2)	W_{elec} : Trabajo eléctrico n: el número de cargas eléctricas intercambiadas en la reacción electroquímica F: Constante de Faraday. 96487 C \mathcal{E} : potencial eléctrico

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg. 95]

Para el análisis de la electrolisis del agua se analizan los procesos termodinámicos necesarios para descomponer su molécula, de manera que, se obtiene como resultado la relación de la energía libre de Gibbs y el trabajo eléctrico, luego por medio de los procesos matemáticos se obtiene como resultado la ecuación de la energía proveniente de la fuente que suministra la corriente eléctrica como se indica a continuación:⁵³

⁵² GARCIA RAQUEL. **ENERGÍA LIBRE Y ESPONTANEIDAD**. [En línea]. [9 de julio del 2013]. <<http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/quimica/infocab/unidad118.html>>

⁵³ Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 95).

Ecuación.	Nomenclatura
$\varepsilon = \frac{-\Delta G}{n \times F} \quad (2.3)$	ΔG : Variación de la energía libre de Gibbs ε : potencial eléctrico n: el número de cargas eléctricas intercambiadas en la reacción electroquímica F: Constante de Faraday. 96487 C

Fuente: Relación de las ecuaciones 2.1 y 2.3

2.1.3.3. Determinación del voltaje para la electrolisis del agua

La descomposición del agua a 25 °C requiere de una aportación de 285,83 MJ/Kmol estos valores nos vienen dados en tablas de entalpia y entropía de formación como se indica en la siguiente tabla

Tabla 2.1 Entropías molares y entalpias de diferentes sustancias.

SUSTANCIA	ENTROPIA MOLAR (S) $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol} \cdot \text{K}}\right)$	ENTALPIA DE FORMACION (H) $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{Kmol}}\right)$
H_2	130.6	0
O_2	205.0	0
N_2	191.5	0
H_2O (l)	69.95	-285.83
H_2O (g)	188.72	-241.82

Fuente: El Hidrógeno Fundamento de un futuro equilibrado. [pp. 57]

Sin embargo solo será necesario aportar con 237,187 MJ/Kmol por medio de la variación de la energía libre de Gibbs en forma de trabajo eléctrico, la diferencia la recibe el sistema en forma de calor, aplicando la ecuación (2.4) y remplazando los valores tenemos:

$$\varepsilon = \frac{-237,187}{2 \times 96,487}$$

$$\varepsilon = -1.23 \text{ v}$$

El signo menos hace referencia a un proceso reversible, utilizando una densidad de corriente entre 0.1 y 0.5 A/cm².⁵⁴ En la práctica existe el aumento de la entropía de manera que es necesario suministrar el denominado “potencial térmico”, por este motivo,

⁵⁴Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 96).

recopilando de tablas tiene un valor de 0,225 V y al sumar los dos términos, se obtiene el voltaje mínimo teórico del agua en condiciones estándar es de 1.48 V, por lo tanto, por debajo de ese voltaje no se produce la descomposición del agua y por eso para que se produzca la electrolisis del agua es necesario aplicar un voltaje superior al teórico que dependerá de múltiples factores como pueden ser: material de los electrodos, temperatura de celda, etc.⁵⁵

2.1.4. Cantidad de hidrógeno obtenido

Para determinar la cantidad de hidrógeno producido por la electrolisis se aplica las leyes de Faraday que indica lo siguiente: “La masa de una sustancia producida en un electrodo durante la electrólisis es proporcional al número de moles de electrones transferidos en ese electrodo”, entonces:

- **Primera ley:** La masa de un elemento depositada en un electrón es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución del electrolito
- **Segunda ley:** Las masas de elementos que se depositan en los electrodos son proporcionales a los equivalentes químicos.⁵⁶

De manera que la ecuación final de Faraday se puede escribir de la siguiente forma:

Ecuación	Nomenclatura
$m = \frac{M_{at} \times t}{n^{\circ}e^{-} \times 96500} \quad (2.4)$	m= Masa en gramos M_{at} = Masa atómica I= Corriente Amperios t = Tiempo segundos $n^{\circ}e^{-}$ = el número de electrones involucrados en la reacción. 2 para el Hidrógeno y 4 para el oxígeno.

Fuente: Diseño y construcción de un generador prototipo de energía mediante paneles solares –hidrógeno celda de combustible [pg. 32].

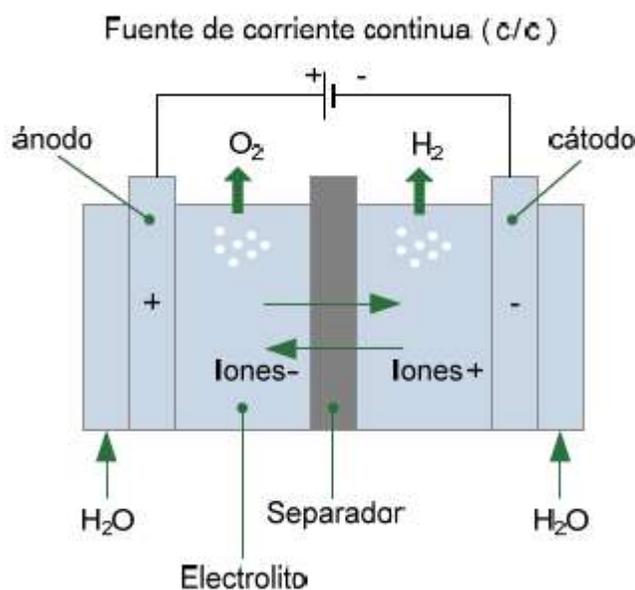
⁵⁵ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

⁵⁶ FISICANET. **QUÍMICA ELECTROQUÍMICA**. [En línea]. [9 de julio del 2013]. <http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07_electrolisis.php#.UdxxfTvs9zg>

2.1.5. Componentes para la electrolisis

La descomposición electroquímica del agua o electrólisis se usa extensivamente para la producción industrial de grandes volúmenes de hidrógeno, por lo tanto, no se utilizan dispositivos que requieren partes móviles y son bastante silenciosos, sin embargo, el principal problema de la obtención de hidrógeno a partir de la descomposición electroquímica del agua es el alto costo energético, así como, utilizar fuentes primarias accesibles de bajo costo y preferiblemente no fósil, estos componentes que intervienen se indican en la siguiente imagen.

Fig. 2.2 Componentes del electrolizador



Fuente: SEAS GRUPO SANVALERO, Hidrógeno y pilas de combustible pdf, [pp. 24]

2.1.5.1. Electrolizador

El electrolizador es todo el conjunto de la producción del hidrógeno, realiza esta actividad por medio de la conexión a la fuente de energía externa a los dos electrodos para producir la electrolisis, esta manera, se descompone el agua teniendo conectado dos salidas para el flujo del gas del hidrógeno y del oxígeno, además, son dispositivos que requieren poco mantenimiento.⁵⁷

⁵⁷ QUIMINET.COM. **ELECTROLIZADORES**. [En línea]. [9 de julio del 2013]. <<http://www.quiminet.com/articulos/los-diferentes-tipos-de-electrolizadores-y-sus-caracteristicas-2704580.htm>>

2.1.5.2. Electrodo

En los electrodos se presentan las moléculas de hidrógeno y oxígeno, los electrodos no influyen en la reacción solo permiten la circulación de la corriente, el hidrógeno se da en el cátodo construido por un material de níquel y el oxígeno se presenta en el ánodo habitualmente de un mineral de perovskitas por tener un comportamiento magnético y eléctrico.⁵⁸

2.1.5.3. Electrolito

El electrolito, es la sustancia dentro del electrolizador, agua no se utiliza en forma pura debido a no ser una buena conductora iónica y por ello resulta variar su pH mediante la adición de un ácido o bases para el aumento de concentración de protones o grupos hidroxilo respectivamente y la movilidad iónica aumente. Se utiliza un medio alcalino debido a que el ácido trae problemas de corrosión y en general las bases que se utilizan son hidróxido de sodio NaOH o de potasio KOH, el valor de conductividad eléctrica es máximo cuando la concentración de KOH es cerca del 28% por lo que la mayoría de electrolizadores alcalinos contienen concentraciones del 25 al 35%.⁵⁹ Cuando se añade H_2SO_4 al agua, se convierte en un electrolito de solución de ácido sulfúrico o de una sal tal como $NaNO_3$ ⁶⁰

2.2. Panel solar

El panel solar o también conocido como celdas fotovoltaicas se utilizan para recibir la radiación solar y producir electricidad de una manera limpia y no contaminante.⁶¹ Las primeras investigaciones para el uso de la energía solar fotovoltaica se desarrollaron con miras a aplicaciones de naves espaciales por tener una larga vida, poco peso y por carecer de mantenimiento. físicamente, el efecto fotovoltaico está ligado con la teoría del diodo para ello se debe aplicar el funcionamiento de un semiconductor, el mismo que se encuentra clasificado de algunos tipos de sustancias que encontramos en la naturaleza y para una celda foto voltaica el más utilizado es el silicio⁶²

⁵⁸Llorca, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético*. Upc. (pp. 47)

⁵⁹Llorca, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético*. Upc. (pp.47-48)

⁶⁰ EDUCAMIX. **ÁCIDOS Y BASES**. [En línea]. [11 de julio del 2013]. <http://platea.pntic.mec.es/pmartil/educacion/3_eso_materiales/b_v/conceptos/conceptos_bloque_5_5.htm>

⁶¹SOLICLIMA.ES. **MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. [En línea]. [17 de julio del 2013].<<http://www.modulosfotovoltaicos.com/>>

⁶² González, G. I. (2008). *Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios*. Paraninfo. (pp. 200)

2.2.1. Principio de Funcionamiento

La formación del cristal semiconductor por medio del silicio dado por su designación química en la tabla periódica se encuentra en la cuarta columna lo que indica tener en su capa externa cuatro electrones, para un elemento poseer una configuración estable necesita tener ocho electrones en su última capa, por lo tanto el silicio se unirá con otros átomos compartiendo estos electrones (enlace covalente), para obtener los ocho electrones en su última capa y así formar la capa cristalina eléctricamente neutra. El momento que el electrón alcanza una energía suficiente abandona la corteza del átomo y deja un vacío llamado hueco, de manera que se identifica a los electrones con cargas positivas y a los huecos con cargas positivas.⁶³

Si la sustancia que se los introduce, tiene la capacidad de ceder electrones es un semiconductor tipo N, si los átomos de la sustancia tiene carencia de electrones, tendrá cargas positivas libres este es un semiconductor es tipo P.⁶⁴

Cuando el semiconductor, está aislado están en equilibrio iónico y al unirlo con otro se crea electrones y otros huecos, el desplazamiento de cargas acumula cargas positivas en la zona N y negativas en la zona P consiguiendo una región polarizada la cual va tener un campo magnético llegando a un equilibrio formando una zona de deflexión (zona de unión PN) creando los pares de iones con cargas opuestas en lados de la unión.⁶⁵

2.2.2. Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas

Son dos semiconductores unidos de silicio de tipo n y p que tienen en sus bases un contacto metálico que está conectado mediante cables para cerrar el circuito, cuando la luz solar incide en forma de fotones sobre los semiconductores, provoca una energía en los electrones de valencia para que se rompan los enlaces de manera que por cada electrón parece un hueco, cuando se generan pares de electrones y huecos, los mismos que circulan a hasta su unión en donde son separados por efecto de un campo eléctrico, provocando que se de electrones en la capa N y huecos a la capa P creándose así una diferencia de potencial entre las dos superficies, dando como resultado un voltaje eléctrico generando una corriente eléctrica de la parte positiva y negativa.⁶⁶

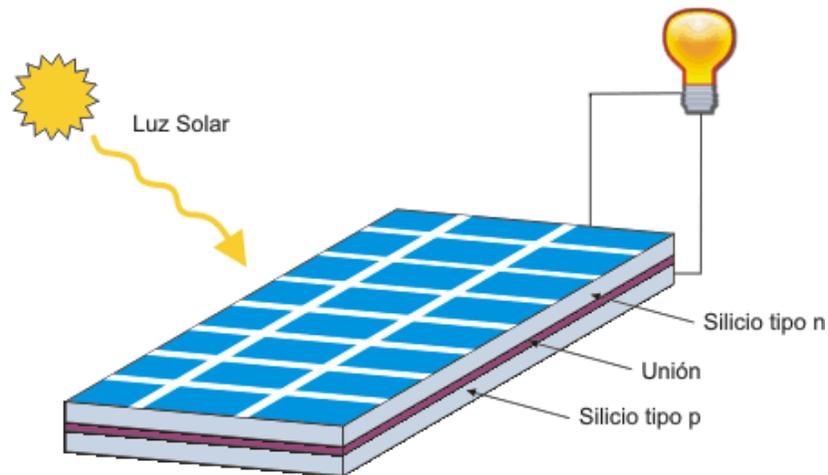
⁶³ González, G. I. (2008). *Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios*. Paraninfo. (pp. 200).

⁶⁴ Sánchez, A.M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa. (pp. 32-34)

⁶⁵ Sánchez, A.M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa. (pp. 35)

⁶⁶ Sánchez, A.M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa. (pp. 37-38).

Fig. 2.3 Panel solar.



Fuente: TSKAN, Funcionamiento del panel solar

La unión de las celdas fotovoltaicas mediante alambres previamente estañados soldados con solda a temperatura de 200 ° C, están conectados en serie es decir la cara negativa de una se suelda con la cara positiva de la siguiente celda, de esta manera se forma el Panel Solar.⁶⁷

Fig. 2.4 Conexión en serie de las celdas fotovoltaicas.



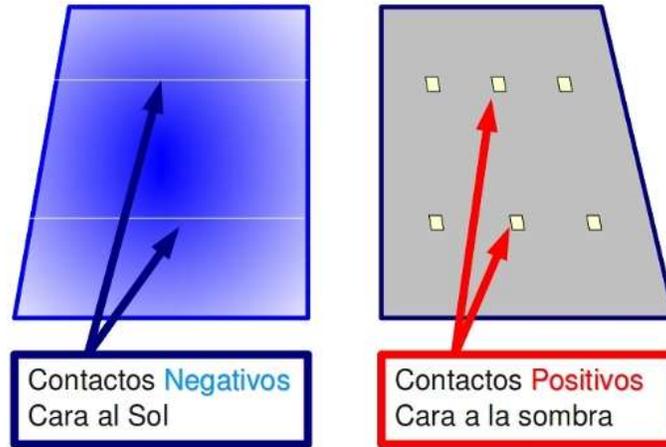
Fuente: <http://eliseosebastian.com/conexion-de-celdas-solares-en-serie-para-paneles-fotovoltaicos-en-casa/>

Para construir un panel solar que proporcione la energía necesaria, se identifica la parte positiva y negativa de las celdas fotovoltaicas, la cara de contacto negativo es aquella que está unido por un camino conductor soldable y debe recibir los rayos del sol y la cara de contacto positivo son puntos de material soldable y la que permanece a la sombra, además hay que tener cuidado con color blanco de los polos es un compuesto de plata el cual no debe ser raspado ni removido.⁶⁸

⁶⁷ WER. **PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO.** [En línea]. [6 de mayo del 2013].
<<http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/contruir-panel-solar-fotovoltaico-parte-1/>>

⁶⁸ WER. **CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL SOLAR.** [En línea]. [6 de mayo del 2013].
<<http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/contruir-panel-solar-fotovoltaico-parte-1/>>

Fig. 2.5 Posición del lado positivo y negativo de una celda fotovoltaica.



Fuente: <http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/contruir-panel-solar-fotovoltaico-parte-1/>

Cada celda fotovoltaica produce una energía eléctrica esto viene especificado dentro de sus características dadas por el fabricante, por ejemplo una celda generan 0.5 volts y 3.3 amperes y se quiere construir un panel fotovoltaico de 60 watts, para determinar el número de celdas y poder construir el panel solar necesario que entregue esa potencia utilizamos la siguientes formulas.⁶⁹

ECUACION	NOMECLATURA
<p>Potencia de la celda fotovoltaica</p> $P = V \times I \quad (2.5)$	<p>P: Potencia V: Voltaje I: Intensidad de corriente</p>

Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios [pg.202]

ECUACION	NOMECLATURA
<p>Numero de celdas</p> $N_c = \frac{P_T}{P} \quad (2.6)$	<p>N_c: Numero de celdas P_T: Potencia total P: Potencia de la celda fotovoltaica</p>

Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios [pg.202]

2.2.3. Tipo de conexión de los paneles solares.

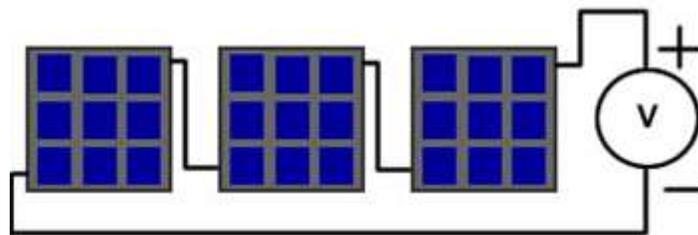
Para mejorar el rendimiento y optimizar el espacio, se puede utilizar las conexiones básicas de la electricidad en los paneles solares de manera que encontramos las más comunes conexiones que son serie, paralelo y mixto.

⁶⁹CELDAS SOLARES Y SU USO. CELDAS SOLARES PARA EL DISEÑO DE PANELES FOTOVOLTAICOS. [En línea]. [4 de mayo del 2013]. <<http://celdassolares.net/>>

2.2.3.1. Conexión en serie de los paneles solares

Cuando se encuentra conectado en serie los paneles solares la tensión resultante es la suma de todos los paneles, mientras que la intensidad de corriente es la misma proporcionada solo por uno de ellos, para prevenir que el rendimiento caiga si existiera una falla entre ellos, se coloca un diodo de bloqueo "puentean" ese panel para que la corriente siga su camino, esta conexión se realiza desde el positivo de primer panel al negativo del segundo panel y así sucesivamente como se indica en la figura.⁷⁰

Fig. 2.6 Conexión en serie de los paneles solares

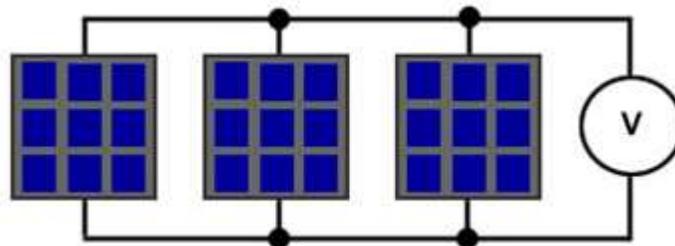


Fuente: <http://solete.nichese.com/conexion.html>

2.2.3.2. Conexión en paralelo de los paneles solares

Cuando se encuentran conectado en paralelo los paneles solares la tensión es igual a la proporcionada por uno solo de ellos, mientras que la intensidad de corriente es igual a la suma de las intensidades de cada panel solar, es la unión del positivo del primer panel con el positivo del segundo panel solar y los negativos de la misma manera y así sucesivamente hasta alcanzar los valores deseados.⁷¹

Fig. 2.7 Conexión en serie de los paneles solares



Fuente: <http://solete.nichese.com/conexion.html>

⁷⁰Sánchez, A.M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa. (pp. 64-65)

⁷¹Sánchez, A.M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa. (pp. 65)

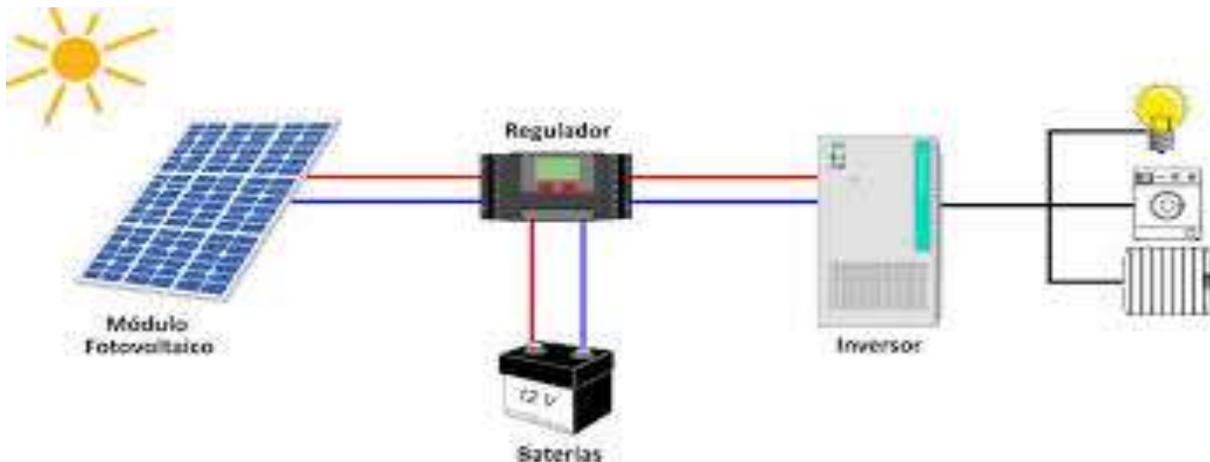
2.2.3.3. Conexión serie-paralelo de los paneles solares

Esta conexión es la combinación de las dos anteriores y se realiza para satisfacer las necesidades de tensión y voltaje de los paneles solares.⁷²

2.2.4. Componentes del sistema fotovoltaico.

La energía que el panel solar recibe del sol es acumulada en una batería fotovoltaica, conectada por un regulador de voltaje que controla sus ciclos de carga y la protege cuando está cargada completamente y evita su descarga, luego viene conectado a un inversor de voltaje el mismo que rectifica la corriente para mantenerla continua para el funcionamiento de los equipos.⁷³

Fig. 2.8 Componentes para una instalación con paneles solares



Fuente: <http://panelessolaresmexico.com.mx/servicios/paneles-solares/>

2.3. Pila de combustible de hidrógeno

La pila de combustible de hidrógeno es un convertidor electroquímico directo de energía, para conseguir grandes tensiones deben unirse varias celdas en serie, denominado stack y para todo el conjunto de elementos integrados con el stack se le conoce como la pila de combustible.⁷⁴

El desarrollo de la primera pila de combustible de hidrógeno fue descubierta por el científico inglés William Grove en 1839, surgió de pura casualidad ya que cuando hacia

⁷²Sánchez, A.M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa. (pp. 66).

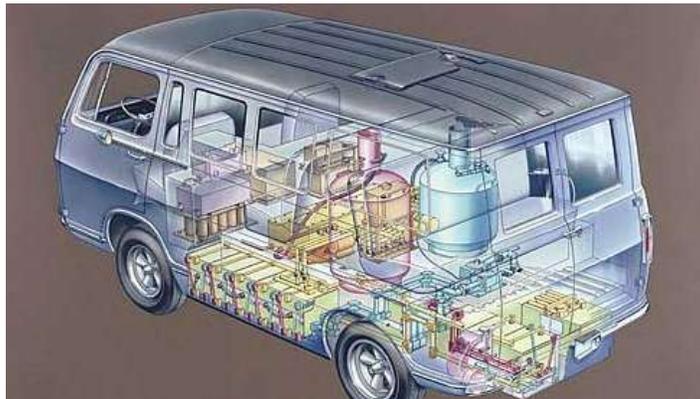
⁷³ NICHE. COMPONENTES FOTOVOLTAICOS. [En línea]. [18 de junio del 2013]. <<http://solete.nichese.com/componentes.html>>

⁷⁴Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 105)

experimentos en una cuba electrolítica al desconectar la batería observo que una corriente eléctrica que circulaba en sentido opuesto y al tiempo se consumía hidrógeno y oxígeno, quizá fue un descubrimiento prematuro porque los inconvenientes que produjeron en el experimento le indujeron a pensar que aquella célula no era práctica. Luego de muchos años después un científico inglés Francis T. Bacon a mediados del XX desarrollo la primera célula eficaz de combustible, utilizando como reactivos hidrógeno y aire que destaca en el programa espacial americano y utilizado en la actualidad en los transportadores espaciales.⁷⁵

El 1966 General Motors tiene el privilegio de ser la primera compañía en crear un vehículo con pila de combustible de hidrógeno producido, aunque las células de combustible ya habían existido, fue la creación del Dr. Craig Marks quien dirigió la mayor parte de los proyectos de ingeniería avanzada de General Motors. Marks, junto con un personal desarrollaron el vehículo conocido como *Electrovan sin embargo*, existió un incidente en que ocasiono una explosión del tanque de hidrógeno el cual no hirió a nadie, pero envió volando pedazos de un cuarto de milla, que era de gran preocupación y luego de un tiempo el proyecto fue desechado en gran parte porque era un costo prohibitivo.⁷⁶

Fig. 2.9 Electrovan GM, 1966



Fuente: <http://www.hydrogencarsnow.com/gm-electrovan.htm>

La inversión en el platino que se utilizó en la pila de combustible de la Electrovan fue suficiente para comprar una flota de furgonetas y no existían ninguna infraestructura de abastecimiento de hidrógeno de apoyo para recargar el combustible y de esa manera siga

⁷⁵Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 155)

⁷⁶HYDROGENCARSNOW. **1966 ELECTROVAN GM**. . [En línea]. [21 de agosto del 2013]. <<http://www.hydrogencarsnow.com/gm-electrovan.htm>>

funcionando el vehículo, ahora encontramos un modelo exacto de la Electrovan exhibida en el Museo del Automóvil Petersen en los Ángeles California.⁷⁷

Fig. 2.10 Electrovan expuesto en el museo del Automóvil Petersen en los Ángeles California.



Fuente:http://www.conceptcarz.com/view/photo/1081875,19151/1966GMCElectrovanExperimental_photo.aspx#photo

2.3.1. Tipos de Pilas de combustible de hidrógeno.

Los tipos de celdas de combustible se clasifican según el electrolito utilizado, aplican una literatura anglosajona que indica las iniciales de las denominaciones en lengua inglesa según su electrolito de esa manera tiene sus diferentes aplicaciones y son las siguientes:⁷⁸

- AFC: Pila de combustible alcalina, tiene aplicaciones puntuales.
- DMFC: Pila de combustible de metanol, son para aplicaciones portátiles y equipos electrónicos.
- MCFC: Pila de combustible de carbonato fundido, sus aplicaciones es para propulsión naval y ciclo combinado.
- PAFC: Pila de combustible de ácido fosfórico, son para aplicaciones de sector terciario.
- PEMFC: Pila de combustible de membrana intercambiadora de protones, son aplicadas en vehículos y portátiles.
- SOFC: Pila de combustible de óxido sólido, son para aplicaciones estacionarias.

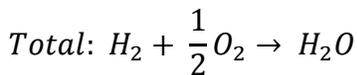
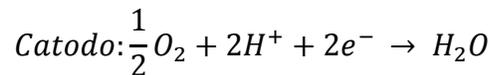
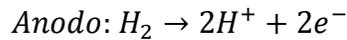
⁷⁷HYDROGENCARSNOW. 1966 ELECTROVAN GM. . [En línea]. [21 de agosto del 2013]. <<http://www.hydrogencarsnow.com/gm-electrovan.htm>>

⁷⁸Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 106).

2.3.1.1. Pila de combustible de membrana intercambiadora de protones. (PEMFC).

Este tipo de pila se caracteriza por tener un electrolito en forma de membrana fina de polímero, sus reactivos son el hidrógeno y el oxígeno, el material para el catalizador utilizado para su fabricación es el platino (Pt) con pequeñas incorporaciones de otros metales. El hidrógeno entra en la célula y el catalizador divide la molécula en protones y electrones, los protones atraviesan la membrana y al pasar al otro lado reaccionan con el oxígeno para formar agua y los electrones recorren el circuito por la parte externa creando una corriente eléctrica, la presión y temperatura de trabajo depende del tamaño construido, la pila trabaja a presión de ambiente y temperaturas de 60 °C.⁷⁹

La reacción electroquímica se indica a continuación, el platino al ser un metal noble y muy caro en el mercado es sutil para obtener velocidades significativas en la reacción.



En el ánodo el platino cataliza la disociación del hidrógeno molecular, el movimiento de los protones se lleva a cabo mediante a membrana de electrolito cuya eficacia se ve limitada debido a la baja temperatura que se lleva a cabo la reacción 80°C por lo que la reducción del oxígeno es 100 veces más lenta que la oxidación del hidrógeno.

2.3.2. Estructura básica de pila (PEMFC)

Esta celda de combustible con mayor potencial es la más utilizada para aplicaciones de automoción ya que tiene una capacidad de operar a temperaturas relativamente bajas.⁸⁰

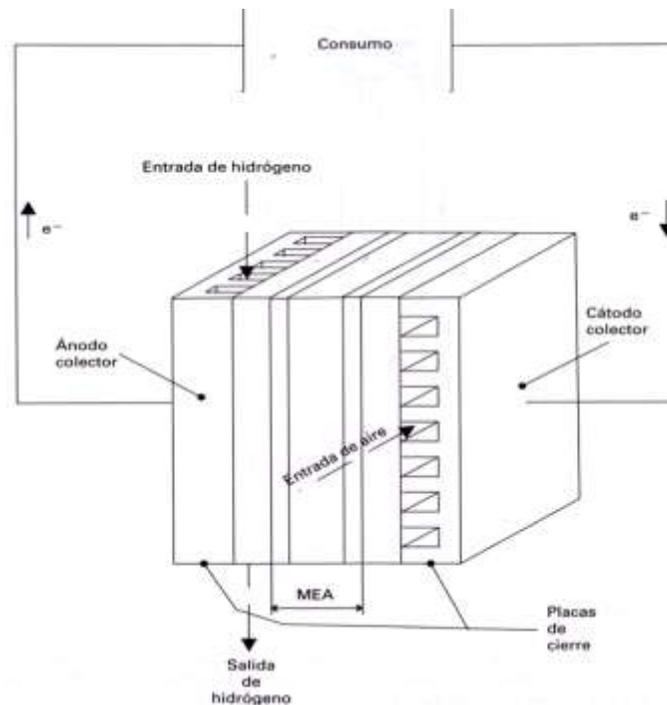
⁷⁹Agüer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.(pp. 109-110).

⁸⁰ NEXTGREENCAR. **HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS**. [En línea]. [15 de julio del 2013]. <<http://www.nextgreencar.com/fuelcellcars.php>>

2.3.2.1. Placa de cierre

Sirve para comprimir de forma compacta las celdas individuales para mantener la conductividad eléctrica, existe una placa de cierre positiva y negativa que se utiliza para facilitar la entrada del flujo del hidrógeno y del aire que contiene oxígeno que interviene con los reactivos de la reacción electroquímica y una salida de flujo. También funciona como un colector de corriente dando salida a los electrones por el ánodo y entrada por el cátodo, están fabricados de un material ligero, impermeable al gas y buen conductor de electricidad generalmente un metal o grafito. Cuando se unen varias placas de cierre para formar el stack el grupo del medio son las placas bipolares actuando como ánodo en una celda y cátodo en la celda adyacente y las de extremo son las placas propiamente de cierre.⁸¹

Fig. 2.11 Conjunto completo con placas de cierre.



Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado, pp112

⁸¹ Aguer, R. & Miranda, A. (2007). **EL HIDRÓGENO FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO**. Díaz de santos.(pp.111).

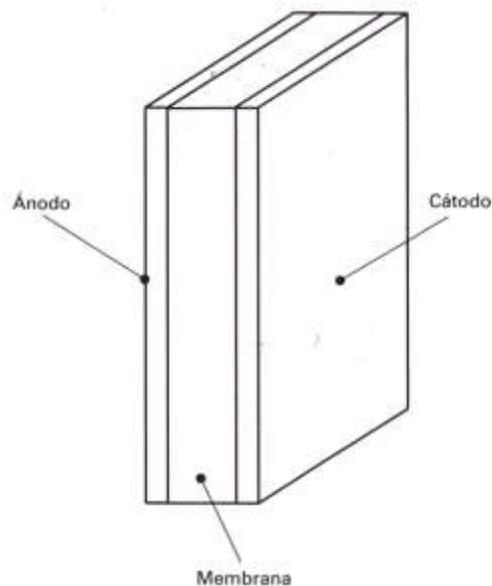
2.3.2.2.Soportes

Se les conoce como apoyos del ánodo y cátodo respectivamente ubicadas a los costados del conjunto MEA, están fabricados de un papel de carbón ultra poroso de 100 a 300 micras de espesor, la parte porosa del material permite el paso del gas a los electrodos⁸²

2.3.2.3.Conjunto MEA

MEA, es el conjunto formado por el electrolito en forma de membrana y los electrodos, puede tener un grosor de 200 micras aunque varía según su aplicación y densidad de la corriente que se desea tener, los electrodos son de grafito con una cierta concentración de platino.⁸³

Fig. 2.12 Conjunto MEA.



Fuente: Hortal Aguer Mario, Miranda Barreras Ángel L. (2007), El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado, [pag.111].

2.3.2.4.Placas refrigeradoras.

Las placas refrigeradoras van ubicadas a continuación de las placas bipolares, están fabricadas de materiales inertes, como misión se encargan de evacuar el calor producido en

⁸²Aguer, R. & Miranda, A. (2007). **EL HIDRÓGENO FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO**. Díaz de santos.(pp. 111).

⁸³Aguer, R. & Miranda, A. (2007). **EL HIDRÓGENO FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO**. Díaz de santos. (pp. 112).

la reacción química de obtención del agua. Se utiliza un conjunto de agua acoplado a un intercambiador de calor que tiene una bomba de circulación, un tanque de agua, un desionizador y los sensores pertinentes.⁸⁴

2.3.2.5. Membrana PEM.

La membrana PEM, dado por sus iniciales significa membrana intercambiadora de protones, la estructura está compuesta de un material llamado nafion el mismo que es muy caro fabricado por la compañía Dupont, se caracteriza por su peso y su gran conductividad formado por un polímero con grupos funcionales de ácidos, en estado anhidro tiene baja conductividad y cuando se hidratan se convierten en excelentes conductores de protones.⁸⁵

2.3.3. Funcionamiento la pila de combustible

El análisis del funcionamiento interno de una pila de combustible no es tan sencillo, por el contrario, se necesita conocer algunos conceptos con sus respectivas condiciones tales como la teoría de los gases, el voltaje de una celda de combustible, el ciclo Carnot, el rendimiento termodinámico de estos dispositivos y, por último, el rendimiento electroquímico.

2.3.3.1. Teoría de los gases

*“Dado cualquier gas en un estado de equilibrio térmico, podemos medir su presión P , su temperatura T y su volumen V ; para valores suficiente pequeños en cuanto a densidad, los experimentos indican que para una masa dada de gas que se mantiene a temperatura constante, la presión es inversamente proporcional al volumen (ley de Boyle), y para una masa dada de gas que se mantiene a presión constante, el volumen es directamente proporcional a la temperatura (ley de Charles y Gay Lussac) y de las tres se deduce la ley universal de los gases”.*⁸⁶

“El volumen ocupado por un gas a una presión y temperaturas dadas, es proporcional a la masa del gas. Así, la constante de la ecuación $P \cdot V/T$, también debe ser proporcional a la

⁸⁴Aguer, R. & Miranda, A. (2007). **EL HIDRÓGENO FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO**. Díaz de santos. (pp. 113).

⁸⁵Aguer, R. & Miranda, A. (2007). **EL HIDRÓGENO FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO**. Díaz de santos. (pp.113).

⁸⁶ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

masa del gas, por ello escribimos la constante de la ecuación $P \cdot V / T = \text{una constante}$; como $n \cdot R$, donde n es el número de moles de gas en la muestra y R es una constante que debe determinarse en forma experimental para cada gas.⁸⁷

Ecuación	Nomenclatura
$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.7)$	<p>P: Presión</p> <p>V: Volumen</p> <p>n: Numero de moles del gas</p> <p>R: constante universal de los gases con un valor de 8.314 J/mol K = 1.986 cal/mol K</p> <p>T: Temperatura °K</p>

Fuente: Diseño y construcción de un generador prototipo de energía mediante paneles solares –hidrógeno celda de combustible [pg. 33].

2.3.3.2. Voltaje de una celda de combustible

El máximo trabajo que se puede obtener de una celda de combustible que opera a temperatura y presión constante está dado por el cambio de energía libre de Gibbs a partir del balance de la energía en el sistema, por lo tanto para que la celda de combustible tenga el máximo trabajo debe ser igual al cambio de energía libre de Gibbs de la reacción; como se indica en la siguiente ecuación.⁸⁸

Ecuación	Nomenclatura
$W_{elect} = -n \cdot F \cdot E = \Delta G \quad (2.8)$	<p>ΔG: Es la diferencia entre la energía libre de Gibbs de productos menos la energía libre de Gibbs de los reactivos, por mol.</p> <p>n: Es el número de electrones que se ponen en juego en la reacción electroquímica.</p> <p>F: Es la constante de Faraday, igual a la carga en</p>

⁸⁷ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE.** [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

⁸⁸ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE.** [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

	<p>Culombios de un mol de electrones, cuyo valor es 96.485 °C.</p> <p>E: Es el voltaje de la celda de combustible.</p>
--	---

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg. 95]

Por ejemplo: Se desea determinar el calor que disipa una PEMFC que opera a 78 °C con una densidad de corriente de $0.75 \frac{A}{cm^2}$ y 0,7 V con una superficie de MEA de $130 cm^2$ asumiendo el comportamiento ideal de los gases y que la variación de entalpía y entropía de la reacción química no varían significativamente con la temperatura ⁸⁹

Aplicando la ecuación (2.1) y tomando los datos de la tabla de entropía y entalpía tenemos:

$$\Delta S = S_{H_2O} - (S_{H_2} + 0.5S_{O_2})$$

$$\Delta S = 69.95 - [130.06 + (0.5 \times 205.03)]$$

$$\Delta S = 163.15 \frac{KJ}{Kmol \text{ } ^\circ K}$$

$$\Delta H = H_{H_2O} - (H_{H_2} + 0.5H_{O_2})$$

$$\Delta H = -285,830 - 0 - 0$$

$$\Delta H = -285,830 \frac{MJ}{Kmol}$$

Por lo tanto:

$$\Delta G = -285,830 - (273.15 + 78)(-1.63 \times 10^{-3})$$

⁸⁹Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp.120).

$$\Delta G = -228,53 \frac{MJ}{Kmol}$$

Aplicando en la ecuación (2.4) de la fuerza electromotriz tenemos:

$$\epsilon = \frac{228.53}{2 \times 96487}$$

$$\epsilon = 1.18 V$$

En la práctica, el voltaje es menor que el teórico por las irreversibilidades que ocurren. Esta misma expresión es aplicable a cualquier otro tipo de pila de combustible, real o teórica. La variación de energía libre de Gibbs depende de la temperatura, pero también de la presión de los reactantes (en realidad, depende de la presión parcial, que tiene que ver con la concentración del gas en una mezcla de gases), entonces, la ecuación que calcula dicha ΔG se modifica a:

Ecuación	Nomenclatura
$\Delta G = \Delta G_o - R * T * \ln Q$ (2.9)	Q: Es el cociente de Reacción

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg. 62]

El cociente de reacción se calcula, dadas dos semirreacciones:

- Semirreacción de reducción $aOx A \rightarrow a'Red A$
- Semirreacción de oxidación $bRed B \rightarrow b'Red B$

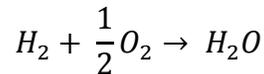
Teniendo como reducción global $aOx A + bRed B \rightarrow a'Red A + b'Red B$

Reactivos \rightarrow Productos

Entonces el cociente de Reacción es:

$$Q = \frac{Red a'Ox b'}{Red a Ox b}$$

Para el caso de la celda de hidrógeno operando con oxígeno puro, la reacción global es:



El cociente de la reacción será:

$$Q = \frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}$$

En el caso de gases, la concentración es equivalente a la presión parcial

2.3.3.3. Potencial de la celda de combustible de hidrógeno

El potencial de la celda viene definido por la ecuación de Nernst de manera que tiene la siguiente ecuación como resultado:

Ecuación	Nomenclatura
$E = \frac{\Delta G}{n \cdot F} = \frac{\Delta G_o}{n \cdot F} + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln Q = E_o + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln Q \quad (2.10)$	<i>E_o</i> : Voltaje teórico de la celda R: Constante de los gases T: Temperatura absoluta °K F: Constante de Faraday

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg.63]

Continuando con el ejemplo del voltaje teórico de la celda, el cociente de reacción se obtiene teniendo en cuenta que el oxígeno sólo representa un 21% en volumen del aire, y correspondientemente a su presión parcial.

$$Q = \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2}} = \frac{1 \cdot \sqrt{1 \cdot 0,21}}{1} = 0,46$$

Aplicando la Ecuación de Nernst tenemos:

$$E = E_o + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln Q = 1,18 + \left[\frac{8,31 \cdot 298}{2 \cdot 96500} \ln(0,46) \right] = 1,23 \text{ V}$$

El resultado permite determinar el momento de utilizar aire en lugar de oxígeno reduce levemente el potencial máximo que puede aportar la celda, por lo tanto, para una celda de hidrógeno, el voltaje teórico es igual a 1,23 voltios, a una temperatura de 25 °C. En otro caso, por ejemplo una celda que genere de 0,6 a 0,8 V tiene una eficiencia de cerca de 50%, lo que significa que el 50% de la energía contenida en el hidrógeno es convertida en energía eléctrica. En síntesis, el voltaje teórico de una celda de combustible viene determinado únicamente por la reacción que se produce en la misma relacionada con la temperatura y las presiones de los reactivos.

2.3.3.4. Rendimiento termodinámico de la pila de combustible

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte el hidrógeno en electricidad directamente. El proceso está definido por un conjunto de variables químicas y físicas (presión, temperatura, composición del oxidante y combustible, electrodos etc.) Por lo tanto, a partir de los cuales se definen procesos de diferente naturaleza (física, química y termodinámica) que tienen lugar en su interior.

La eficiencia ideal (eficiencia termodinámica) de celda, bajo condiciones reversibles (máxima posible), se puede definir como el cociente entre la variación de energía libre de Gibbs y la variación de entalpía en la reacción teniendo como resultado la siguiente ecuación:

Ecuación	
$\epsilon_t = \frac{W_{elec}}{-\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \left(\frac{T^* \Delta S}{\Delta H} \right)$	(2.11)

Fuente: Hidrógeno y pilas de combustible, Grupo SEAS, [pg. 33, capítulo 4]

Para interpretar la anterior ecuación, tenemos que la variación de la energía libre de Gibbs equivale al máximo trabajo eléctrico que puede dar la celda, por lo tanto, la variación de entalpía de la reacción es equivalente al calor que se desprende al producir la combustión directa (termodinámicamente se trata de la entalpía de formación), entonces, la ecuación relaciona la parte de la energía contenida en los reactivos que se lograría transformar en energía eléctrica y el resto solo se convertiría en calor.

En conclusión la eficiencia de la celda de combustible, a diferencia de los motores de combustión interna no está limitada por el ciclo de Carnot, ya que no sigue un ciclo termodinámico entre dos temperaturas, por este motivo, la pila de combustible tiene el rendimiento termodinámico con la condición de obtener como resultado de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno agua en estado líquido como producto final, de esta manera, el rendimiento termodinámico llega a ser del 83%.

Para la reacción de formación del agua a partir de hidrógeno y oxígeno a 25 °C y 1 atmósfera de presión, donde, la $\Delta H_{for\ agua} = 286$ KJ/mol y $\Delta G = 237,4$ KJ/mol, lo cual resulta en:

$$n_{termico} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,4 \text{ KJ/mol}}{286 \text{ KJ/mol}} = 0,83 = 83\%$$

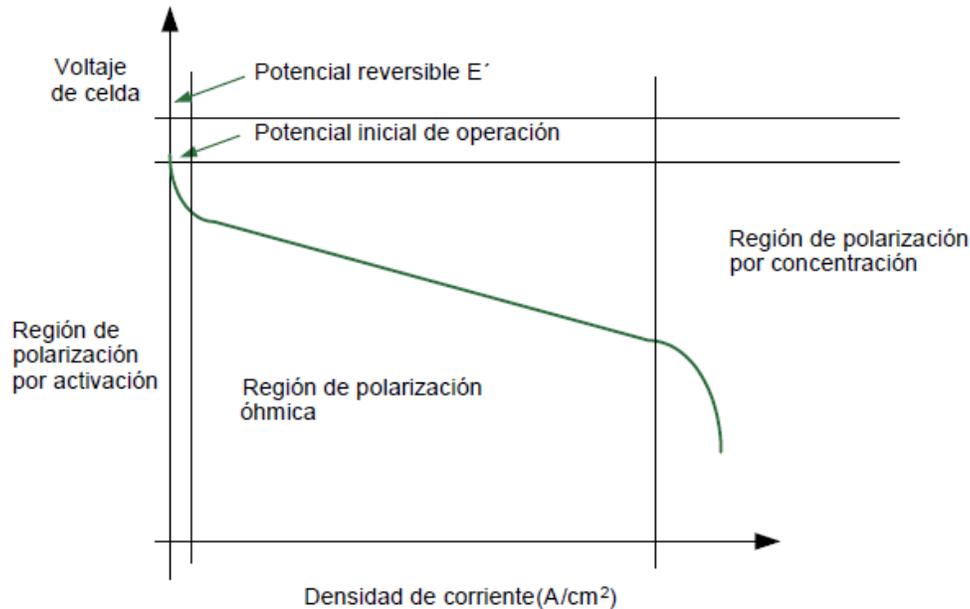
No obstante, lo mostrado hasta aquí no quiere decir que siempre una pila vaya a tener mayor rendimiento que una máquina térmica, en diferencia que el rendimiento de la máquina de Carnot aumenta con la relación de temperaturas, la celda de combustible ideal es menos eficiente que el ciclo de Carnot para temperaturas por encima de unos 750 °C.

2.3.3.5. Rendimiento electroquímico de la pila de combustible

El rendimiento electroquímico o de potencial es una comparación de la caída en la tensión de operación de las pilas respecto al potencial teórico o de Nernst, evaluando así las

pérdidas, llamadas también sobretensiones o polarizaciones. El potencial (V) de una pila en función de la corriente que ésta suministra tiene una dependencia del tipo dado en las siguientes gráficas:

Fig. 2.13 Curva de polarización de una celda de combustible



Fuente: Grupo Sanvalero SEAS, Hidrógeno y pilas de combustible pdf.

Este tipo de curvas de polarización representan el comportamiento del voltaje de la celda frente a la densidad de corriente. Hay tres fenómenos principales que son dominantes respectivamente a densidades de corriente bajas, medias o altas y muestran varios fenómenos de pérdidas que se van superponiendo:

- **Pérdidas por activación:** se presentan a bajas densidades de corriente, son causadas por la “lentitud” de las reacciones que tienen lugar en la superficie de los electrodos. Una parte del voltaje se emplea en transferir los electrones desde y hacia los electrodos.
- **Pérdidas óhmicas:** igual que ocurre en una resistencia eléctrica, cuanto mayor es la intensidad que circula, mayor es la pérdida de voltaje. Se corresponden con la parte lineal de la gráfica.
- **Pérdidas por concentración o por transporte de masa:** conforme se aumenta la intensidad, la reacción en los electrodos es más intensa, pudiendo llegar a ocurrir que el combustible o el oxígeno no consigan llegar a la velocidad

necesaria, o se produzca una pérdida de concentración de los reactivos en el electrodo.

El voltaje real de la celda tiene diferentes pérdidas irreversibles que contribuyen para su funcionamiento, estos valores son mínimos, por lo tanto, para realizar el cálculo exacto de valor del potencial teórico se resta cada uno de estos sobre potenciales, tal como el voltaje de activación, óhmico y de concentración como se indica en la siguiente ecuación:

Ecuación	Nomenclatura
$V = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (2.12)$	V: Voltaje real E: Potencial teórico V_{act} : Voltaje de activación V_{ohm} : Voltaje Óhmico V_{conc} : Voltaje de concentración

Fuente: Hidrógeno y pilas de combustible, Grupo SEAS, [pg. 29, capítulo 4]

El voltaje de activación se aproxima por la ecuación de Tafel, válida en general para las reacciones electroquímicas que se producen en la superficie de un electrodo. El sobrepotencial sigue una ley logarítmica con la densidad de corriente, esta ecuación debe ser obtenida experimentalmente para cada reacción (hidrógeno, metanol) y para cada material del electrodo (platino, paladio, níquel) se tiene la siguiente ecuación:

Ecuación	Nomenclatura
$V_{act} = A * \ln\left(\frac{J}{J_0}\right) \quad (2.13)$ <p>Donde la constante A se utiliza la siguiente ecuación:</p> $A = \frac{R * T}{2 * \alpha * F}$	J: Densidad de la corriente J_0 : Es la densidad de corriente umbral a partir de la cual comienza la reacción. R: Constante de los gases ideales T: Temperatura absoluta ° K α : Coeficiente de transferencia de carga, dependiente del catalizador usado. F: Constante de Faraday

Fuente: Hidrógeno y pilas de combustible, Grupo SEAS, [pg. 38, capítulo 4]

Las pérdidas por corrientes internas se pueden considerar como una corriente que se genera en el electrodo, pero que no se refleja en el valor de la densidad de corriente útil, j. Se

puede observar experimentalmente al medir el consumo de combustible a circuito abierto, y se puede integrar en la ecuación de Tafel, como V_{int} y se indica en la siguiente ecuación:

Ecuación
$V_{act} + V_{int} = A_a * \ln \left(\frac{J+J_{int}}{J_{oa}} \right) + A_o * \ln \left(\frac{J+J_{int}}{J_{oc}} \right) \quad (2.14)$

Fuente: Hidrógeno y pilas de combustible, Grupo SEAS, [pg. 39, capítulo 4]

Las pérdidas o sobrepotencial óhmico siguen la ley de Ohm, como se indican en la siguiente ecuación:

Ecuación	Nomenclatura
$V_{ohm} = j * r \quad (2.15)$	r : es la resistencia por unidad de área de la celda.

Fuente: Hidrógeno y pilas de combustible, Grupo SEAS, [pg. 39, capítulo 4]

Las pérdidas por concentración tienen relación con la pérdida de concentración de los reactivos en la superficie del electrodo. Por ejemplo, si una celda se alimenta con aire, dado que se consume el oxígeno del aire, la concentración de oxígeno disminuirá desde un máximo en la entrada del aire hasta un mínimo en la salida.

Evidentemente, a mayor concentración de reactivos, menores pérdidas. También, a mayor presión de los reactivos, menores pérdidas. Retomando la ecuación de Nernst.

Ecuación	Nomenclatura
$E = E_o + \frac{R*T}{n*F} \ln \left(1 - \frac{J}{J_l} \right) \quad (2.16)$	Q : se calcula a partir de las relaciones entre las presiones parciales de los reactivos y productos. J_l : Es una constante que representa la densidad de corriente para la cual la presión de los reactivos caen a cero (se consume todo el reactante en la celda).

Fuente: Hidrógeno y pilas de combustible, Grupo SEAS, [pg. 30, capítulo 4]

2.4. Elementos del vehículo con pila de combustible de hidrógeno

En los vehículos FCV la unidad principal de accionamiento es la pila de hidrógeno la misma que esta compuesta por varias celdas de combustible no tiene que ser dimensionada para atender a carga máxima del motor eléctrico, los requisitos de potencia necesarios para que cumpla el sistema de la pila de combustible y los picos de carga estén cubiertos por la batería, es por medio del combustible (hidrógeno) y de la energía recuperada durante el frenado.⁹⁰

2.4.1. Depósito de combustible de hidrógeno

El hidrógeno se puede almacenar en estado gaseoso, CGH_2 , en estado líquido, LH_2 o en forma de hidrocarburos para después obtener el hidrógeno, por ejemplo el Peugeot H_2O Ferighter almacena borohidrato de sodio como productor de hidrógeno.⁹¹

2.4.2. Pila de combustible de hidrógeno

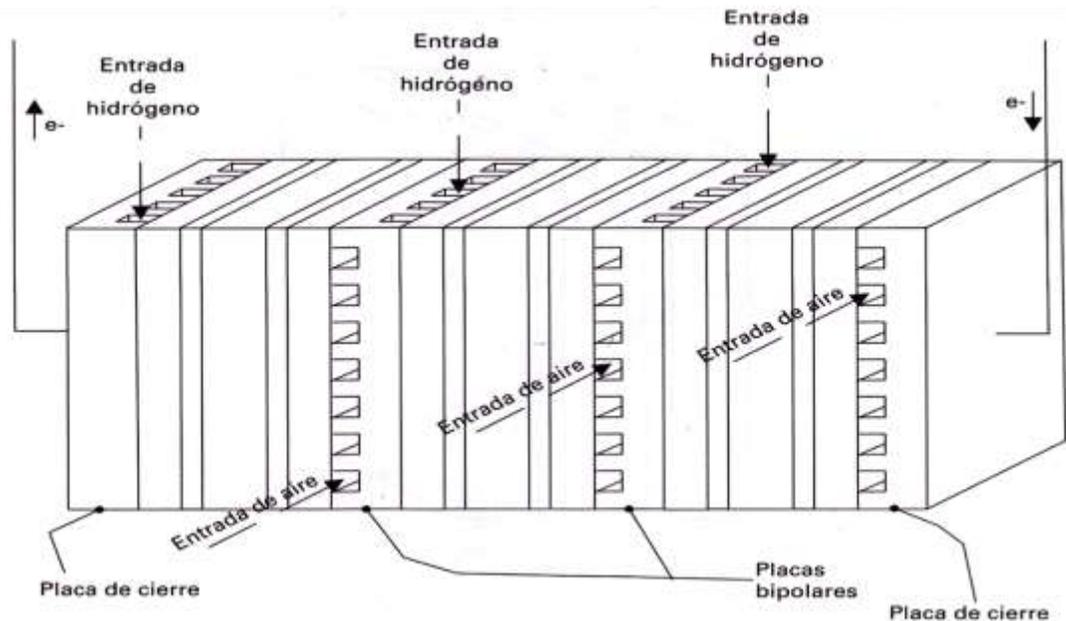
Es la encargada de proporcionar la corriente necesaria para alimentar el motor eléctrico, las que utilizan en automoción son de tipo PEM alimentadas con hidrógeno y oxígeno o bien aire del medio ambiente, otros vehículos utilizan otro combustible indirecto para producir el hidrógeno por ejemplo el metanol en los NECAR 3, Subaru FC y entre otros.⁹²

⁹⁰DAIMLER. FUEL CELL DRIVE TECHNOLOGY.[En línea]. [17 de julio del 2013]. <<https://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-1-1231028-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html>>

⁹¹Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp.132).

⁹²Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.(pp.132).

Fig. 2.14 Stack de celdas que forma la pila de combustible



Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado, pp113

2.4.3. Motor eléctrico

Es el convertidor de la energía eléctrica generada por la pila de combustible en energía mecánica capaz de proporcionar la motricidad al vehículo, se acostumbra a usar motores síncronos en los que el inductor está constituido por imanes permanentes llamados Brushless.⁹³

2.4.4. Control electrónico

El sistema encargado de la regulación del motor utiliza controladores electrónicos de alto rendimiento, necesitan un convertidor de corriente continua a corriente alterna.⁹⁴

2.4.5. Acumuladores de energía

Existen varios tipos de acumuladores de energía a continuación indicamos los más aplicables en automoción.

⁹³Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.(pp132).

⁹⁴Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.(pp.132).

2.4.5.1. Baterías

Se trata de dispositivos electroquímicos de funcionamiento idéntico a una pila de combustible pero con diferentes características en los reactivos al ser tantas y distintas las construyen de una estructura y características diferentes por ejemplo el Nissan EFFIS es un híbrido que utiliza una PEMFC y una batería, el Peugeot H_2O Ferighter es un híbrido con una batería. ⁹⁵

2.4.5.2. Supercondensadores

Se trata de un sistema de acumulación de energía electrostática, por ejemplo este tipo de acumulador lo utiliza el PSI VW Bora Hy Power con 150 Km de autonomía. ⁹⁶

2.4.5.3. Acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE)

Se trata de sistemas de acumulación de energía electromecánica, por ejemplo el Toyota Hino FCHV-Bus2 tiene una autonomía de 350 km utiliza un acumulador de recuperación de energía de frenada. ⁹⁷

⁹⁵Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.(pp.132).

⁹⁶Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 133).

⁹⁷Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.(pp.133).

CAPITULO III

PROPUESTA TÉCNICA PARA IMPULSAR UN VEHÍCULO LIVIANO.

3.1. Introducción.

La demostración de los cálculos utiliza referencias tomadas de algunas características técnicas del Toyota Prius entre ellas su peso y dimensiones, se ha elegido este modelo porque a más de ser un vehículo que cumple con las normas ambientales y está entre los más actuales en el mercado por su comportamiento como un vehículo eléctrico regenerativo minimizando el hecho que se combina con el motor de combustión interna en ciertas exigencias y además de contar con nuevos avances de tecnología y autonomía en el recorrido, para poder iniciar con el análisis es importante indicar que el objetivo de este proyecto es poder implementar la pila combustible de hidrógeno y paneles solares para poder mover este modelo de vehículo, de manera que, se empezara analizando los esfuerzos negativos a vencer que se oponen al movimiento del vehículo para determinar la cantidad de tiempo y consumo de hidrógeno que utilizaría para su funcionamiento.

3.2. Análisis para el funcionamiento del vehículo

Es importante identificar el periodo y tiempo para el uso del vehículo, ya que, una persona lo utiliza principalmente para su transporte dentro y fuera de la ciudad considerando si es para el transporte público o para uso diario familiar en donde usualmente se lo utiliza para el traslado desde su hogar a su trabajo, salir de compras u otras actividades y asimismo considerar las leyes del límite de velocidad determinadas por cada país para su circulación. En Ecuador la ley de tránsito determina que el límite de velocidad permitido dentro de las ciudades se encuentra en un rango aproximadamente de 30 a 60 km/h y fuera de ella varia de 60 a 90 Km/h ⁹⁸

⁹⁸ECUADOR VIAL. LÍMITES Y RANGOS MODERADOS DE VELOCIDAD. [En línea]. [25 de diciembre del 2013]. <<http://www.ecuador-vial.com/limites-y-rangos-moderados-de-velocidad-2>>

3.3. Condiciones del vehículo

Se ha elegido utilizar algunas características del vehículo del Toyota Prius debido que usa para su desplazamiento del mismo un motor eléctrico combinado con el motor de combustión interna; este motor eléctrico puede ser utilizado y combinado con la pila de combustible de hidrógeno consiguiendo del mismo modo el desplazamiento, pero con una diferencia no existirá ninguna emisión de gases en el transcurso del movimiento, por lo tanto, para cumplir estas condiciones se determinara el cálculo teórico para alcanzar el movimiento del vehículo respecto a un rendimiento eléctrico de una energía química otorgada por la combinación del hidrógeno y el oxígeno.

El Toyota Prius utiliza un motor eléctrico síncrono de imán permanente y es combinado con el motor de combustión interna para su funcionamiento, la corporación de Toyota realiza su propia fabricación de los motores eléctricos y sus características son las siguientes: tiene una tensión nominal de 500 V, potencia máxima de 68 CV (50 KW) que gira entre 1200-1540 rpm, además, tiene un par motor máximo de 400 Nm y un peso de 104 kg, su motor de combustión interna entrega una potencia máxima de 77 CV y combinado ambos motores el vehículo alcanza una potencia máxima de 132 CV.⁹⁹

3.3.1. Condiciones de la pila de combustible de hidrógeno

Según las características de una pila PEM tomado del capítulo II el voltaje teórico de una celda de combustible es de 1,23V considerando la eficiencia de la celda de un 50 % el voltaje varía entre 0,6 a 0.8 V debido a las pérdidas en las reacciones en el interior por sus reactivos, además de la presión y temperatura de trabajo según las dimensiones del tamaño de la pila. Para el funcionamiento de la pila de combustible el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso a una temperatura de 25° C y una presión de 1 atm (101,325KPa); sin embargo debido a las pérdidas por sus reactivos el voltaje de cada una de las celdas será de 0.8 V con una densidad de corriente de 0.9 A/cm² con estas condiciones se procederá a calcular el tamaño de la pila y conseguir abastecer de energía necesaria para el funcionamiento del motor eléctrico.

⁹⁹MMMODELOMOTOR. TOYOTA PRIUS. [En línea]. [18 de septiembre del 2013]. <<http://www.modelomotor.com/toyota-prius.html>>

3.4. Resistencia al avance del vehículo

La resistencia al avance del vehículo es el resultado de la suma de tres resistencias, las mismas que son la resistencia a la rodadura, aerodinámico y a la pendiente.

3.4.1. Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura tiene su origen en la deformación del neumático y el suelo, se representa con las siglas R_r y su ecuación es la siguiente:

Ecuación	Nomenclatura
$R_r = \mu * P \quad (3.1)$	R_r : Resistencia a la rodadura μ : Coeficiente de rodadura P : Peso del vehículo (Kg)
Dónde : $\mu = \mu_o + K * V^2$	μ_o : Coeficiente de rozamiento, Asfalto 0.02 $K : 0,5 \times 10^{-6}$ V^2 : Velocidad $\left(\frac{Km}{h}\right)$

Fuente: Ingeniería de vehículos sistemas y cálculos. [pg. 18]

3.4.2. Resistencia Aerodinámica.

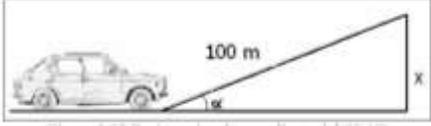
La resistencia aerodinámica determina la fuerza del aire contra el movimiento del vehículo relacionada con la estética del mismo, se lo representa con las siglas R_a y su ecuación es la siguiente:

Ecuación	Nomenclatura
$R_a = \frac{1}{16} * C_x * S * V^2 \quad (3.2)$	R_a : Resistencia aerodinámica C_x : Coeficiente de penetración aerodinámico de (0,3 a 0,4) S : Superficie frontal del vehículo multiplicando por una constante de 0.8, (m^2) V^2 : Velocidad (m/s)

Fuente: Ingeniería de vehículos sistemas y cálculos. [pg. 22]

3.4.3. Resistencia a la pendiente.

La resistencia a la pendiente es la que se opone al avance del vehículo cuando este sube una pendiente, se la representa con las siglas R_p y su ecuación es la siguiente:

Ecuación	Nomenclatura
$R_p = P * \sin a$  <p>Donde $\sin a = \frac{x}{100}$</p> <p>Por lo tanto:</p> $R_p = P * \frac{x}{100} \quad (3.3)$	<p>R_p: Resistencia a la pendiente</p> <p>P: Peso del vehículo</p> <p>La pendiente se expresa en x metros de subida vertical por cada 100 metros recorrido horizontal.</p>

Fuente: Ingeniería de vehículos sistemas y cálculos. [pg. 20]

3.4.4. Cálculos

Especificaciones del Toyota Prius: peso en vacío de 1300Kg y con carga de 1725 kg, aplicando las fórmulas para luego tabular en función en el cambio de velocidad tenemos las siguientes ecuaciones:

3.4.4.1. Cálculo a la resistencia de rodadura

Aplicando las ecuaciones (3.1) tenemos:

$$R_r = (0.02 + 0.5 \times 10^{-6} \times V^2) * 1725$$

$$R_r = 34,5 + 8.625 \times 10^{-4} V^2$$

3.4.4.2. Cálculo a la resistencia aerodinámica

Tomando en consideración las cotas del Toyota Prius de ancho 1.725 m y 1.490 m de altura aplicando la ecuación (3.2) y dejando en función de la velocidad tenemos:

$$R_a = \frac{1}{16} * C_x * S * V^2$$

Dónde:

$$S = 1.725 \times 1.490 \times 0.85$$

$$S = 2.18 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{1}{16} \times 0.3 \times 2.18 \times V^2$$

$$R_a = 0.041 \text{ V}^2; \text{ Si tenemos la velocidad en m/s}$$

$$R_a = \frac{0.041 \text{ V}^2}{12,96}; \text{ Si tenemos la velocidad en Km / h}$$

3.4.4.3. Cálculo a la resistencia a la pendiente

Remplazando en cualquiera de sus dos ecuaciones analizando según su altura o el ángulo de la pendiente por ejemplo en la ecuación (3.3) tenemos:

$$R_p = 17.25 \text{ sen } a$$

3.4.5. La potencia.

La potencia que entregue el motor será la encargada de vencer la resistencia al avance del vehículo a una determinada velocidad y considerando el rendimiento de la transmisión, de manera que tenemos la siguiente ecuación:

Ecuación	Nomenclatura
$P_w = \frac{R_T \times V}{75 \times n_r \times 3,6} \quad (3.4)$	<p>R_T: Resistencia al avance del vehículo, sumatoria de todas las resistencias.</p> $1 \text{ CV} = \frac{75 \text{ Kg m}}{\text{s}}$ $1 \frac{\text{h}}{\text{Km}} = 3.6 \frac{\text{s}}{\text{m}}$ <p>n_r: Rendimiento de la transmisión de 0.8 a 0,9</p> <p>1CV → 0,736 Kw</p>

Fuente: Ingeniería de vehículos sistemas y cálculos. [pg. 28]

3.4.5.1. La potencia a diferentes velocidades.

Tabla 3.1. Resultado de la resistencia al avance del vehículo y la potencia a diferentes velocidades

VELOCIDAD	ANGULO	Rr (kg)	Ra (kg)	Rp (kg)	Rt (kg)	Pw (CV)	Potencia
Km/h	sin α	$R_r = 34,5 + 8.625 \times 10^{-4} V^2$	$R_a = \frac{0.041 V^2}{12,96}$	$R_p = 17.25 \text{ sen } \alpha$	$\sum R$	$\frac{R_t \times V}{75 \times 0.8 \times 3.6}$	Kw
0	0	34,5	0	0	34,5	0	0
10	0	34,58	0,316	0	34,896	1,6	1,2
20	0	34,845	1,265	0	36,11	3,4	2,5
30	0	35,276	2,847	0	38,123	5,3	3,9
40	0	35,88	5,061	0	40,941	7,6	5,6
50	0	36,656	7,908	0	44,564	10,3	7,6
60	0	37,605	11,388	0	48,993	13,6	10
80	0	40,02	20,247	0	60,267	22,3	16,4
90	0	41,48	25,625	0	67,105	27,9	20,5
100	0	43,125	31,636	0	74,761	34,6	25,5
120	0	46,92	45,555	0	92,475	51,4	37,8
130	0	49,076	53,465	0	102,541	61,7	45,4
140	0	51,405	62,006	0	113,411	73,5	54,1
150	0	53,906	71,181	0	125,087	86,9	63,9
160	0	56,58	80,98	0	137,568	101,9	74,9
180	0	62,445	102,5	0	164,945	137,5	101,2

Fuente: Elaboración propia del autor

Eligiendo el mismo motor eléctrico del Toyota Prius, con una potencia máxima de 50 Kw y observando la anterior tabla de tabulación, podemos decir que alcanzaría una velocidad de 130 km/h. aproximadamente.

3.5. Calculo del tamaño de la pila de combustible de hidrógeno

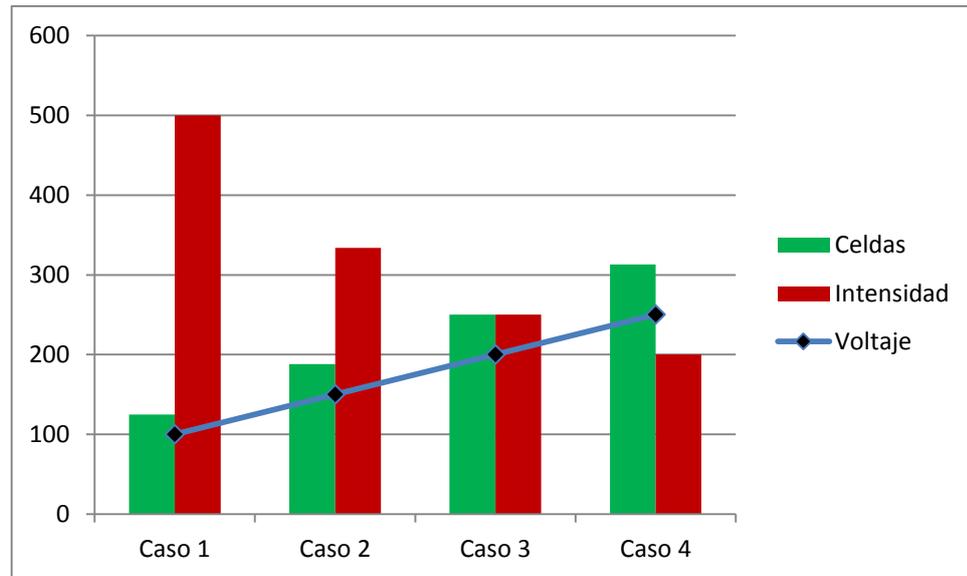
Se elegido alcanzar una potencia de 50 KW para usar el mismo motor eléctrico que la corporación de Toyota lo fabrica, de manera que, el vehículo pueda alcanzar una velocidad máxima de 130 km/h. Por lo tanto, para el diseño de la pila de combustible de hidrógeno según su capacidad de funcionamiento se necesita calcular el número de celdas de hidrógeno, la capacidad de corriente y sus dimensiones, por este motivo, se utilizara cuatro ejemplos para analizar los diferentes resultados y elegir la más adecuada para su aplicación en un vehículo como se indica a continuación:

Tabla 3.2. Resultado de la variación del voltaje nominal de la pila de combustible de hidrógeno

	Voltaje unitario de la celda (Voltios)	Densidad de la corriente (A/cm^2)	Voltaje nominal de la pila combustible (Voltios)	Número de celdas	Intensidad de la pila (Amperios)	Área de la celda (cm^2)	Dimensiones (cm)
	V_n	d_c	V_{fc}	$N_c = \frac{V_{fc}}{V_n}$	$I = \frac{P}{V_{fc}}$	$j = \frac{I}{d_c}$	$b \times a$
Caso 1	0.8	0.9	100	125	500	$556 \cong 560$	20 x 28
Caso 2	0.8	0.9	150	188	334	$372 \cong 380$	20 x 19
Caso 3	0.8	0.9	200	250	250	$278 \cong 330$	22 x 15
Caso 4	0.8	0.9	250	313	200	220	22 x 10

Fuente: Elaboración propia del autor

Fig. 3.1: Grafico comparativo del voltaje nominal, numero de celdas e intensidad de corriente



Fuente: Elaboración propia del autor

Los resultados obtenidos en el anterior figura indican que según el valor del voltaje nominal varía también la cantidad del número de celdas y la intensidad de corriente en la pila de combustible de hidrógeno, de modo que, para voltajes altos se necesita mayor número de celdas y un menor flujo de intensidad de corriente, sin embargo para voltajes menores sucede lo contrario, además de que el tamaño de la pila de combustible se reduce debido al menor número de celdas utilizadas.

3.5.1. Calculo de la cantidad de hidrógeno

La intensidad de corriente que atraviesa por conductor en un tiempo determinado es el resultado de una carga eléctrica o una cantidad de electrones que fluyen en dicho tiempo, estos serán entregados por medio de la pila de combustible en el momento que el hidrógeno ceda sus electrones, de manera que, a continuación se indica la cantidad de hidrógeno necesario para conseguir un amperio:

Si sabemos que:

$$1A = 1 \left(\frac{\text{Culombio}}{\text{Segundo}} \right) \quad \text{También} \quad 1A * s = 1C$$

Por lo tanto tenemos:

$$1 A \left(\frac{1 C}{1 A * s} \right) \left(\frac{1 mol e^-}{96,487 C} \right) \left(\frac{1 Mol H_2}{2 mol e^-} \right) \left(\frac{2,0158 g}{1 Mol H_2} \right) \left(\frac{3600 s}{1 h} \right) = 0,0376 \frac{g H_2}{h}$$

Si la celda da un voltaje de 0,8V, para obtener una potencia de 1 Kw se necesitaría:

$$0,0376 \frac{g H_2}{A h} \left(\frac{1000 V A}{1 Kw} \right) \left(\frac{1}{0,8V} \right) \left(\frac{1 Kg}{1000g} \right) = 0,047 \frac{Kg H_2}{h Kw}$$

Por lo tanto de acuerdo con el anterior resultado, se tiene una relación entre el consumo de la cantidad de hidrógeno por cada kilovatio hora de funcionamiento de un consumidor de energía, de manera que, se puede determinar su cantidad de combustible según las horas de trabajo y de esta manera promover un vehículo con cierta capacidad de consumo por un tiempo laborado, diario, mensual y anual.

Para determinar la masa total necesaria de hidrógeno para la reacción electroquímica, se utiliza una masa adicional que está determinado por el coeficiente estequiométrico (λ) que equivalente a 0.8 de manera se aplica en la siguiente ecuación:

ECUACION	NOMECLATURA
$\lambda = \frac{m_{H_2 Consumida}}{m_{H_2 Entrada}} \quad (3.5)$	λ : Coeficiente estequiométrico, equivalente a 0.8
Despejando la masa total de entrada tenemos:	$m_{H_2 Entrada}$: Hidrógeno de entrada
$m_{H_2 Entrada} = \frac{m_{H_2 Consumida}}{0,8} \quad (3.6)$	$m_{H_2 consumido}$: Hidrógeno utilizado por la pila de combustible

Fuente:

<http://monografias.umcc.cu/monos/2011/FACULTAD%20DE%20INGENIERIA/mo11fie7.pdf>

Por lo tanto aplicando la ecuación del consumo por Kw tenemos:

$$m_{H_2 Entrada} = \frac{0,047}{0,8} = 0,05875 \frac{Kg H_2}{h Kw}$$

Según la tabla la potencia para vencer la resistencia del vehículo y alcanzar una determinada velocidad se utiliza de una cantidad de hidrógeno necesaria para el funcionamiento continuo de la pila de combustible en un determinado tiempo, a continuación en la siguiente tabla se indican estos valores:

Tabla 3.3. Masa total de hidrógeno a la entrada de la pila de combustible de hidrógeno

VELOCIDAD	Potencia	Cantidad de H ₂	Cantidad de H ₂ para 1Km
Km/h	Kw	$\frac{Kg}{h}$	Gramos
0	0	0	0
10	1,2	0,071	7.1
20	2,5	0,147	7.35
30	3,9	0,229	7.6
40	5,6	0,329	8.225
50	7,6	0,446	8.92
60	10	0,588	9.8
80	16,4	0,964	12.05
90	20,5	1,204	13.37
100	25,5	1,498	14.98
120	37,8	2,221	18.508
130	45,4	2,667	20.51
140	54,1	3,178	22.7
150	63,9	3,707	24.71
160	74,9	4,400	27.5
180	101,2	5,946	33.033

Fuente: Elaboración propia del autor

En los resultados de la tabla 3.3 muestra la cantidad de hidrógeno según el rango de velocidad, es importante indicar que el vehículo solo consume el hidrógeno cuando se acciona el pedal de aceleración, es decir, cuando se encuentra en movimiento, por lo tanto adicionalmente se sugiere utilizar para el funcionamiento eléctrico la energía de una batería de litio-ion por motivo de ser pequeña tiene la facilidad de carga rápida y utilizar la carga el funcionamiento por medio freno regenerativo. Para el diseño de la pila de combustible de hidrógeno se ha elegido trabajar con el caso N°4 debido a que trabaja con una menor intensidad de 200 A y con 250 V de funcionamiento con 313 celdas.

3.5.2. Calculo de la cantidad de oxígeno

Para calcular la cantidad de O₂ se necesita considerar que estequiométricamente se necesitan 2 átomos de H₂ por cada átomo de O₂ para producir H₂O, para ello se realiza el siguiente cálculo:

Consideramos la masa total del hidrógeno obtenido para la pila de hidrógeno elegida tendremos:

$$0,05875 \frac{Kg H_2}{h Kw} \left(\frac{1000g H_2}{1 Kg} \right) \left(\frac{1 g mol H_2}{2,0158 g H_2} \right) \left(\frac{1 g mol O_2}{2 g mol H_2} \right) = 14,57 \frac{g mol O_2}{h Kw}$$

Como el coeficiente de estequiométrico del oxígeno es 4 (25% de utilización), el número de moles de O₂ a suministrar al stack de la pila es:

$$n_{O_2 \text{ Entrada}} = 14,57 \frac{g mol O_2}{h Kw} \times 4 = 58,29 \frac{g mol O_2}{h Kw}$$

Si el aire tiene 21% de O₂ entonces la masa sería la siguiente

$$m_{\text{aire Entrada}} = 58,29 \frac{g mol O_2}{h Kw} \left(\frac{1 g mol \text{ de Aire}}{0,211 g mol O_2} \right) \left(\frac{28,85 g \text{ aire}}{1 g mol \text{ de Aire}} \right)$$

$$m_{\text{aire Entrada}} = 7969,9 \frac{g \text{ aire}}{h Kw} \rightarrow 7,969 \frac{Kg \text{ aire}}{h Kw}$$

3.6. Panel solar y electrolisis.

La empresa Kyocera Corporation suministra los módulos solares para el sistema de aireación solar del nuevo Toyota Prius con una potencia de 56 Watts.¹⁰⁰ Otras empresas colocan los paneles solares como Solar Electrical Vehicles, situada en California, se encarga de sustituir el techo del Toyota Prius por uno compuesto por placas solares puede generar hasta 1.300 Watts -hora al día.¹⁰¹

Fig. 3.2 El panel solar en el Toyota Prius.



Fuente: <http://www.wired.com/autopia/2008/12/the-solar-prius/>

¹⁰⁰ KYOCERA. KYOCERA SUMINISTRA MÓDULOS SOLARES PARA EL TOYOTA PRIUS. [En línea]. [14 de octubre del 2013]. <http://www.kyocerasolar.es/index/news/previous_news/news_archive_detail.L3NvbGFyX2VsZWN0cmJX3N5c3RibXMvbmV3cy8yMDA5L0tZT0NFUKFfc3VtaW5pc3RyYV9tb2R1bG9zX3NvbGFyZXRNfcGFyYV9lbF9udWV2b19Ub3lvdGFfUHJpdXM~.html>

¹⁰¹ WIRED. PANELES SOLARES. [En línea]. [14 de octubre del 2013]. <<http://www.wired.com/autopia/2008/12/the-solar-prius/>>

3.6.1. Cálculos para la electrolisis con el panel solar en el vehículo

Utilizando el propio panel solar integrado en el vehículo fabricado por Kyocera que produce 56 Watts, analizando el clima de la ciudad de Cuenca tenemos que periódicamente es alternativo con cambios bruscos en el transcurso del día y la presencia del sol no es igual a todos los días del año, debido a esta variable diremos que la presencia del sol es alrededor de cinco horas diarias por lo tanto la energía total diaria sería del producto de la potencia por el tiempo estimado dando como resultado 280 Wh/día.

3.6.2. Capacidad de la batería fotovoltaica

Si la potencia del panel solar es 137 Watts y para la acumulación de la energía del sol elegimos una batería de 12 voltios, la intensidad de la corriente será:

ECUACION	NOMECLATURA
$I = \frac{P}{V} \quad (3.7)$	I: Intensidad de corriente P: Potencia del panel solar (watts) V: voltaje

Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios [pg.216]

Aplicando la ecuación (3.7) tenemos:

$$I = \frac{56}{12}$$

$$I = 4,7 \text{ Amperios}$$

ECUACION	NOMECLATURA
$C_{acu} = \frac{E \times \#Dias}{V} \quad (3.8.)$ Dónde: $E = P \times t$	C_{acu} : Capacidad de la batería A-h E: Energía aportada P: Equivalente en gramo del Hidrógeno es 1 t: Tiempo en horas V: Voltaje del acumulador

Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios [pg.216]

La energía aportada del panel solar para la capacidad del acumulador aplicando la ecuación (3.8) y (3.8.1) sería:

$$E = 56 \times 5$$

$$E = 280 \text{ Wh/ Dia}$$

$$C_{acu} = \frac{280 \times 7}{12} = 163 \text{ Ah}$$

3.6.3. Análisis de la producción de hidrógeno por electrolisis

Si el flujo de corriente de la batería fotovoltaica es de 4,7 Amperios por segundo, realizamos el cálculo de la cantidad de moles de agua que actuarían a través de ese flujo como se indica a continuación:

$$4,7 \text{ Amperios} \rightarrow \frac{C}{\text{seg}} \left(\frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas de H}_2\text{O}} \right) \left(\frac{\text{Carga de } e^- \text{ moléculas de H}_2\text{O}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \right)$$

$$n = \frac{4,7}{6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19}}$$

$$n = 4,87 \times 10^{-5} \frac{\text{mol } e^- \text{ H}_2\text{O}}{\text{seg}}$$

Si para obtener el hidrógeno se debe usar dos moles de electrones en el agua tenemos:

$$n = \frac{4,87 \times 10^{-5}}{2}$$

$$n_{\text{H}_2} = 2,44 \times 10^{-5} \frac{\text{Mol}}{\text{seg}}$$

En una hora seria (multiplicado por 3600 segundos) tenemos:

$$n_{\text{H}_2} = 0,08784 \frac{\text{Mol}}{h}$$

Por tanto si la masa atómica del hidrógeno es de $1,00797 \frac{\text{gramos}}{\text{Mol}}$ por lo tanto, la cantidad en gramos de hidrógeno seria:

$$0,08784 \frac{\text{Mol}}{h} \left(\frac{1,00797 \text{ gramos}}{\text{Mol}} \right) = 0,088 \frac{\text{gr H}_2}{h}$$

Y el volumen, para condiciones normales considerando el valor estándar a presión atmosférica es de 101.3 KPa y temperatura de ambiente 25°C, aplicando la ecuación ideal de los gases:

$$V = \frac{n R T}{P} = \frac{0,08784 \times 8,13 \times 293}{101300} = 1,84 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$V = 1,84 \frac{L}{h}$$

Para la comprobar el resultado teórico y tenga concordancia, aplicando la ecuación 2.5 tenemos:

$$m = \frac{M_{at} \times I \times t}{n^\circ e^- \times 96500}$$

$$m = \frac{1,00797 \times 4.7 \times 3600}{2 \times 96500}$$

$$m = 0.88 \frac{\text{gr H}_2}{\text{h}}$$

Por lo tanto la cantidad de hidrógeno obtenida en un determinado tiempo está en función de la corriente que pasa por el electrolizador, la misma dependerá del tamaño del panel solar para acumular la suficiente cantidad de energía del sol presente en el día, por este motivo, el máximo volumen del tanque de almacenamiento estará diseñado para la máxima acumulación de energía solar establecida, en este análisis se considera para cinco horas diarias y más adelante se indicara dicho calculo.

3.7. Volumen del tanque de hidrógeno.

En el almacenamiento de hidrógeno se utiliza las estructuras metálicas embobinadas con una resina de materiales compuestos de fibras de carbono, en la parte central del cilindro, en aplicaciones móviles el almacenaje se prefiere utilizar una alta capacidad lo que obliga a utilizar presiones de 20.000 a 70.000 KPa mientras que en zonas estacionarias se almacenan en botellas de acero de 20.000 KPa en tamaños de 10 o 50 litros¹⁰²; por ejemplo el vehículo Ford Edge HySeries tiene un tanque de almacenamiento de hidrógeno de 5000 PSI que equivale aproximadamente 35.000 KPa.¹⁰³

3.7.1. Volumen del tanque de hidrógeno principal

Para determinar el hidrógeno comprimido se aplica la ecuación que comprende del factor de compresibilidad (Z) que viene dado en tablas en función de la temperatura y presión con esos datos se puede determinar el volumen del recipiente de una determinada masa de gas almacenado bajo presión como se indica a continuación:

¹⁰² Aguer, R. & Miranda, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos. (pp. 99).

¹⁰³ JAMBITZ. **FORD FOCUS DE HIDRÓGENO FCV**. [En línea]. [9 de octubre del 2013]. <<http://www.jambitz.com/a-prueba-ford-focus-de-hidrogeno-fcv/>>

Ecuación	Denominación
$pV = ZmR'T$ (3.9)	p : Presión. KPa
Despejando el Volumen:	V : Volumen. m^3
$V = \frac{ZmR'T}{P}$ (3.10)	Z : Factor de compresibilidad
	m : Masa. Kg
	R' : Constante específica del gas: $4124,3 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ K}$
	T : Temperatura $^\circ K$

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg.159]

Para analizar y elegir la mejor opción se calculó para diferentes presiones de 20.000, 35.000 y 70.000 KPa a una temperatura de $25^\circ C$ ($298,15^\circ K$), el cálculo del volumen del hidrógeno para tres casos de almacenaje de 5 Kg, 10Kg y 15 Kg respectivamente a las diferentes presiones, Por medio de la tabla N° 3.4 determinamos el factor de compresibilidad aplicando la ecuación determinamos el volumen de almacenaje como se muestra a continuación:

Tabla 3.4. Factor de compresibilidad (temperatura $^\circ K$)

Presión (KPa)	250	273,15	298,15	350	400	450	500
100	1,007	1,004	1,0006	1,00055	1,00047	1,00041	1,00041
500	1,00337	1,00319	1,00304	1,0027	1,00241	1,00219	1,00196
1.000	1,00672	1,00643	1,00605	1,0054	1,00484	1,00435	1,00395
5.000	1,03387	1,03235	1,03037	1,02701	1,02411	1,02159	1,01957
10.000	1,06879	1,0652	1,06127	1,05369	1,04807	1,04314	1,03921
15.000	1,10404	1,09795	1,09189	1,0807	1,072	1,06523	1,05836
20.000	1,14056	1,13177	1,1232	1,10814	1,09631	1,08625	1,07849
25.000	1,17789	1,16617	1,15499	1,13543	1,12034	1,10793	1,08764
30.000	1,21592	1,20101	1,18716	1,163	1,14456	1,12957	1,11699
35.000	1,25461	1,23652	1,21936	1,19051	1,16877	1,15112	1,13648
40.000	1,29379	1,2722	1,25205	1,21842	1,19317	1,17267	1,15588
45.000	1,33332	1,2082	1,28487	1,24634	1,21739	1,19439	1,17533
50.000	1,37284	1,34492	1,31784	1,27398	1,24173	1,21583	1,19463
60.000	1,45188	1,41618	1,38797	1,3301	1,2904	1,2592	1,23373
70.000	1,53161	1,4888	1,44991	1,38593	1,33914	1,30236	1,27226

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado, [pp. 159]

Tomando de referencia para el primer caso de 5kg de hidrógeno almacenado, a continuación se indica el cálculo del volumen almacenado a las diferentes

presiones respecto al factor de compresibilidad utilizando la ecuación (3.10.1) tenemos:

- Para una presión de 20.000 KPa a 25 °C (298,15 °K) tenemos $Z= 1,12320$

$$V = \frac{1,12320 \times 5 \times 4124,3 \times 298,15}{20.000 \times 10^3}$$

$$V = 0,345 \text{ m}^3$$

- Para una presión de 35.000 KPa a 25 °C (298,15 °K) tenemos $Z= 1,23652$

$$V = \frac{1,23652 \times 5 \times 4124,3 \times 298,15}{35.000 \times 10^3}$$

$$V = 0,217 \text{ m}^3$$

- Para una presión de 70000 KPa y 298.15°K tenemos $Z= 1,4499$

$$V = \frac{1,44991 \times 5 \times 4124,3 \times 298,15}{70.000 \times 10^3}$$

$$V = 0,127 \text{ m}^3$$

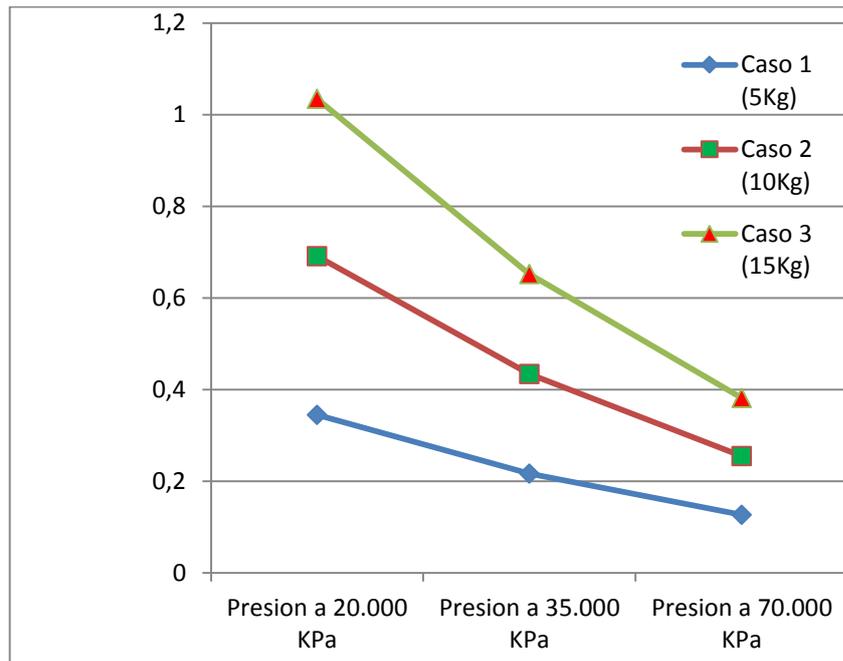
Por lo tanto para los otros dos diferentes casos utilizando el mismo proceso de cálculo realizado anteriormente, tenemos los siguientes resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Resultado del volumen de almacenaje de hidrógeno a diferentes presiones

	Masa H_2 Entrada	Volumen a una presión 20.000kPa	Volumen a una presión 35.000kPa	Volumen a una presión 70.000kPa
Caso 1	5 Kg	0,345 m ³	0,217 m ³	0,127m ³
Caso 2	10 Kg	0,691 m ³	0,434 m ³	0,255 m ³
Caso 3	15 Kg	1,035 m ³	0,652 m ³	0,382 m ³

Fuente: Elaboración propia del autor

Fig. 3.3 Grafico de la variación del volumen de hidrógeno a diferentes presiones



Fuente: Elaboración propia del autor

En los resultados obtenidos se puede notar las variaciones de volúmenes a las diferentes presiones, de manera que, según la cantidad de masa que se desea almacenar utilizando el factor de compresibilidad el volumen se va reduciendo a una mayor presión, pero la diferencia de masas almacenadas se nota en su tamaño del volumen, por otra parte, al no aplicar este método el volumen sería demasiado más grande para cierta cantidad de masa, ahora para asegurarnos que es un diseño aceptable determinemos las dimensiones del tanque.

3.7.2 Volumen del tanque de hidrógeno secundario

Considerando las condiciones establecidas de tener cinco horas de sol diariamente en la ciudad de Cuenca, la máxima cantidad de hidrógeno producida por la electrolisis del agua estaría producida durante esa cantidad de energía almacenada, por lo tanto, las dimensiones del tanque de almacenamiento está calculado para la masa de gas de hidrógeno obtenidas en función de la máxima energía acumulada, por otra parte, el volumen del depósito para el almacenaje del gas se presenta en condiciones normales a temperatura de ambiente y presión atmosférica además no se aplica la compresibilidad del gas ya que si se aplicara necesitaría una energía extra para dicho proceso, de manera que utilizando la ecuación de los gases ideales se tiene:

- Cantidad de moles de hidrógeno en 5 horas:

$$n_{H_2} = 2,44 \times 10^{-5} \frac{\text{Mol}}{\text{seg}} (5 \times 3600)$$

$$n_{H_2} = 0,04392 \text{ moles}$$

- Transformación de moles a gramos de hidrógeno en 5 horas:

$$0,04392 \text{ moles} \left(\frac{1,00797 \text{ gramos}}{\text{Mol}} \right) = 0,44 \text{ gr}_{H_2}$$

- Volumen del hidrógeno en condiciones normales:

$$V = \frac{n R T}{P} = \frac{0,04392 \times 8,13 \times 293}{101300} = 0,01 \text{ m}^3 \rightarrow 1 \text{ Litro}$$

3.8. Dimensión del tanque de almacenamiento

El dimensionado del tanque se calcula utilizando la ecuación del volumen del cilindro descrito a continuación, es importante mencionar que debe ser de un material resistente que evite fugas del hidrógeno controlado por un sensor de presión y una válvula para controlar su caudal.

Ecuación	Nomenclatura
$V = \pi r^2 h \quad (3.11)$ <p>Despejando el radio tenemos:</p> $r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}}$	<p>V: Volumen m^3</p> <p>r: Radio.</p> <p>h: Altura</p>

Fuente: <http://www.ingenieriaycalculos.com/matematicas/geometria/figuras3d/calculadora/cilindro-circular-recto>

Para realizar el dimensionado del tanque se ha planteado el siguiente análisis; si el vehículo utiliza un motor de una potencia máxima de 50 Kw para alcanzar una velocidad de 130 Km/h, es importante conocer el tiempo de uso que tendrá diariamente para determinar el consumo y abastecer con la cantidad de hidrógeno necesaria para su funcionamiento si la masa del volumen almacenado estará entre un rango de 5 a 15 Kg.

Tabla3.6 Resultado del tiempo de consumo a una determinada velocidad del hidrógeno almacenado a diferentes presiones

VELOCIDAD	Potencia	Cantidad de H2	Tanque de 5Kg	Tanque de 10Kg	Tanque de 15Kg
Km/h	Kw	$\frac{Kg}{h}$	Tiempo horas	Tiempo horas	Tiempo Horas
0	0	0	0	0	0
10	1,2	0,071	70,4	140,8	211,3
20	2,5	0,147	34,1	68,1	102,1
30	3,9	0,229	21,8	43,6	65,5
40	5,6	0,329	15,2	30,4	45,6
50	7,6	0,446	11,2	22,4	33,6
60	10	0,588	8,5	17,0	25,5
80	16,4	0,964	5,2	10,4	15,5
90	20,5	1,204	4,2	8,3	12,5
100	25,5	1,498	3,3	6,7	10,0
120	37,8	2,221	2,3	4,5	6,8
130	45,4	2,667	1,9	3,7	5,6
140	54,1	3,178	1,6	3,1	4,7
150	63,9	3,707	1,3	2,7	4,1
160	74,9	4,400	1,1	2,3	3,4
180	101,2	5,946	0,8	1,7	2,5

Fuente: Elaboración propia del autor

En la anterior tabla, se muestra la duración del hidrógeno consumido según la cantidad del tanque de almacenamiento para mantener una velocidad fija durante el recorrido del vehículo, de manera que se puede observar el tiempo de duración para los distintos rangos de velocidades, se concluye que el consumo va ser mayor según vaya alcanzando el vehículo mayor velocidad, además, al utilizar la comprensibilidad para un tanque de 15 kg otorgaría mayor duración y abastecimiento de combustible y por lo tanto se ha considerado calculara las dimensiones del mismo.

3.8.1. Dimensión del tanque de almacenamiento principal

Se puede variar las condiciones de construcción optando por la altura o radio como variable fija para determinar la otra variable, se ha elegido como variable fija en este caso la altura ya que el tanque de almacenamiento estaría ubicado a lo largo del vehículo y tendría una dimensión de dos metros para el volumen que ocuparía 15 Kg a las diferentes presiones aplicando la ecuación (3.11.1) tenemos:

Tabla 3.7. Radio del cilindro de almacenaje de hidrógeno a diferentes presiones.

Radio a una presión 20.000kPa	Radio a una presión 35.000kPa	Radio a una presión 70.000kPa
41 cm	32 cm	25 cm

Fuente: Elaboración propia del autor

Según los resultados, utilizando el factor de compresibilidad, a distintas presiones el radio del cilindro va disminuyendo, sin embargo se recomienda analizar el material del cilindro para que resista su almacenaje, su estructura puede ser metálica totalmente enrollado con una resina de materiales compuestos de fibras de carbono.¹⁰⁴

Fig. 3.4 Vehículo con pila de combustible.



Fuente: <http://pila-hidrogeno.com/index.php/tag/hidrogenas/>

3.8.2. Dimensión del tanque de almacenamiento secundario

Utilizando la ecuación (3.11) y optando que sea de un diámetro pequeño de 0.10 metros calculamos la variable de altura.

$$h = \frac{V}{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

$$h = \frac{0,01}{\pi \times \left(\frac{0,10}{2}\right)^2}$$

$$h = 1.27 \text{ m}$$

Por lo tanto tendremos un cilindro de 1,27x 0,10 m, en este caso no utilizamos la compresión del gas para disminuir el cilindro ya que se necesitaría de una cantidad de energía para realizar dicha acción por lo tanto iría una valvular con un sensor para el paso del gas de hidrógeno al cilindro.

¹⁰⁴ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

3.9. Flujo del hidrógeno a la pila

Para determinar el flujo volumétrico de la cantidad del total de hidrógeno en condiciones normales utilizamos la siguiente ecuación:

ECUACION	NOMECLATURA
$Q_{H_2 \text{ Entrada}} = \frac{m_{H_2 \text{ Entrada}}}{\rho_{H_2}} \quad (3.12)$	$Q_{H_2 \text{ Entrada}}$: Flujo volumétrico entrada $m_{H_2 \text{ Entrada}}$: Masa de hidrógeno que entra ρ_{H_2} : Densidad del hidrógeno

Fuente: <http://monografias.umcc.cu/monos/2011/FACULTAD%20DE%20INGENIERIA/mo11fie7.pdf>

Continuando con los datos de masa de H_2 de la anterior tabla determinamos el flujo correspondiente según la condición indicada que las pilas de combustible tipo PEM que para mayores potencias de 10KW trabajan a una presión de 300 KPa y 80° C aproximadamente, se determina la densidad del hidrógeno a dicho rango de trabajo, aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación	Nomenclatura
$\rho = \frac{P}{R' * T} \quad (3.13)$ <p>Dónde:</p> $R' = \frac{R}{M}$	ρ : Densidad del hidrógeno P: presión de trabajo R' : Constante específica del gas R: Constante universal de los gases [8314 J/Kmol °K] M: Masa molecular

Fuente: El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado. [pg.157]

Aplicando las ecuaciones tenemos:

$$R' = \frac{8314}{2,016}$$

$$R' = 4124,3 \text{ J/}^\circ\text{K}$$

Por lo tanto a esas condiciones la densidad del hidrógeno tendríamos:

$$\rho = \frac{300 * 1000}{4124,3 * (273,15 + 80)}$$

$$\rho = 0.206 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Por lo tanto dando como resultado:

Tabla 3.8 Resultado del flujo de hidrógeno a la entrada de la pila de combustible

Masa H_2 Entrada	Q_{H_2} Entrada
$2,9422 \frac{Kg H_2}{h}$	$14,282 \frac{m^3}{h}$

3.10. Autonomía

La autonomía de este vehículo se relaciona en el rango de velocidad que alcanza cuando se lo conduce y en las horas de trabajo en las que funcione, como se puede ver en la tabla 3.3 la potencia del motor eléctrico proporcionara que el vehículo alcance una velocidad determinada, por lo tanto el consumo por cada Kw/h consume una cierta cantidad de masa de hidrógeno, en conclusión la autonomía del vehículo está determinada teóricamente por el tiempo que el vehículo estaría en movimiento a una velocidad fija.

Si el almacenamiento del hidrógeno del tanque del vehículo es de 5, 10 y 15kg respectivamente y la velocidad del vehículo es de 30 km/h, 60km/h y 90km/h la capacidad de tiempo que el vehículo tendría en funcionamiento obtenido ya anteriormente en la tabla 3.3 y 3.6 nos indica los siguientes resultados:

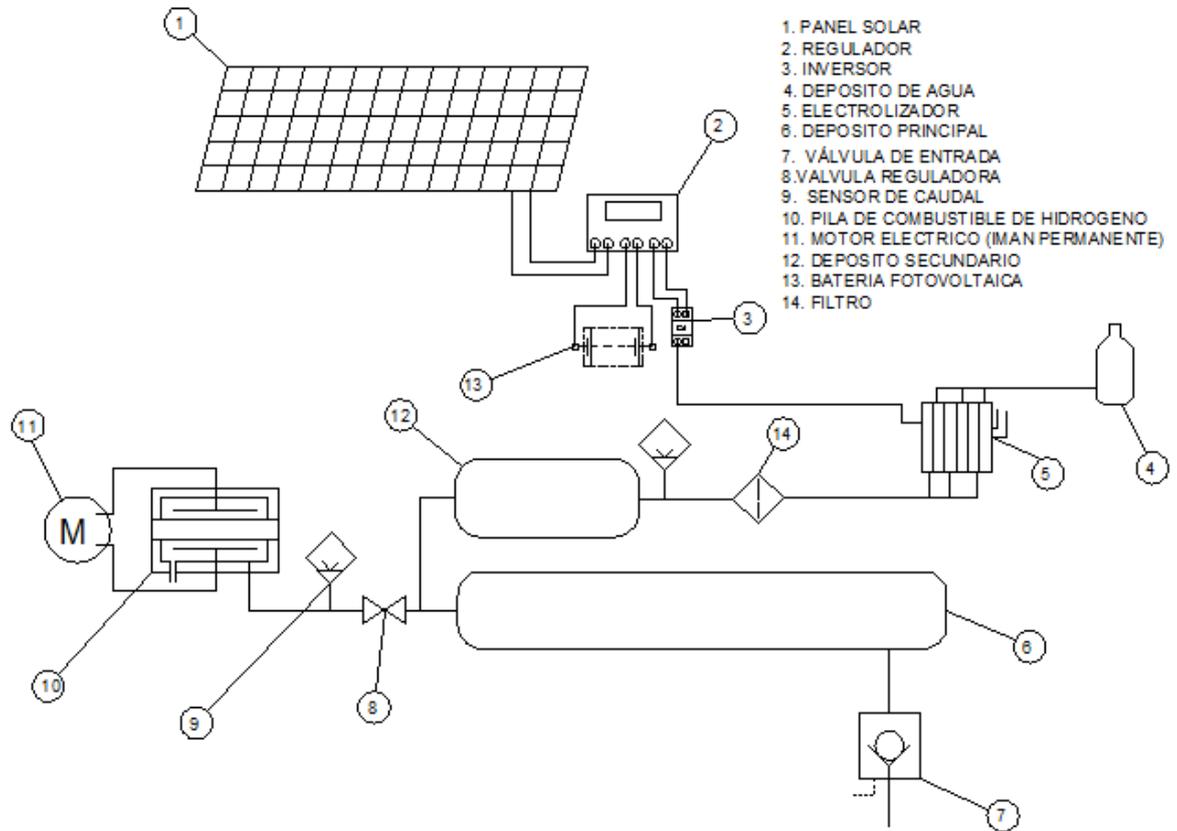
Tabla 3.9. Tiempo de funcionamiento del vehículo en función de la velocidad

VELOCIDAD	Potencia	Cantidad de H2	Tanque de 5Kg	Tanque de 10Kg	Tanque de 15Kg
Km/h	Kw	$\frac{Kg}{h}$	Tiempo horas	Tiempo horas	Tiempo Horas
30	3,9	0,229	21,8	43,6	65,5
60	10	0,588	8,5	17,0	25,5
90	20,5	1,204	4,2	8,3	12,5

Fuente: Elaboración propia del autor

3.11. Esquema y funcionamiento de la pila de combustible de hidrógeno y paneles solares en el vehículo.

Fig. 3.5 Esquema del circuito con pila de combustible de hidrógeno y paneles solares en el vehículo.



Fuente: Elaboración propia del autor

El vehículo ingresa a una zona de abastecimiento de hidrógeno, por diferencia de presiones la válvula de entrada (7) que se muestra en la figura 23, permite el llenado del depósito principal (6) luego para el inicio de marcha del vehículo, la válvula reguladora (8) controlada electrónicamente da paso para la circulación de hidrógeno y llega hasta la pila de combustible, donde empieza la reacción electroquímica dando como resultado la energía para poner en movimiento el motor eléctrico, que gira según la frecuencia que se cree en el campo magnético.

En el día cuando existe la presencia del sol, el panel solar (1) reacciona con la radiación y la energía es transferida al regulador (2) el cual permite la carga de la batería fotovoltaica (13) y la protege cuando está totalmente cargada y además evita que se descargue en exceso, de esa manera circula al inversor (3) el cual rectifica la corriente y la mantiene continua, de manera que reaccionan en los

electrodos del electrolizador (5) conectado a través de un depósito de agua (4) que permite una reacción en el agua para la separación de moléculas, donde las de hidrógeno circulan a través de un orificio y por medio de un conducto llega a un filtro (14) que filtra pequeñas partículas de agua dejando pasar un gas limpio y el flujo de caudal es controlado y analizado para determinar la masa de hidrógeno almacenado en el depósito secundario (12) que se conecta directamente al conducto principal permitiendo adicionar combustible hacia la pila de combustible de hidrógeno según el régimen de potencia que necesite el motor.

Fig.3.6 Válvula de entrada de hidrógeno



Fuente: <http://cochesecho.com/motores-de-hidrogeno-combustion-limpia-historia/>

Cuando no existe la presencia del sol el regulador funciona evitando la descarga de la batería y el electrolizador no actúa.

Es importante indicar que las condiciones de funcionamiento del vehículo para tener más autonomía tendría las posibilidades de manejo de elección por el conductor marcadas a seleccionar en el tablero de instrumentos de esta manera evitar el consumo de combustible por lo tanto circular dentro de la ciudad con una velocidad media mínima constante para evitar el exceso de velocidad y en condiciones de viaje marcar la velocidad máxima para mantenerse en rangos de consumo equivalentes con distancias para mayores eficiencias.

Capítulo IV.

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se van a presentar las principales entidades que están impulsando este desarrollo tecnológico y qué papel están jugando tanto a nivel europeo y mundial, además de mostrar cuales son los líderes en la aplicación de la tecnología del hidrógeno, en particular centros de investigación y empresas, a los cuales acudir para conseguir mayor información.

Se presentara los principales fabricantes de vehículos más reconocidos que buscan la opción de implementar esta tecnología en el mercado y el costo que tendrían para su venta.; también se indica los principales proyectos que se están llevando a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno en zonas estacionarias de abastecimiento y algunas vías de financiación para el lanzamiento de estos proyectos relacionados con las tecnologías del hidrógeno y paneles solares.

4.1. Empresas y centros de investigación

En esta sección se indica los principales centros de investigación, siendo aconsejable en caso de un interés, visitar las páginas web de los centros y empresas nombrados relacionados con las pilas de combustible, se recomienda visitar Fuel Cell Today (<http://www.fuelcelltoday.com>), tiene un directorio industrial bastante completo, que incluye centros de investigación y asociaciones, o Fuel Cells 2.000 (<http://www.fuelcells.org>).

Dentro de los centros de investigación, los más importantes relacionados con la energía química del hidrógeno para las pilas de combustible destacan las organizaciones nacionales, como CIEMAT, CSIC e INTA en España, CEA y CNRS en Francia, ENEA en Italia, Jülich Forschungszentrum y Fraunhofer Institut en Alemania, VTT en Finlandia, ECN en Holanda, JRC de la Comisión Europea, CRES en Grecia, NREL en Estados Unidos, Natural Resources y National Research Council en Canadá, estas organizaciones se dedican a la investigación básica y aplicada preferentemente.¹⁰⁵

¹⁰⁵ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

Las universidades, dentro de sus departamentos de química, ingeniería y materiales son grandes contribuidores al desarrollo de la investigación básica por tanto la lista es tan larga pero se puede destacar la universidad de Québecde troisrivieres, en Canadá ya que es una de las primeras en dedicar la investigación al hidrógeno desde más de una década.¹⁰⁶

Existe interés por parte de las grandes empresas petroleras, de distribución de gas natural, de generación de energía eléctrica, de generación renovable, y de gases industriales pero pocas de ellas invierten un porcentaje para sus investigaciones en la pila de combustible de hidrógeno, también todos los fabricantes de vehículos, han hecho sus incursiones en el desarrollo de implementar esta tecnología tales como es el caso de Toyota, Hyundai, General Motors, Mercedes, BMW o Daimler-Chrysler.¹⁰⁷

4.2. Proyectos a nivel mundial

Los principales proyectos demostrativos actuales de producción de hidrógeno mediante combustibles convencionales se centran en la tecnología de gasificación de carbón con secuestro y captura de CO₂ como el proyecto de Peterhead Power Station en Escocia, el proyecto FUTUREGEN en Estados Unidos, el Carson Hydrogen Power Project, o el proyecto Kwinana en Australia, el primero en almacenar CO₂ en formaciones salinas.¹⁰⁸

Existen algunos proyectos de generación de hidrógeno a partir de las energías renovables, en el uso de la energía fotovoltaica tenemos el proyecto Neunburque consiste en una planta de 370 kW instalados con distintas tecnologías de paneles, como son los monocristalinos, policristalinos y amorfos, la unidad de electrolizadores de baja presión tienen una potencia de 111 kW, y tienen una capacidad de producción de 47 Nm³/h, el esquema de la instalación se muestra a continuación.¹⁰⁹

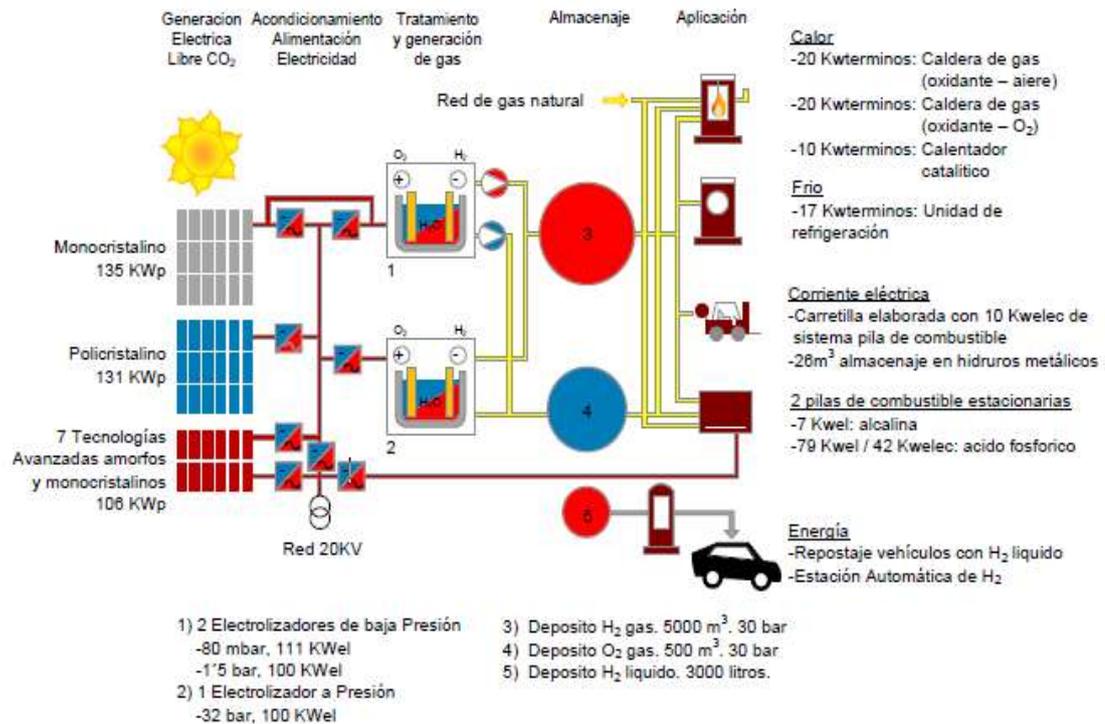
¹⁰⁶ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

¹⁰⁷ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

¹⁰⁸ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

¹⁰⁹ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

Fig.4.1 Esquema de una estación de hidrógeno con paneles solares.



Fuente: Grupo Sanvalero SEAS, Hidrógeno y pilas de combustible pdf. [Capitulo 4]

El uso del hidrógeno en la automoción, se ha divulgado en la mayoría de los fabricantes de automóviles y ven a las pilas PEM como sucesoras de los motores de combustión interna Toyota considera a los vehículos de pila de combustible como una solución prometedora para alcanzar en el futuro el objetivo de cero emisiones y espera tener su prototipo en el mercado para el 2015.¹¹⁰

4.2.1. Financiación de proyectos y búsqueda de ayudas públicas

Abordar un proyecto a nivel empresarial sobre tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible supone un alto riesgo técnico y económico para la entidad que lo asume, debido a la falta de un mercado consolidado y a las limitaciones técnicas. Este sector es una línea estratégica de los programas de ayuda a nivel europeo o incluso nacional de manera que es necesario un análisis de las herramientas disponibles para la financiación para este tipo de proyecto.

En Ecuador existen varios centros de investigación encargados de analizar los proyectos para ser desarrollados en el país, es importante saber que muchos de estos

¹¹⁰ SEAS GRUPO SANVALERO. (2013). **HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**. [En línea]. <<http://www.seas.es/cursos/hidrogeno-y-pilas-de-combustible>>

proyectos se basan en propuestas por tesis de grados generadas por las universidades del país; INER es uno de las principales delegaciones para generar proyectos de investigación también tenemos a CIE que promueve el desarrollo de proyectos de energía limpia y renovable que recurre a empresas de otros países para la inversión de los proyectos en el país conjuntamente aliadas con las universidades.¹¹¹

“En Ecuador existen varios proyectos en marcha que se realizan por medio del uso de las energías renovables, en el año 2007 se analizó la idea de la implementación de una planta de hidrógeno cotizada en un valor aproximado de 10 millones de dólares que estaría ubicada en el oriente ecuatoriano, la persona encargada en este proyecto es el físico Edward Jiménez, director del Centro de Investigaciones de Petroecuador con el objetivo de evitar la contaminación en las plantas generadoras de electricidad de turbo diésel, sin embargo todavía este proyecto se analiza como una probabilidad para el país ya que se necesita abarcar grandes conocimientos y tener una amplia tecnología para ponerlo en marcha.”¹¹²

4.3. Fabricantes de los principales componentes

En esta sección se va indicar las principales empresas que intervienen en la fabricación y construcción de las aplicaciones del sistema de producción del hidrógeno aleadas con los fabricantes de los vehículos FCV, para ello es aconsejable en caso de un interés concreto, visitar las páginas web de los centros y empresas nombradas.

4.3.1. Electrolizadores

Los electrolizadores son construidos para diferentes aplicaciones como uso para industrias, zonas de estaciones de abastecimiento o implementación en vehículos, existen varias empresas en el mundo en la elaboración, construcción e instalación de estos sistemas entre los más principales están los siguientes:

- HYDROGENICS: se encuentran en Canadá, con plantas de producción ubicadas en Alemania y Bélgica.¹¹³
- ARIEMA: distribuye los equipos electrolizadores alcalinos en España y países de habla hispana y electrolizadores polímeros¹¹⁴

¹¹¹ INER. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.** [En línea]. [5 de agosto del 2013]. <<http://www.iner.gob.ec/lineas-de-investigacion/>>

¹¹² EL COMERCIO (2005). **ECUADOR TENDRÁ UNA PLANTA DE HIDRÓGENO.** [En línea]. [7 de agosto del 2013]. <http://www.elcomercio.com/noticias/Ecuador-planta-hidrogeno_0_113389969.html>

¹¹³ HYDROGENICS. **GENERADORES DE HIDRÓGENO.** [En línea]. [28 de octubre del 2013]. <<http://www.hydrogenics.com/products-solutions/industrial-hydrogen-generators-by-electrolysis>>

¹¹⁴ ARIEMA. **ELECTROLIZADORES.** [En línea]. [28 de octubre del 2013]. <<http://www.ariema.com/productos/Electrolizadores.htm>>

- ITM: es una compañía registrada en Inglaterra que se encarga de diseñar y fabricar sistemas de energía de hidrógeno para el almacenamiento de energía y la producción de combustible limpio.¹¹⁵

A continuación se presentan en la tabla, de algunos tipos de electrolizadores.

Tabla 4.1 Electrolizadores comerciales de baja potencia < 17 kW.

Fabricante	Tecnología	kg/día	Presión (bar)	Potencia kW
Hydrofiller 15	Alcalino unipolar	0,9	600	2
Hogen 20	Polimérico	1	13,8	3
Hogen 40	Polimérico	2	13,8	6
Hydrofiller 50	Alcalino unipolar	3	600	7
Teledyne HM-50	Alcalino bipolar	6	7	17

Fig. 4.2: Electrolizador alcalino en las instalaciones de la Fundación Hidrógeno Aragón.



Fuente: <http://www.hidrogenoaragon.org/portfolio-items/electrolisis-alcalina-elygrid-ih/>

4.3.2. Paneles solares

Existen varios países que fabrican y utilizan sus propios paneles solares, entre ellos tenemos en el siguiente orden de mayor a menor producción a Alemania, España, Japón, EE.UU. Italia, Corea del Sur, República Checa, Francia, Bélgica, China, Australia, India, Canadá, Portugal, Suiza, Holanda, Grecia, Austria, Inglaterra,

¹¹⁵ ITM POWER. ACERCA DE ITM. [En línea]. [28 de octubre del 2013]. <<http://www.itm-power.es/acerca-de/>>

México Israel, Malasia, Suecia, Noruega, Bulgaria, Finlandia, Turquía y Dinamarca.¹¹⁶

A medida que se fabrican más paneles solares, el precio de estos va reduciendo para abaratar costos, existen paneles solares de menor calidad pero no quiere decir que duren menos ni que sean malos, sino que el silicio que poseen es mucho menor en porcentajes de este elemento en su construcción y la cantidad de voltaje que ofrecen varia.¹¹⁷

Entre los mayores fabricantes a nivel mundial de paneles solares tenemos a los siguientes:

- ✓ Shell – Siemens Solar
- ✓ China solar
- ✓ BP Solarex
- ✓ Kyocera Solar
- ✓ Astropower Atersa

El precio de la celda fotovoltaica en EE.UU. se encuentra aproximadamente entre 0,65 y 1 \$ por unidad,¹¹⁸ una estación de servicio de hidrógeno por paneles capaces de producir 4 kW o más (basado en 5 horas de sol al día) tendría un costo de \$ 15.000 a \$ 20.000 incluido la instalación, los precios varían en función de la configuración del sistema, el tipo y la marca de los equipos utilizados, la calidad del panel, así como el tamaño de la matriz afecta el precio final de su instalación.¹¹⁹

4.3.3. Pilas de combustible de hidrógeno

Algunas compañías trabajan en el desarrollo de sus propias tecnologías (General Motors, Toyota, Honda), mientras otras Daimler Chrysler, Ford, Nissan, Mazda, Hyundai, entre otras realizan la compra de los sistemas de pilas a fabricantes como Ballard, UTC Fuel Cells, y DeNora,¹²⁰ a continuación algunas de las principales compañías que fabrican las pilas de combustible de hidrógeno.

¹¹⁶ ENERGY & MINING. **PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS: PRODUCCIÓN Y PRECIO.** [En línea]. [29 de abril del 2013]. <<http://www.dani2989.com/matiere1/solar0710es.htm>>

¹¹⁷ ENERGÍAS RENOVABLES HOY. **PRECIOS DE PANELES SOLARES.** [En línea]. [4 de mayo del 2013]. <http://www.renovables hoy.com/hogar/microgeneracion_energia/preciospanelsolar.html>

¹¹⁸ MADE IN CHINA. **PRODUCT CATALOG.** [En línea]. [18 de noviembre del 2013]. <http://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Solar_Panel.html>

¹¹⁹ SOLAR PANELS COST GUIDE. **STATISTICS.** [En línea]. [18 de noviembre del 2013]. <<http://www.solarpanelscostguide.com/>>

¹²⁰ LOZANO ANTONIO - BARRERAS FELIX. **HIDRÓGENO. PILAS DE COMBUSTIBLE DE TIPO PEM.** [En línea]. [29 de abril del 2013]. <<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf>>

Tabla 4.2 Compañías que fabrican las celdas de combustible

NOMBRE	LOCALIZACION	FABRICACION
Ballard Power Systems Inc	Vancouver, Canadá	Suministra las celdas a seis de las diez mayores compañías del mundo del automóvil. También para autobuses, vehículos pesados, generadores de alta potencia y pequeñas celdas para equipos portátiles
International Fuel Cells	Connecticut, EEUU	Celdas para las misiones a Apolo y las lanzaderas Shuttle. Fabrica celdas de hasta 200kW para edificios comerciales
Energy Partners (EP)	Florida, EEUU	Celda de hidrógeno para el mercado del automoción
Energy Research Corporation (ERC)	Connecticut, EEUU	Celdas de carbonato sódico, utilizando metano como combustible y NaCO ₃ , hasta 50 MW
MC Power	Pennsylvania, EEUU	Celdas de óxido sólido (ZrO ₂), combustible carbón pulverizado, potencia entre 200-500MW.
Plug Power, L.L.C.	New York, EEUU	Celdas de combustible reformando gasolina. Mercado del automoción

Fuente: <http://triplenlace.com/2012/06/13/pilas-de-combustible-y-sus-posibles-mejoras-ambientales/>

Todavía aún no se maneja el costo exacto de la pila de combustible de hidrógeno para los automóviles debido al costo de su principal material que es el platino, ya que dentro del mercado su demanda es alta por tener diferentes usos, en la página web oficial del mismo tiene un costo de 1.452 dólares la onza,¹²¹ debido a esto el costo de producción no es grande, además el valor de la pila de hidrógeno depende del tamaño y la aplicación, por ejemplo una de pequeñas dimensiones que funciona

¹²¹ PLATINUM TODAY, PRICE CHARTS. [En línea]. [15 de noviembre del 2013]. <<http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts>>

hasta 2 Watt de potencia para dispositivos electrónicos portátiles se puede comprar al precio de 100 dólares en adelante en EE.UU.¹²²

La empresa principal en el desarrollo de pilas de combustible de hidrógeno Nissan realizó una presentación de la nueva generación de pilas de hidrógeno con un peso de 90 libras que tendría un costo de producción alrededor de los \$ 50.000.¹²³

Fig.4.3: Pila de combustible desarrollada por NISSAN



Fuente: http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/fcv_stack.html

4.3.4. Estaciones de abastecimiento de hidrógeno

En la actualidad existen varias estaciones de servicio de hidrógeno en construcción y funcionamiento, como por ejemplo Estados Unidos se está realizando este desarrollo en el estado de California y su meta es llegar a tener una ruta de estaciones de hidrógeno para los vehículos FCV para el año 2015, la siguiente página web (http://www.afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_locations.html) se indican las zonas en donde se localiza estas estaciones de servicio ya construidas en ese estado.

Existen seis empresas asociadas y tienen un acuerdo para la puesta en marcha para la construcción de una red de estaciones de servicio de hidrógeno en algunas partes del mundo y son Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell y Total.¹²⁴

General Motors utiliza los servicios de Air Liquide, ellos se encargan de desarrollar estaciones para los vehículos con hidrógeno gaseoso a presiones de hasta 700 bares y tienen más de 30 estaciones de hidrógeno en todo el mundo.¹²⁵

¹²² FUELL CELL TODAY. **INDUSTRY DIRECTORY**. [En línea]. [13 de noviembre del 2013]. <http://www.fuelcelltoday.com/industry/industry-directory?pageSize=5&page=3&filter=_&time=>

¹²³ NISSAN MOTOR COMPANY. **FUTURE TECHNOLOGY**. [En línea]. [13 de noviembre del 2013]. <http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/fcv_stack.html>

¹²⁴ HYE. **HACIA LA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDROGENO**. [En línea]. [19 de octubre del 2013]. <<http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/h2-mobility-pila-combustible-hidrogeno/2013101019010300>>

Fig. 4.4 Estación de servicio con electrolizadores y paneles solares



Fuente: California Fuel Cell partnership, driving for the future

La construcción de una estación de abastecimiento de hidrógeno en Estados Unidos tiene el costo de un millón de dólares,¹²⁶ el diseño de una estación debe cumplir algunas normas y requisitos específicos para su construcción, en la siguiente página web (http://www.afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_infrastructure.html) se proporciona los datos para el diseño de una estación de servicio de hidrógeno, junto con algunos códigos de los elementos necesarios y estándares requeridos para su elaboración.

4.3.5. Software para energías renovables.

La aplicación de las energías renovables promueve grandes ventajas al sector económico y medio ambiente de una nación, unir estas energías para ser utilizadas de manera regenerativa se necesita realizar un análisis y cálculo del proyecto para obtener una proyección de los gastos de la inversión necesarias para su elaboración, en la actualidad se encuentran algunas empresas que realizan estos proyectos y utilizan distintos software como respaldo de su trabajo y uno de los más utilizados es HOMER ENERGY el mismo que se lo puede adquirir en la siguiente página web (http://homerenergy.com/Pre_DL.html), simula la operación de un sistema llevando a cabo el cálculo de los flujos de una energía renovable, para y desde cada

¹²⁵ AIR LIQUIDE. ESTACIONES DE REPOSTAJE DE HIDRÓGENO. [En línea]. [18 de noviembre del 2013]. <http://www.es.airliquide.com/es/oferta-air-liquide/hydrogen-energy/hydrogen-energy-nuestra-oferta/estaciones-de-repostaje-de-hidrogeno.html#_Uop8U9Ls9zg>

¹²⁶ SEEKING ALPHA. A MASSIVE HEAD START.[En línea]. [18 de noviembre del 2013]. <<http://seekingalpha.com/article/1723292-ev-shootout-why-the-fuel-cell-wont-beat-the-battery>>

componente del sistema que lo conforma permitiendo conocer si puede o no satisfacer la demanda eléctrica bajo las condiciones que se diseñe además determina el gasto total de la inversión considerando tanto los costos de inversión, como de reemplazo, operación y mantenimiento, así como de combustibles adicionales de esta manera se puede comparar múltiples opciones tecnológicas para un diseño y conocer el ciclo de vida del proyecto.¹²⁷

4.4. Vehículos FCV

Los fabricantes automotrices empiezan a mostrar la nueva generación de vehículos con pila de combustible de hidrógeno, sin embargo se encuentran en un periodo de prueba y adaptación de manera que es impórtate conocer algunos de estos modelos que ya existen y saber el costo que llegarían a tener en el mercado, a continuación se indica los más importantes :

- El modelo Honda FCX, se encuentra en circulación en Japón y Estados Unidos, tiene 57 litros equivale a 4 kg de H₂, con cada kg de hidrógeno se pueden recorrer 100km, por tanto la autonomía de este vehículo es de 400 kilómetros, precio por debajo de los 21.600 dólares. Recuperado de <http://www.motorpasionfuturo.com/coches-hidrógeno/honda-fcx-clarity-1>
- El modelo Toyota FCV-R se encuentra en circulación en Tokio, tiene 5 kilogramos de hidrógeno comprimido a alta presión que le permite viajar más de 500km precio por debajo de los 50.000 dólares. Recuperado de <http://www.motorpasionfuturo.com/coches-hidrógeno/toyota-revela-nuevos-detalles-de-su-vehiculo-de-hidrógeno-fcv-r>
- El modelo Hyundai ix35 se encuentra en circulación en Dinamarca y Suecia, tiene un tanque de 100 litros, alrededor de 5,5 kg de peso garantiza una autonomía de casi 600 km almacena el hidrógeno a una presión de 700 bares, tiene un costo aproximadamente de \$172.000. Recuperado de <http://www.tecmovía.com/2013/05/19/hyundai-ix35-fcev-en-el-salon-de-barcelona-el-coche-de-hidrógeno-existe/>
- El modelo Van Hool, se encuentra en circulación en Europa y Estados Unidos, es un bus de pasajeros, tiene un peso de 31.400 libras, con una pila de combustible de UTC Power, PureMotion 120 kW, un almacenaje de energía por paneles solares fabricados por EnerDel, las baterías de iones de

¹²⁷ CLEANENERGYSOLAR.COM. SOFTWARE GRATUITO PARA EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE ENERGÍAS RENOVABLES. [En línea]. [28 de octubre del 2013]. <<http://www.cleanenergysolar.com/2011/08/20/homer-energy-software-gratuito-para-el-calculo-de-sistemas-hibridos-de-energias-renovables/>>

litio de energía de 17.4 kWh; con una capacidad nominal de 29Ah, tiene 3 tanques de almacenamiento marca Dynetek de Hidrógeno gaseoso, de 40 kg a 5000 psi y ofrece 10.000 horas de operatividad y tiene un precio de 11 millones de dólares. Recuperado de <http://www.zero.no:8082/hynor2/oslo-buss-en/ruter-belgiske-van-hool-er-valgt-som-leverandoer-av-hydrogenbusser-til-oslo-2013-akershus-en>

Conclusiones y recomendaciones

El uso de los combustibles fósiles en el funcionamiento para los motores de combustión interna del vehículo tienen como consecuencia en producir la huella de carbono y el efecto invernadero debido a sus gases de escape, los mismos son designados por tratado de Kioto como los principales gases que dañan y afectan el medio ambiente, por este motivo, se han formado varias investigaciones para obtener nuevas energías que lo sustituyan y en la actualidad existen un proceso de prueba y adaptación de algunas energías limpias o también llamadas "energías verdes" consideradas como un uso alternativo para el funcionamiento del vehículo.

Entre una de las energías limpias se encuentra la pila de combustible de hidrógeno, debido a que utiliza las reacciones químicas del gas de hidrógeno combinada con el oxígeno para producir la energía eléctrica, además de implementar la energía del sol por medio de los paneles solares para la obtención del propio hidrógeno, por consiguiente, dando un resultado positivo para el medio ambiente ya que el vehículo se encontraría funcionando en todo su trayecto sin emitir ningún gas contaminante.

La pila de combustible de hidrógeno es un convertidor electroquímico directo de energía, sin embargo, para conseguir grandes tensiones se deben unir varias celdas en serie, denominado stack y para todo el conjunto de elementos integrados con el stack se le conoce como la pila de combustible de hidrógeno, existen diferentes tipos de celdas, así como la tipo PEMFC ya que es la más utilizada para aplicaciones de automoción y tiene una capacidad de operar a temperaturas relativamente bajas.

La energía obtenida del sol con las celdas fotovoltaicas es una aplicación en función del tiempo de la presencia del sol, sin embargo, este proceso para una gran acumulación de energía necesita de grandes espacios, con cierto número paneles solares unidos entre sí en serie o paralelo dependiendo su aplicación, pero, combinado con la pila de combustible de hidrógeno puede satisfacer grandes demandas en el proceso de la electrolisis para la obtención del gas de hidrógeno, dando ciertos parámetros económicos y un recurso natural para su obtención.

Los cálculos realizados en este estudio para el funcionamiento del vehículo con pilas de combustible de hidrógeno y paneles solares en función del modelo del Toyota Prius, da como resultado que en todo su trayecto a una velocidad determinada consume una cantidad energía para el movimiento del motor eléctrico proporcionada

por la masa de hidrógeno, en conclusión, se comporta como un vehículo eléctrico su relación de consumo está entre la masa de hidrógeno por la potencia del motor eléctrico en un tiempo determinado de funcionamiento; en los vehículos FCV la unidad principal de accionamiento es la pila de hidrógeno la misma que está compuesta por varias celdas de combustible, tiene un tanque de almacenamiento el mismo que proporciona el suficiente hidrógeno para abastecer a la pila de combustible y dar la energía necesaria al motor eléctrico para ponerle en funcionamiento, es decir, solo consume cuando el vehículo se mueve, en posición de reposo y para otros instrumentos eléctricos u accesorios del vehículo no utiliza la energía del hidrógeno para estas condiciones debería tener una energía adicional diferente ya sea una batería de litio-ion u otro mecanismo que no emita gases de escape, considerando que este vehículo no debe contaminar el medio ambiente.

Por otra parte, el panel solar acumulara la energía del sol cuando existe la presencia del mismo, por medio de la acumulación en una batería fotovoltaica para luego obtener el hidrógeno por la electrolisis del agua, en proporciones pequeñas, debido que el almacenaje del gas se da en condiciones normales, ya que se necesitaría un proceso para su compresibilidad por lo tanto una energía adicional que cumpla este proceso.

Cada vez son más los proyectos demostrativos de la investigación del hidrógeno, desde su obtención por energías renovables hasta el uso en pilas de combustible, en el medio de la automoción podemos ver que es una de las opciones que más ha llamado la atención para algunas marcas automotrices sin embargo aún no se consolida en el mercado pero existen varios países y empresas que invierten por promover esta nueva tecnología principalmente tanto a nivel internacional y europeo y se han creado distintos tipos de entidades y organizaciones con el objetivo de preparar y dirigir una estrategia efectiva para llevar al hidrógeno y las pilas de combustible al mercado, con el fin de beneficiarse de todo su potencial económico y medioambiental.

Es importante ir involucrándose en las nuevas tecnologías ya que en pocos años la encontraremos en desarrollo en varios países de manera que nos surgirá inconvenientes por el motivo que en nuestro país todavía no existen planes de su implementación para poderla tenerla en funcionamiento, sin embargo, se necesita de grandes inversiones principalmente en las zonas de abastecimiento de hidrógeno ya

que se necesitaría planificar sus ubicaciones para permitir facilidades de acceso y estimar los costos de venta, por otro lado se necesita realizar una planificación con las antiguas estaciones de gasolina, vehículos descontinuados y lo más importante las consecuencias en el ámbito económico a de los residuos del petróleo en el país.

Se recomienda implementar en el estudio algunos conceptos para analizar a fondo a la pila de combustible de hidrógeno tales como la teoría de los gases, el voltaje de una celda de combustible, el ciclo Carnot, el rendimiento termodinámico de estos dispositivos y, por último, el rendimiento y proceso electroquímico. Además, analizar las características de diseño del vehículo debido a que tiene que vencer la resistencia al avance, determinar el funcionamiento del sistema del freno regenerativo con la batería de litio ion para proporcionar una energía adicional al sistema eléctrico.

Se recomienda implementar el estudio para manejar el software del diseño para zonas de abastecimiento con energías limpias, ya que este tipo de programa da facilidad en el diseño para las estaciones fijas en abastecimiento con cualquier tipo de energía limpia y proporciona configurar de diferentes formas de manera que optimiza un proyecto y puede dar los resultados de los costos de producción e inversión, por lo tanto, se conseguirá una mejor elaboración de cualquier tipo de proyecto en cualquier zona determinada.

BIBLIOGRAFIA

- AGUER, R. & MIRANDA, A. (2007). *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. Díaz de santos.
- BOSCH, R. (2003). *Manual de la técnica del automóvil*. Bosch Stuart.
- CASCAJOSA, M. (2005). *Ingeniería de vehículos sistemas y cálculos*. Alfaomega.
- D`VRIES, A. P., & VÉLEZ M. E. (2011). *Factibilidad del uso de celdas de combustible a base de hidrógeno como energía alternativa para buses de transporte urbano en la ciudad de cuenca*. Universidad del Azuay. Cuenca.
- GONZÁLEZ, G. I. (2008). *Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios*. Paraninfo.
- LLORCA, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético*. Upc.
- MADRID, V. (2009). *Energías renovables fundamentos, tecnologías y aplicaciones: solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidráulica, pilas de combustible, cogeneración y fusión nuclear*. Mundi prensa.
- SÁNCHEZ, A. M. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa.
- TENA, J. G. (2009). *Circuitos electrotécnicos básicos*. Paraninfo.
- VARGAS, L., QUICENO C., Sanjuanes C. (2000). *Diseño y construcción de un generador prototipo de energía mediante paneles solares –hidrógeno celda de combustible*. Universidad Francisco José de caldas. Bogotá.
- YUQUILIMA, P. F. & VINTIMILLA, G. E. (2012). *Implementación en un vehículo con motor Otto de un sistema de alimentación de combustible nafta – hidrógeno*. Universidad del Azuay. Cuenca.
- ZAMBRANO D. (2013). *Curso de graduación: Funcionamiento y mantenimiento de vehículos híbridos*. Universidad del Azuay. Cuenca.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS:

académica. (s.f.). Recuperado el 9 de julio del 2013, de académica:
<http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/quimica/infocab/unidad118.html>,

Energía libre y espontaneidad

air liquide. (s.f.). Recuperado el 18 de noviembre del 2013, de air liquide:
<http://www.es.airliquide.com/es/oferta-air-liquide/hydrogen-energy/hydrogen-energy-nuestra-oferta/estaciones-de-repostaje-de-hidrogeno.html#uop8u9ls9zg>,

Estaciones de repostaje de hidrógeno

altereco. (s.f.). Recuperado el 06 de junio del 2013, altereco:
<http://altereco21.org/productos-y-servicios/ahorradores-de-combustible/propiedades-del-hidrogeno-y-del-hho/>,

Propiedades del hidrógeno y del hho

ariema.com. (s.f.). Recuperado el 28 de octubre del 2013, de ariema.com:
<http://www.ariema.com/productos/electrolizadores.htm>, Electrolizadores.

<artículo de pablo f.> Recuperado el 27 de marzo del 2013, de artículo de Pablo F.: http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/e_biocombus.htm#introduc, Los biocombustibles.

autos híbridos. (s.f.). Recuperado el 31 de marzo del 2013, de autos híbridos:
<http://autoshibridos-tarea.blogspot.com/2012/05/el-impacto-de-las-baterias.html>, Artículo. autos híbridos.

auto.idoneos.com. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de auto.idoneos.com:
http://auto.idoneos.com/index.php/notas_tecnicas/toyota_prius_hibrido, Toyota Prius híbrido: funcionamiento del vehículo híbrido.

automotriz.biz. (s.f.). Recuperado el 06 de junio del 2013, de automotriz.biz:
<http://www.automotriz.biz/coches/fuels/alternativefuels/134081.html>, Coche español: Historia de los coches con motor a hidrógeno.

autos.univision.com (s.f.). Recuperado el 31 de marzo del 2013, de autos.univision.com: <http://autos.univision.com/hibridoselectricos/article/2011-03-09/los-hibridos-contaminan-mas>, Híbridos & eléctricos.

Avele. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de Avele: http://www.avele.org/index.php?option=com_content&view=article&id=17&itemid=23, El vehículo eléctrico

biokit. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de biokit: <http://www.biokitmotor.com/info/bioetanol>, Bioetanol y los biocombustibles

carbonfootprint. (s.f.). Recuperado el 12 de junio del 2013, de carbonfootprint: <http://www.carbonfootprint.com/carbonsoftware.html>, Huella de carbono.

celdassolares.net. (s.f.). Recuperado el 4 de mayo del 2013, de celdassolares.net: <http://celdassolares.net/>, Celdas solares para el diseño de paneles fotovoltaicos

circulaseguro.com (s.f.). Recuperado el 31 de marzo del 2013, de [circulaseguro.com](http://www.circulaseguro.com): <http://www.circulaseguro.com/en-el-2020-los-vehiculos-deberan-emitir-95-gr-km-de-co2/>, Movilidad sostenible.

cleanenergysolar.com. (s.f.). Recuperado el 28 de octubre del 2013, de [cleanenergysolar.com](http://www.cleanenergysolar.com): <http://www.cleanenergysolar.com/2011/08/20/homer-energy-software-gratuito-para-el-calculo-de-sistemas-hibridos-de-energias-renovables/>, Software gratuito para el cálculo de sistemas de energías renovables.

comoves.unam.mx. (s.f.). Recuperado el 3 de junio del 2013, de [comoves.unam.mx](http://www.comoves.unam.mx): <http://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/123/los-biocombustibles>, Los biocombustibles.

cubasolar.cu. (s.f.). Recuperado el 03 de junio del 2013, de [cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu): <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia22/html/articulo04.htm>, Artículo. Ing. Bárbaro Lugones López: Análisis de biodigestores.

ecologismo.com (s.f.). Recuperado el 03 de junio del 2013, de [Ecologismo.com](http://www.ecologismo.com): <http://www.ecologismo.com/2008/08/21/gases-del-efecto-invernadero-gases-fluorados/>, Gases del efecto invernadero, gases fluorados.

ecomotriz. (s.f.). Recuperado el 05 de junio del 2013, [ecomotriz](http://www.ecomotriz.com): <http://www.ecomotriz.com/2011/10/hidrogeno-ventajas-y-desventajas/#.uaslts9zg>, Hidrógeno y pilas de combustible, ventajas y desventajas.

educamix. (s.f.). Recuperado el 11 de julio del 2013, de educamix: http://platea.pntic.mec.es/pmarti1/educacion/3_eso_materiales/b_v/conceptos/conceptos_bloque_5_5.htm, Ácidos y bases.

energy. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de Energy: <http://www.fueleconomy.gov/feg/esbiodiesel.shtml>, Biodiesel.

energíasrenovables hoy.com. (s.f.). Recuperado el 4 de mayo del 2013, de [energíasrenovables hoy.com](http://www.renovables hoy.com):

http://www.renovables hoy.com/hogar/microgeneracion_energia/preciospanelsolar.html, Precios de paneles solares

energíasostenibleparatodos. (s.f.). Recuperado el 29 de abril del 2013, de [energíasostenibleparatodos](http://www.energia2012.es/sites/default/files/hidr%C3%B3geno.%20pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20pem.pdf):

<http://www.energia2012.es/sites/default/files/hidr%C3%B3geno.%20pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20pem.pdf>, Pilas de combustible de tipo PEM.

elcomercio.com (2005) (s.f.). Recuperado el 7 de agosto del 2013, del [elcomercio.com](http://www.elcomercio.com): http://www.elcomercio.com/noticias/ecuador-planta-hidrogeno_0_113389969.html, Ecuador tendrá una planta de hidrógeno.

electricidadgratuita.com (s.f.). Recuperado el 7 de noviembre del 2013, de [electricidadgratuita.com](http://www.electricidadgratuita.com): http://www.electricidadgratuita.com/bateria_solar_conceptos.html, Capacidad en amperios hora.

Electricmotors. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de [electricmotors](http://electricmotorsccc.blogspot.com/2008/10/ventajas-y-desventajas.html): <http://electricmotorsccc.blogspot.com/2008/10/ventajas-y-desventajas.html>, Ventajas y desventajas

energy & mining. (s.f.). Recuperado el 29 de abril del 2013, de [energy & mining](http://www.dani2989.com/matiere1/solar0710es.htm): <http://www.dani2989.com/matiere1/solar0710es.htm>, Paneles solares fotovoltaicos: Producción y precio

enter.com. (s.f.). Recuperado el 25 de marzo del 2013, de [enter.com](http://www.enter.co/autotecnologia/fuentes-de-energia-para-los-vehiculos-%c2%bfdiremos-adios-a-la-gasolina): <http://www.enter.co/autotecnologia/fuentes-de-energia-para-los-vehiculos-%c2%bfdiremos-adios-a-la-gasolina>, Fuentes de energía para los vehículos.

erenovable. (s.f.). Recuperado el 21 de marzo del 2013, de *erenovable*:
<http://erenovable.com/energias-limpias/>, Energías limpias.

fisicanet.com (s.f.). Recuperado el 9 de julio del 2013, de *fisicanet.com*:
http://www.fisicanet.com.ar/quimica/electrolisis/ap07_electrolisis.php#.udxxftvs9zg, Química electroquímica.

fuelcelltoday.com (s.f.). Recuperado el 13 de noviembre del 2013, de
fuelcelltoday.com: http://www.fuelcelltoday.com/industry/industry-directory?page=5&page=3&filter=_&time=, Industry directory.

guioteca.com. (s.f.). Recuperado el 4 de junio del 2013, de *guioteca.com*:
<http://www.guioteca.com/autos/hidrogeno-el-combustible-del-futuro-en-los-autos/>, Hidrógeno: El combustible del futuro en los autos.

guioteca.com (s.f.). Recuperado el 4 de junio del 2013, de *guioteca.com*:
<http://www.guioteca.com/autos/hidrogeno-el-combustible-del-futuro-en-los-autos/>, Hidrógeno: el combustible del futuro en los autos.

greensolutions.com. (s.f.). Recuperado el 12 de junio del 2013, de
greensolutions.com: <http://www.greensolutions.cl/gshuelladecarbono.html>, Huella de carbono.

híbridos y eléctricos. (s.f.). Recuperado el 19 de octubre del 2013, híbridos y eléctricos: <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/h2-mobility-pila-combustible-hidrogeno/2013101019010300>, Hacia la pila de combustible de hidrógeno.

hydrogencarsnow.com. (s.f.). Recuperado el 21 de agosto del 2013, de
hydrogencarsnow.com: <http://www.hydrogencarsnow.com/gm-electrovan.htm>, 1966 Electrovan gm.

Hydrogenics.com. (s.f.). Recuperado el 28 de octubre del 2013, de *hydrogenics*:
<http://www.hydrogenics.com/products-solutions/industrial-hydrogen-generators-by-electrolysis>, Generadores de hidrógeno

huelladecarbono.es (s.f.). Recuperado el 31 de marzo del 2013, de lahuelladecarbono.es: <http://www.huellacarbono.es/apartado/general/reducir-huella-co2.html>, Como reducir la huella de carbono.

iner.gob.ec. (s.f.). Recuperado el 5 de agosto del 2013, de iner: <http://www.iner.gob.ec/lineas-de-investigacion/>, Línea de investigación.

industria y servicios. (s.f.). Recuperado el 31 de marzo del 2013, de industria y servicios: <http://blogs.creamoselfuturo.com/industria-y-servicios/2008/05/05/el-impacto-medio-ambiental-que-producen-los-biocombustibles/>, El impacto medio ambiental que producen los biocombustibles.

itm-power. (s.f.). Recuperado el 28 de octubre del 2013, de itm-power: <http://www.itm-power.es/acerca-de/>, Acerca de itm.

jambitz.com (s.f.). Recuperado el 9 de octubre del 2013, de jambitz.com: <http://www.jambitz.com/a-prueba-ford-focus-de-hidrogeno-fcv/>, Ford Focus de hidrógeno fcv.

kyocera. (s.f.). Recuperado el 14 de octubre del 2013, de kyocera: http://www.kyocerasolar.es/index/news/previous_news/news_archive_detail.13nrbgfyx2vszwn0cmljx3n5c3rlbxmvmv3cy8ymda5l0tzt0nfukffc3vtaw5pc3ryyv9tb2r1bg9zx3nrbgfyxznfcgyyv9lbf9udwv2b19ub3lvdgffuhjpdxm~.html Kyocera suministra módulos solares para el Toyota Prius

lanacion.com. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013 de lanacion.com: <http://www.lanacion.com.ar/771859-los-motores-flex-dominan-el-mercado-en-brasil>, Los motores flex dominan el mercado en Brasil.

la web de las energías renovables. (s.f.). Recuperado el 6 de mayo del 2013, de la web de las energías renovables: <http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/contruir-panel-solar-fotovoltaico-parte-1/>, Construcción de un panel solar.

lenntech. (s.f.). Recuperado el 4 de junio del 2013, de lenntech: <http://www.lenntech.es/electrolisis.htm>, La electrolisis.

losorigenes.net. (s.f.). Recuperado el 06 de junio del 2013, de losorigenes.net:http://losorigenes.net/curiosidades/pila_combustible/pila_combustible.html, Historia del automóvil a través de sus marcas. pila de combustible

madeinchina.com. (s.f.). Recuperado el 18 de noviembre del 2013, de madeinchina.com: http://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/solar_panel.html, Product catalog.

magazine.com (s.f.). Recuperado el 4 de junio del 2013, de magazine.com: [http://www.ibecmagazine.com/tecnolog%
c3%8dagadgets/tabid/459/artmid/1165/
articleid/83/la-pila-de-hidr243geno-nueva-tecnolog237a-para-la-
contaminaci243n-ambiental.aspx](http://www.ibecmagazine.com/tecnolog%c3%8dagadgets/tabid/459/artmid/1165/articleid/83/la-pila-de-hidr243geno-nueva-tecnolog237a-para-la-contaminaci243n-ambiental.aspx), Pila de hidrógeno nueva tecnología para la contaminación ambiental.

mecánicoscostarica.com. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de mecánicoscostarica.com:<http://www.mecanicoscstarica.com/articulos/fuel%20flex.htm>, Los vehículos con la tecnología “fuel-flex”.

micartago.com. (s.f.). Recuperado el 03 de junio del 2013, de micartago.com: <http://www.micartago.com/index.php?news=3425>, Impacto ambiental de chancheras.

modelomotor.com (s.f.). Recuperado el 18 de septiembre del 2013 de modelomotor.com: <http://www.modelomotor.com/toyota-prius.html>, Toyota Prius.

motordehidrógeno.net (s.f.). Recuperado el 06 de junio del 2013, de motordehidrógeno.net: <http://www.motordehidrógeno.net/que-es-el-motor-de-hidrógeno>, Motor de hidrógeno. ¿Qué es el motor de hidrógeno?

motor full. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, motor full: <http://motorfull.com/2011/04/el-primer-automovil-hibrido-del-mundo>, el primer vehículo híbrido del mundo

motorfull.com (s.f.). Recuperado el 31 de marzo del 2013, de motorfull.com: <http://motorfull.com/2010/09/la-dura-incertidumbre-de-los-vehiculos-electricos-en-el-futuro>, La dura incertidumbre de los vehículos eléctricos en el futuro.

mundo solar. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de mundo solar: <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/historia-de-los-autos-solares/>, Historia de los autos solares.

niche.com (s.f.). Recuperado el 18 de junio del 2013, de niche: <http://solete.nichese.com/componentes.html>, Componentes fotovoltaicos

nissa motor company. (s.f.). Recuperado el 13 de noviembre del 2013, de nissa motor company: http://www.nissan-global.com/en/technology/overview/fcv_stack.html, Future technology.

paseando historia. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de paseando historia: <http://paseandohistoria.blogspot.com/2011/04/el-primer-coche-electrico-de-la.html>, El primer coche eléctrico de la historia.

pino a. [Octubre 2009]. (s.f.). Recuperado el 26 de junio del 2013, de PINO A: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/%c3%8dndice+general.pdf>, Tesis: "Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. el caso de la producción de hidrógeno" universidad de Sevilla.

planthogar.net. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de planthogar.net: <http://www.planthogar.net/encyclopedia/jump.asp?doc=00000293.htm>, Que es el biogás.

platinumtoday. (s.f.). Recuperado el 15 de noviembre del 2013, de platinum today: <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts>, Price charts.

quemotores.com. (s.f.). Recuperado el 28 de marzo del 2013, de quemotores.com: <http://www.quemotores.com/funcionamiento-de-los-autos-solares/>, Funcionamiento de los autos solares.

quiminet.com. (s.f.). Recuperado el 9 de julio del 2013, de quiminet.com: <http://www.quiminet.com/articulos/los-diferentes-tipos-de-electrolizadores-y-sus-caracteristicas-2704580.htm>, Electrolizadores.

renovablesverdes.com. (s.f.). Recuperado el 12 de junio del 2013, de renovablesverdes.com: <http://www.renovablesverdes.com/la-huella-de-carbono-y-las-energias-renovables/>, La huella de carbono y las energías renovables.

Renovables verdes. (s.f.). Recuperado el 27 de marzo del 2013, de renovables verdes: <http://www.renovablesverdes.com/origenes-e-historia-de-los-biocombustibles/>, Energías renovables y verdes. orígenes e historia de los biocombustibles.

sagarpa. (s.f.). Recuperado el 27 de marzo del 2013, de sagarpa: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/introduccion/generaciones-de-los-biocombustibles.html>. Generaciones de los biocombustibles.

seeking alpha. (s.f.). Recuperado el 18 de noviembre del 2013, de seeking alpha: <http://seekingalpha.com/article/1723292-ev-shootout-why-the-fuel-cell-wont-beat-the-battery>, A massive head start.

solarpanelscostguide.com. (s.f.). Recuperado el 18 de noviembre del 2013, de solarpanelscostguide.com: <http://www.solarpanelscostguide.com/>, *Statistics*.

soliclima.es. (s.f.). Recuperado el 17 de julio del 2013, de Soliclima.es. <http://www.modulosfotovoltaicos.com/>, Módulos fotovoltaicos.

tausolar. (s.f.). Recuperado el 2 de abril del 2013, de tausolar: http://tausolar.solarstromag.net/upload/v12_file_d33_5.pdf, Energía solar fotovoltaica y medio ambiente.

tedel.org (s.f.). Recuperado el 03 de junio del 2013, de tedel.org: http://tedel.org/nuestroambiente/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=. Impactos ambientales de la energía solar y eólica.

tendencias21.net. (s.f.). Recuperado el 4 de junio del 2013, de tendencias21.net: http://www.tendencias21.net/el-hidrogeno-puede-ser-mas-danino-para-el-medio-ambiente-que-los-combustibles-fosiles_a187.html, Tendencias sociales. el hidrógeno puede ser más dañino para el medio ambiente que los combustibles fósiles.

Universidad de Matanzas. (s.f.). Recuperado el 4 de junio del 2013, de *Universidad de Matanzas "Camilo sin fuegos"*: <http://monografias.umcc.cu/monos/2011/FACULTAD%20DE%20INGENIERIA/mo11fie7.pdf>, Pila de combustible, una alternativa importante en el desarrollo energético.

web de las energías renovables. (s.f.). Recuperado el 6 de mayo del 2013, de web de las energías renovables: <http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/contruir-panel-solar-fotovoltaico-parte-1/>, Panel solar fotovoltaico

wired.com (s.f.). Recuperado el 14 de octubre del 2013, de [wired.com](http://www.wired.com): <http://www.wired.com/autopia/2008/12/the-solar-prius/>, Paneles solares.

ANEXOS

ANEXO1. ECUACIÓN DE LA ENERGÍA LIBRE DE GIBBS

Todo enunciado en la termodinámica a lo largo de los años es a base de experimentos y análisis, por lo tanto, para descomponer una molécula de agua se relaciona la energía libre de Gibbs y el trabajo eléctrico.

La determinación de la función de Gibbs es la variación total aplicada a la reacción química, por lo tanto, su ecuación esta determina de la siguiente manera:

$$\Delta g = \sum v_j g_{Bj} - \sum v_i g_{Ai}$$

Donde, g_{Bj} es la energia libre molar del componente B_j y g_{Ai} es la energía libre del componente A_j . Suponiendo que la reacción transcurre a la temperatura T y presión p, de manera que se tiene lo siguiente:

$$\Delta g = \sum v_j (h_{Bj} - T s_{Bj}) - \sum v_i (h_{Ai} - T s_{Ai})$$

$$\Delta g = \sum v_j h_{Bj} - T \sum v_j s_{Bj} - \left[\sum v_i h_{Ai} - T \sum v_i s_{Ai} \right]$$

$$\Delta g = \sum v_j h_{Bj} - \sum v_i h_{Ai} + T \sum v_i s_{Ai} - T \sum v_j s_{Bj}$$

$$\Delta g = \sum v_j h_{Bj} - \sum v_i h_{Ai} - T \left(\sum v_j s_{Bj} - \sum v_i s_{Ai} \right)$$

Por lo tanto la variación de entalpia (Δh) es $\sum v_j h_{Bj} - \sum v_i h_{Ai}$ y la variación de entropía (Δs) es $\sum v_j s_{Bj} - \sum v_i s_{Ai}$ por lo tanto quedando así la expresión libre de Gibbs:

$$\Delta g = \Delta h - T \Delta s$$

Si el trabajo eléctrico se trata de un proceso finito, se cumplirá en magnitudes molares

$$-\Delta g \geq w_{elec}$$

El valor máximo coincidirá con el valor de la variación negativa de la función de Gibbs

$$w_{max} = -\Delta g$$

Por lo tanto se tiene:

$$W_{elec} = -\Delta g$$

$$W_{elec} = n \times F \times \varepsilon$$

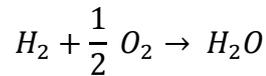
Sustituyendo las variables y utilizando los procesos matemáticos, el potencial eléctrico es:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta g}{n \times F}$$

Y la constante de Faraday es igual al producto del número de electrones en un mol $6,0238 \times 10^{23}$ por la carga de electrones $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

ANEXO2. REACCIÓN QUÍMICA DEL AGUA

Para la reacción química del agua se analiza desde su composición molecular:



Se determina aplicando en condiciones normales que es la variación de entalpia molar a 25 ° C y 1 atmosfera y utilizando la siguiente ecuación en función del volumen normal y su entalpia.

$$\Delta h = v_{H_2O} h_{F,H_2O} - (v_{H_2} h_{F,H_2} + v_{O_2} h_{F,O_2})$$

Volumen molar	Entalpia
$v_{H_2} = 1 \text{ Kmol } H_2 / \text{ Kmol } H_2O$	$h_{H_2} = 0 \text{ MJ/Kmol}$
$v_{O_2} = 0,5 \text{ Kmol } O_2 / \text{ Kmol } H_2O$	$h_{O_2} = 0 \text{ MJ/Kmol}$
$v_{H_2O} = 1 \text{ Kmol } H_2O / \text{ Kmol } H_2O$	$h_{H_2O} = -241,82 \text{ KJ/Kmol}$

Por lo tanto sustituyendo los datos, se tiene:

$$\Delta h = 1 \text{ Kmol } H_2O / \text{ Kmol } H_2O (-241,82 \text{ KJ/Kmol})$$

$$\Delta h = -241,820 \text{ KJ/Kmol}$$

Aplicando la energía libre de Gibbs, según su fórmula molecular se tiene:

$$\Delta g = v_{H_2O} g^o_{H_2O} - (v_{H_2} g^o_{H_2} + v_{O_2} g^o_{O_2})$$

$$\Delta g = 1(h^o_{H_2O} - Ts^o_{H_2O}) - [1(h^o_{H_2} - Ts^o_{H_2}) + 0.5(h^o_{O_2} - Ts^o_{O_2})]$$

$$\Delta g = h^o_{H_2O} - (h^o_{H_2} + 0.5h^o_{O_2}) - T [s^o_{H_2O} - (s^o_{H_2} + 0.5s^o_{O_2})]$$

$$\Delta g = -285,830 - 0 - 0 - 298,15 [69,95 - (130,6 + 0.5 \times 205,03)]$$

$$\Delta g = -285,830 - 298,15 \times 163,15$$

$$\Delta g = -237,187 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

De esta manera es la energía que se necesita para descomponer la molécula del agua, ahora combinando con el trabajo eléctrico, se determina el potencial eléctrico para su descomposición:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta g}{n \times F}$$

$$\varepsilon = \frac{-237,187}{2 \times 96,487}$$

$$\varepsilon = 1.23 \text{ v}$$

ANEXO 3. VOLTAJE DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Se considera que la celda de combustible funciona a una temperatura y presión constante, de manera que, se utiliza el cambio de energía libre de Gibbs a partir del balance de la energía del sistema

Para determinar el máximo trabajo de la celda de combustible debe ser igual al cambio de energía libre de Gibbs de la reacción

$$W_{elect} = -n F \epsilon = \Delta G$$

De manera que, utilizando tablas con los valores de la entalpia y entropía se selecciona del agua, hidrógeno y oxígeno para poder determinar el valor de la combinación como se indica a continuación:

Variación de la entropía ΔS :

$$\Delta S = S_{H_2O} - (S_{H_2} + 0,5S_{O_2})$$

$$\Delta S = 69,65 - [130,06 + (0,5 \times 205,03)]$$

$$\Delta S = 163,15 \frac{KJ}{Kmol \text{ } ^\circ K}$$

Variación de la entalpia ΔH

$$\Delta H = H_{H_2O} - (H_{H_2} + 0,5H_{O_2})$$

$$\Delta H = -285,830 - (0 + 0)$$

$$\Delta H = -285,830$$

Por lo tanto la energía libre de Gibbs en la celda de combustible es:

$$\Delta g = \Delta h - T\Delta s$$

$$\Delta G = -285,830 - [(273,15 + 78)(163,15 \times 10^{-3})]$$

$$\Delta G = -228,53 \frac{MJ}{Kmol}$$

Combinando la energía libre de Gibbs con el trabajo eléctrico, el potencial eléctrico es:

$$\epsilon = \frac{228,53}{2 \times 9687}$$

$$\epsilon = 1,18 \text{ v}$$

En la práctica el voltaje es menor por consecuencia de la temperatura y la presión además de la combinación y concentración del gas.