

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA PARA  
ABASTECIMIENTO DE AGUA DE GRANJA AUTOSOSTENIBLE  
ALIMENTADAPOR UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN AUTÓNOMA DE  
ENERGÍA ALTERNATIVA.**

**REINEL ALARCON BAQUIRO  
JOSE DAVID FUENTES VILLALOBOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA PARA  
ABASTECIMIENTO DE AGUA DE GRANJA AUTOSOSTENIBLE ALIMENTADA  
POR UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN AUTÓNOMA DE ENERGÍA  
ALTERNATIVA.**

**JOSE DAVID FUENTES VILLALOBOS**

**REINEL ALARCON BAQUIRO**

**Trabajo de grado para optar título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

# CONTENIDO

	<b>Pág</b>
INTRODUCCIÓN .....	18
1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	20
2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	21
3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO .....	23
3.1 Objetivo General .....	23
3.1.1Objetivos Específicos.....	23
4 HIDRÓGENO COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA .....	25
4.1 ANTECEDENTES .....	25
4.2 HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	26
4.3 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO .....	28
4.4 ECONOMÍA DE HIDRÓGENO.....	32
4.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL HIDRÓGENO .....	34
4.5.1 Ventajas .....	34
4.5.2 Desventajas .....	35
5 PROPIEDADES, OBTENCIÓN Y USOS DEL HIDRÓGENO .....	37
5.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIDRÓGENO.....	37
5.1.1 Estado.....	37
5.1.2 Propiedades organolépticas y toxicidad.....	40
5.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL HIDRÓGENO .....	42
5.2.1 Contenido de energía. ....	42

5.2.2 Densidad de la energía .....	43
5.2.3 Inflamabilidad del hidrogeno .....	44
5.2.4 Rango de inflamabilidad.....	46
5.2.5 Temperatura de autoencendido.. .....	48
5.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO .....	49
5.3.1 Electrólisis.....	51
5.3.2 Descomposición de gas natural por arco de plasma.....	54
5.3.3 Termólisis.....	54
5.3.4 Reformado. . . . .	55
5.3.5 Gasificación.....	56
5.3.6 Bio-fotólisis.....	56
5.3.7 Fermentación oscura.. . . .	57
5.4 APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO EN LA INDUSTRIA .....	57
5.4.1 Hidrógeno en la Industria Química.....	57
5.4.2 Hidrógeno en la Industria Metalúrgica.....	59
5.4.3 Motores de combustión.....	59
5.5 APLICACIONES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	60
5.6 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	62
5.6.1 Tipo de celdas de combustible.....	64
5.6.2 Aspectos ambientales en las celdas de combustibles.. . . .	67
5.6.3 Ventajas en la selección de las celdas de combustible.....	68
5.6.4 Desventajas de las celdas de combustible. . . . .	71
5.6.5 Desempeño ideal de la celda.....	71
5.6.6 Energía libre de Gibbs. . . . .	76

5.6.7 Voltaje generado por una celda de combustible. ....	79
5.6.8 Eficiencia real e ideal en una celda de combustible.....	81
6 DISEÑO DEL SISTEMA.....	84
6.1 DISEÑO CONCEPTUAL .....	85
6.1.1 Diseño conceptual para el subsistema de transporte de fluido. ....	86
6.1.2 Diseño conceptual para el abastecimiento de energía de la bomba. ....	89
6.1.3 Diseño conceptual para el subsistema de generación de hidrógeno .....	92
6.1.4 Diseño conceptual para el subsistema de almacenamiento de hidrógeno....	93
6.1.5 Diseño del subsistema de potencia para la producción del hidrogeno por electrolisis. ....	101
7 CÁLCULOS Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.....	106
7.1 SUBSISTEMA DE TRANSPORTE DE FLUIDO.....	107
7.1.1 Cálculo de pérdidas en tuberías.....	110
7.1.2 Cálculo de pérdidas en accesorios. ....	111
7.1.3 Curva de funcionamiento del sistema. ....	112
7.1.4 Determinación de la eficiencia de la bomba.....	113
7.2 SUBSISTEMA DE POTENCIA PARA LA BOMBA .....	115
7.2.1 Componentes de la celda. ....	117
7.3 SUBSISTEMA DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO 120	
7.4 SUBSISTEMA DE POTENCIA PARA LA PRODUCCIÓN DEL HIDROGENO POR ELECTROLISIS .....	123
7.4.1 Cálculos para la selección de los paneles solares.....	124
7.5 Definiciones.....	131

8 ESTUDIO FINANCIERO PARA DESARROLLAR UN PROYECTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOSTENIBLE CON HIDRÓGENO EN ZONAS RURALES .....	137
8.1 MATEMÁTICAS FINANCIERAS .....	137
8.2 EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN .....	137
8.3 FACTIBILIDAD FINANCIERA .....	137
8.4 RENTABILIDAD .....	138
8.5 CRITERIOS EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS .....	138
8.5.1 Ingreso de los proyectos. ....	138
8.5.2 Inversión en el proyecto. ....	138
8.5.3 Gastos de operación de proyecto. ....	138
8.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RESPECTO AL SERVICIO PÚBLICO QUE OFRECE LA COMPAÑÍA ESSA .....	139
8.7 AHORRO DE DINERO ESPERADO .....	139
8.7.1 Calculo del VPN Sistema de generación de 30 Watt a partir del hidrógeno..	
140	
8.7.2 Estimación del costo sin la producción de energía con hidrógeno.....	142
8.7.3 Calculo del VPN para un Sistema de generación de 5000 Watt a partir de hidrógeno.. .	147
9 CONCLUSIONES .....	150
BIBLIOGRAFIA.....	152

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág</b>
<i>Tabla 1. Propiedades generales del hidrógeno</i> .....	38
Tabla 2. Cuadro comparativo masa-volumen del hidrógeno.....	40
Tabla 3. Densidad de energía de algunos combustibles .....	44
Tabla 4. Inflamabilidad de algunos combustibles.....	45
Tabla 5. Temperatura de autoencendido de algunos combustibles.....	49
Tabla 6. Principales métodos de obtención de Hidrógeno .....	51
Tabla 7. Tabla comparativa de emisiones contaminantes entre diversos tipos de vehículos.....	68
Tabla 8. Reacciones electroquímicas en las celdas de combustibles.....	72
Tabla 9. Ecuación de Nernst asociada a cada celda .....	73
Tabla 10. Requerimientos organizados y valorados. ....	86
Tabla 11. Bombas y sus especificaciones .....	87
Tabla 12. Matriz de calidad de la bomba. ....	88
Tabla 13. Resultados ponderados .....	89
Tabla 14. Factores de valoración de la selección de la celda de combustible .....	89
Tabla 15. Diferentes tipos de celdas de combustible.....	90
Tabla 16. Matriz de calidad para la celda de combustible .....	91
Tabla 17. Ponderación de la matriz de calidad para la celda de combustible.....	92
Tabla 18. Clasificación de los cilindros de gas a alta presión .....	93
Tabla 19. Algunos importantes compuestos intermetálicos formadores de hidruro .....	98
Tabla 20. Factores de valoración para almacenar hidrógeno .....	99
Tabla 21. Matriz de calidad para el almacenamiento de hidrógeno .....	99
Tabla 22. Resultados ponderados para el almacenamiento de hidrógeno .....	100

Tabla 23. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaicas.....	102
Tabla 24. Cálculo de pérdida en tuberías .....	110
Tabla 25. Datos de la bomba .....	112
Tabla 26. Cuadro comparativo de las celdas que se encuentran en el proyecto ..	117
Tabla 27. Especificaciones Técnicas de la celda fabricada por Horizon Fuel Cell. .....	119
Tabla 28. Especificaciones técnicas de Hydrostick-Pro.....	121
Tabla 29. Especificaciones de Hydrofill-Pro.....	123
Tabla 30. Consumo del electrolizador para todo el año.....	125
Tabla 31. Radiaciones (Wh/m <sup>2</sup> /día) según las inclinaciones a estudio .....	134
Tabla 32. Tabla de cocientes consumo/Radiación.....	135
Tabla 33. Costo para desarrollar primer prototipo.....	141

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág</b>
Ilustración 1. Esquema para la producción de hidrógeno .....	28
Ilustración 2 Estructura básica de transformación de vectores energéticos.....	29
Ilustración 3 Esquema general de producción de electricidad .....	30
Ilustración 4 Estrategia de desarrollo del hidrógeno como vector energético .....	31
Ilustración 5 Celda de combustible comercial .....	32
Ilustración 6 Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gas.....	39
Ilustración 7 Reacción química del hidrógeno.....	43
Ilustración 8 Límites de inflamabilidad del hidrógeno, en relación a la temperatura .....	47
Ilustración 9 Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente .....	48
Ilustración 10 Esquema básico de un electrolizador .....	52
Ilustración 11 Reformado de vapor .....	55
Ilustración 12 Industria de gasificación .....	56
Ilustración 13 Diagrama porcentual del uso de hidrógeno en la Industria Química.....	59
Ilustración 14 Flota de buses en Inglaterra impulsada por hidrógeno.....	62
Ilustración 15 Principio de operación de una celda de combustible.....	63
Ilustración 16 Estructura de una celda de combustible alcalina. (AFC por sus siglas en ingles) .....	64
Ilustración 17 Estructura de una celda de combustible de membrana de intercambio electrónico (PEMFC por sus siglas en ingles).....	65
Ilustración 18 Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC por sus siglas en ingles) .....	66
Ilustración 19 Celdas de carbón derretido (MCFC por sus siglas en ingles).....	67

Ilustración 20 Potencial ideal en una celda de combustible en función de la temperatura.....	76
Ilustración 21 Comparación de la eficiencia con los diferentes sistemas de potencia .....	83
Ilustración 22. Cilindro tipo 3.....	94
Ilustración 23. Esquema básico de un panel solar fotovoltaico.....	101
Ilustración 24. Esquema básico de un aerogenerador.....	104
Ilustración 25. Prototipo desarrollado.....	106
Ilustración 26. Esquema básico de los tramos de las tuberías .....	108
Ilustración 27. Bomba para suministro de gasolina marca Bosch.....	109
Ilustración 28. Curva del sistema .....	113
Ilustración 29. Esquema energético del sistema.....	115
Ilustración 30. Catálogo de la celda Horizon Fuel Cell.....	116
Ilustración 31 Celda de combustible Horizon Fuel Cell de 30W .....	117
Ilustración 32. Controlador.....	118
Ilustración 33. Válvula de purga.....	118
Ilustración 34. Tubos de silicona.....	119
Ilustración 35. Alimentación de hidrógeno a la celda. ....	120
Ilustración 36. Esquema del proceso electrolizador.....	122
Ilustración 37. Hydrofill-Pro (electrolizador para generar hidrógeno) .....	122
Ilustración 38. Esquema básico instalación fotovoltaica instalada.....	124
Ilustración 39. Radiación directa.....	129
Ilustración 40. Irradiación solar promedio mundial.....	130
Ilustración 41. Esquema del cambio de declinación con movimiento del Sol respecto al plano del Ecuador .....	131
Ilustración 42. Ángulo de inclinación horaria.....	132
Ilustración 43. Ángulos del sol con respecto a una superficie horizontal .....	133
Ilustración 44. Representación Gráfica del VPN .....	140
Ilustración 45. Línea de tiempo para un Sistema de generación de 30 Watt a partir del hidrógeno .....	141

Ilustración 46. Costo total por kWh consumido en el periodo .....	144
Ilustración 47. Línea de tiempo VPN recibo eléctrico.....	146
Ilustración 48. Celda de hidrógeno H5000.....	148
Ilustración 49. Costo para generar 5kW de potencia trabajando 4 horas .....	148

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA DE GRANJA AUTOSOSTENIBLE ALIMENTADA POR UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN AUTÓNOMA DE ENERGÍA ALTERNATIVA.\*

**AUTORES:** REINEL ALARCON BAQUIRO  
JOSE DAVID FUENTES VILLALOBOS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Hidrógeno, Celdas de Combustible, Vector Energético, Autosostenible, Electrolisis.

### DESCRIPCION:

En la actualidad la demanda energética del planeta tierra, ha sido abastecida en su mayoría, por los recursos provenientes de los combustibles fósiles. Esta enorme dependencia y la limitante de ser un recurso finito, genera grandes repercusiones a nivel económico como medio ambiental.

El hidrógeno es un combustible abundante y limpio, puede ser la respuesta a la necesidad de suministro de energía, obteniéndolo de energías renovables que separan el hidrógeno de la multitud de elementos en los que está presente en la naturaleza para generar energía; bien sea como combustible para motores de combustión interna o generando energía eléctrica alimentando celdas de combustible.

La ejecución de este proyecto permite observar a nivel netamente académico, los principios físicos y la viabilidad económica de un circuito eléctrico a escala que utiliza energía solar para producir hidrógeno por medio de la electrolisis. Ya obtenido este hidrógeno, se almacena en tanques fabricados con hidruros metálicos para luego alimentar una celda de combustible de tecnología PEMFC (Pila de Combustible de Membrana de intercambio protónico), capaz de generar 30W de potencia.

El circuito eléctrico a escala desarrollado en este trabajo de investigación, recrea la aplicación de bombeo, para abastecimiento de agua a granjas autosostenibles en un banco de laboratorio.

Se espera que la información acá expuesta sea de mucha utilidad para futuros estudios y desarrollo de tecnología capaz de crear energía a partir de recursos renovables. En especial el uso del hidrógeno como vector energético, que promete un buen futuro y una excelente alternativa no contaminante.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez Arocha.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SCALE MODEL FOR WATER SUPPLY FARM SELF-SUSTAINING USED FOR A PROTOTYPE OF INDEPENDENT ALTERNATIVE POWER GENERATION.\*

**AUTHORS:** REINEL ALARCON BAQUIRO

JOSE DAVID FUENTES VILLALOBOS\*\*

**KEY WORDS:** Hydrogen, Fuel Cell, Energy Carrier, self-sustaining, electrolysis

### DESCRIPTION:

At present, energy demand of planet Earth, it has been supplied mostly by the resources from fossil fuels. This huge dependence and limiting being a finite resource, generates large impact economically and environmental.

Hydrogen is an abundant and clean fuel, it can be the answer to the need for energy supply, obtaining it from renewable energies separating hydrogen from the multitude of elements present in nature to generate energy; either as a fuel for internal combustion engines or electric power generating fuel cells.

This Project allows to observe in a academic level, the physical principles and the economic viability of an scale electrical circuit, that uses solar energy to produce hydrogen through electrolysis. This hydrogen is stored in tanks made of metal hydrides, and later, it use in a Fuel Cell proton exchange membrane (PEMFC), capable of generating 30W of power.

The scale electrical circuit developed in this research, recreates pumping for water supply in farms self-sustaining.

It is expected that the information displayed here is very useful for future studies and development of technology capable of creating energy from renewable resources. In particular the use of hydrogen as an energy carrier, which promises a good future and a good clean alternative.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Phisico-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Omar Armando Gelvez Arocha.

## INTRODUCCIÓN

En el transcurso de la evolución humana, la búsqueda constante del desarrollo social, ha estado ligado principalmente a la capacidad de disponer recursos energéticos. El aprovechamiento y disponibilidad de una fuente de energía puntualizan el mejoramiento en la calidad de vida de la población, siendo el carbón una de las más explotadas en el siglo XIX y el petróleo y sus derivados en el siglo XX y parte del siglo XXI.

La demanda mundial de energía aumenta considerablemente en el transcurso de los tiempos, el carbón y el petróleo que juegan el papel de ser las principales fuentes de energía en nuestra sociedad, se ven condicionadas debido a su gran explotación y su periodo de vida limitada, pues se calcula que en unos 40 o 50 años las reservas quedarán agotadas.

Un problema que se visualiza y que poco se ha resuelto a profundidad se refiere a la contaminación ambiental. Muchos residuos generados en la combustión de los hidrocarburos y la explotación minera de alguna manera son responsables del daño progresivo del planeta, esto es debido a su gran ineficiencia de conversión energética, siendo las emisiones de dióxido de carbono, uno de los principales generadores del efecto invernadero.

Otro problema de estos combustibles es que sus reservas se encuentran geográficamente limitadas, es decir, dichos recursos están concentrados en un pequeño número de naciones exportadoras de crudo y carbón, creando una alta dependencia consumidora a terceros, monopolio comercial y una alta variabilidad en los precios de los suministros.

Un pequeño aporte a la comunidad académica es poner en conocimiento de muchos, opciones y alternativas para tratar de minimizar este gran daño progresivo y con el ánimo de que el futuro de la humanidad tenga un mejor panorama. Este proyecto intentará demostrar la viabilidad en el uso de una fuente de energía alternativa limpia, con proyección a futuro para consumo masivo y que su uso no genere consecuencias desfavorables para el medio ambiente.

Para lograr este propósito se ha desarrollado un prototipo a escala de un sistema de generación de energía autónomo para el abastecimiento de agua de una granja auto sostenible, esta herramienta será la encargada, en pequeña escala, de la conversión energética por medio de un circuito que toma la radiación del sol para producir hidrogeno y este a su vez genere electricidad minimizando los impactos ambientales.

Es importante dar a conocer la eficiencia y viabilidad de este sistema con pruebas reales de funcionamiento, para que el lector tenga presente que cada vez más se están desarrollando alternativas reales para remplazar los métodos convencionales y satisfacer las demandas energéticas del hombre.

## 1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La gestión ambiental y la búsqueda de recursos renovables se conciben como un orientador que genera valor agregado para todo tipo de organización, a través de procesos y productos con un mínimo impacto ambiental. Es así, como la Universidad Industrial de Santander promulga y desarrolla investigación técnica y científica para mitigar la problemática mundial energética y la disminución de los índices de contaminación.

Se viene identificando en el mundo actual, la demanda creciente de energía para suplir necesidades a nivel industrial, comercial, transporte y doméstico. Una de las principales fuentes limitadas de solución energética es la explotación del combustible mineral y petrolero, explotada por más 100 años, haciendo que dicho recurso se acabe.

Es por eso que se está buscando nuevos recursos que puedan abarcar el gasto energético actual, en su preferencia recursos renovables que disminuyan en lo más posible el perjuicio ambiental.

El hidrógeno se ha considerado como un combustible conveniente y limpio, puesto que puede obtenerse de una diversa gama de fuentes domésticas; el hidrógeno podría reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía. En el largo plazo, el hidrógeno obtenido de fuentes renovables ofrece un potencial de energía que sería sostenible en muchos sentidos.

## 2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La elaboración de este proyecto de grado busca auto-satisfacer una alternativa de energía eficiente y amigable con el ambiente, diseñando un circuito energético y corroborando los resultados a escala, para posteriormente comparar la viabilidad de desarrollar el proyecto a necesidades reales.

Debido a que el suministro de la energía no es igual en todos lados, ya que depende de muchos factores tales como, la localización geográfica, el costo de funcionamiento e instalación, el almacenamiento y transporte por lo cual es necesario buscar soluciones alternativas de energía.

La utilización del hidrógeno como fuente de energía es un campo poco explorado en Colombia, por ser una tecnología relativamente nueva y con ciertas restricciones para producir electricidad, pero se justifica su uso debido a la búsqueda de energía renovable limpia y la visión de la Universidad Industrial de Santander de ingeniar soluciones que beneficien al medio ambiente y a la sociedad en general.

Se considera la selección de las celdas de hidrógeno por su potencial energético y su gran avance tecnológico que llevan estos últimos años, involucrando a la escuela de Ingeniería Mecánica en función de su búsqueda de investigar, desarrollar y aplicar energías alternativas que den solución al abastecimiento energético del país.

Se implementa una solución para granjas con consumos energéticos destinados al suministro continuo de agua potable para riego de cultivos destinados al consumo humano y de animales productivos. Con esta solución se pretende disminuir el

costo de energía suministrado por red, al optar por un mecanismo híbrido energético.

Para poder solucionar este problema se deben estudiar ciertos criterios como la eficiencia, ventajas y desventajas de cada uno de los elementos que componen el sistema, como también la facilidad de adquirir en el mercado los recursos que se requieran y su fuente de alimentación que los provee.

El diseño y la posterior construcción de este modelo a escala deben representar un beneficio económico respecto a la opción de compra, debe ser estable, de fácil operación y mantenimiento, esto con el fin de prestar el servicio de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica para una solución viable de la tecnología del hidrógeno.

### **3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a través del desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía.

##### **3.1.1 Objetivos Específicos**

- Diseñar y construir un modelo a escala de un sistema capaz de almacenar 40 litros de agua a una altura de 2 metros para una granja auto sostenible mediante generación autónoma de energía renovable.
- Desarrollar un prototipo de generación autónoma de energía capaz de crear 30W de potencia con los siguientes elementos:
  - Celda fotovoltaica que genere 50W de potencia y suministre energía a los acumuladores y electrolizador.
  - Electrolizador que produzca 3 L/Hora de hidrogeno.
  - Celda de combustible alimentada por hidrogeno que genere 30W de potencia los cuales serán entregados a una bomba que consume 20W nominales y cuya capacidad es 10 LPM y altura máxima 2,50 metros.

- Realizar un análisis costo-beneficio de la construcción, montaje y funcionamiento del prototipo.
- Seleccionar un sistema de control de la celda fotoeléctrica para distribución y almacenaje de energía en las etapas de colectores solares, electrolisis y la celda de combustible.

## 4 HIDRÓGENO COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

### 4.1 ANTECEDENTES

El hidrógeno siempre ha estado ligado en la obtención de energía desde los inicios de la humanidad. Cuando se quema madera, carbón, el gas o los mismos derivados del petróleo lo que realmente se está haciendo es quemar los átomos de hidrógeno presentes en cada una de las sustancias.

Los primeros estudios del hidrógeno ocurren en el siglo XVI, cuando Paracelso identificó un aire inflamable que aparecía en las reacciones de hierro con un ácido.

En 1671 el químico y físico Inglés Robert Boyle publicó un trabajo titulado “*New Experiments Touching the Relation Between Flame and Air*” donde se tiene constancia por primera vez por escrito del conocimiento del hidrógeno; a pesar de ello no se tiene evidencia de que consiguiera aislarlo de forma pura.

Fue unos años después, en el 1781 cuando Antoine Laurent Lavoisier nombró al hidrógeno como tal, ya que ardía en presencia de oxígeno para generar agua. Todo ello después de realizar una serie de experimentos sobre la naturaleza de la combustión.

Pero fue hasta el año 1839, cuando William Robert Grove descubriría la pila de combustible, la cual representaría un punto de inflexión para la tecnología. A partir de entonces numerosos científicos se han basado en los estudios de Grove para

llegar a los conocimientos, que hoy en día la NASA utiliza en sus expediciones por su capacidad de generar electricidad. Y es una de las más importantes impulsoras de su estudio y uso.

A partir de los años 70, se inicia la utilización de hidrógeno como purificante de la gasolina. Éste se obtenía a través del gas natural en un proceso llamado reformado con vapor, y su objetivo principal era la eliminación del azufre que contenía la gasolina.

Desde ese periodo la utilización del hidrógeno ha ido incrementando. Pero siempre centrándose en una aplicación puramente industrial y dejando para finales del siglo XX y sobre todo del inicio del siglo XXI el estudio de su valor como vector energético primero y sustitutivo, en un plazo medio o largo, de los combustibles fósiles.

## **4.2 HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA**

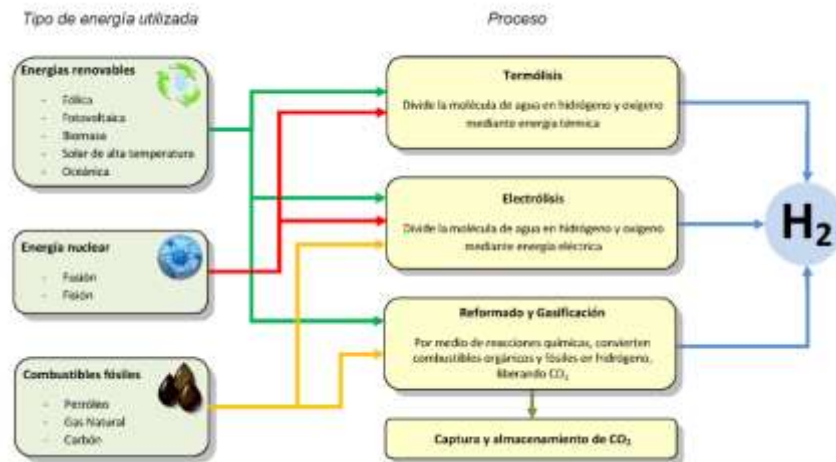
Al pensar en el hidrógeno con relación a la energía, se debe tener en consideración algo muy importante; la cualidad más importante del hidrógeno es ser un medio para almacenaje de energía y no una fuente primaria de ésta, ya que a pesar de ser el elemento más abundante del universo, estimándose que el 90% de la materia visible del universo es hidrógeno, no se encuentra en su estado libre en la tierra sino en composición con otros elementos. El hidrógeno en su estado libre es tan liviano que escaparía a la atmósfera.

Aunque todavía existen factores por resolver para una utilización provechosa del hidrógeno, la tendencia parece indicar que este elemento es de los más rentables para mejorar la eficiencia energética y la conservación del medio ambiente. El hidrógeno resolverá los problemas que conllevan otros sistemas de energías alternativas como la fotovoltaica y eólica en el almacenamiento y transporte y permitirá, durante un periodo de transición un uso más eficiente y menos contaminante de los combustibles fósiles.

El hidrógeno es un vector energético que complementa perfectamente a la electricidad para almacenar y transportar energía sin que produzca descarga, por medio de uso de las pilas de combustible.

A escala mundial, el hidrógeno mayoritariamente se adquiere a partir de los combustibles fósiles como el gas natural, el carbón y el petróleo. Igualmente, pero a menor escala, el hidrógeno se es obtenido con alto índice de pureza por electrólisis de agua; también existen otros métodos como la descomposición catalítica.

Ilustración 1. Esquema para la producción de hidrógeno



Fuente: [www.cnh2.es](http://www.cnh2.es)

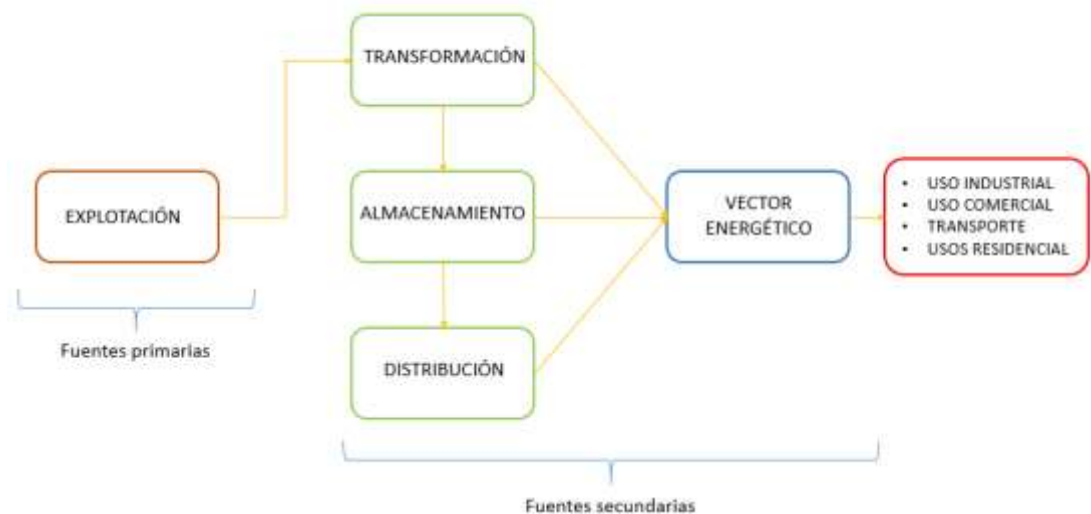
### 4.3 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

La ley de la conservación de la energía, fundamento de la primera ley de la termodinámica, asevera que en un sistema físico aislado no es posible crear ni destruir la energía, sino transformar la ya existente en el sistema. La fuente de energía o energía primaria es aquella que se encuentra disponible en la naturaleza antes de ser transformada.

Las principales fuentes de energía provienen del sol, los vientos, combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), agua (mares, lagos, ríos y océanos), biomasa y materiales radiactivos como el uranio, mercurio. La mayoría de estas fuentes primarias de energía no son utilizables directamente en el sistema, requieren ser transformadas. El resultado de esta conversión es a lo que llamamos vector energético.

Los vectores energéticos son los resultantes de las transformaciones que se hacen a los recursos naturales energéticos. Los principales vectores energéticos conocidos son los combustibles derivados del petróleo (gasolina, diésel, queroseno), del gas natural (licuado, comprimido), de las rocas sedimentadas de carbón, biomasa y la electricidad producida por transformación de las fuentes primarias como los combustibles fósiles, nuclear, eólica, solar, etc.

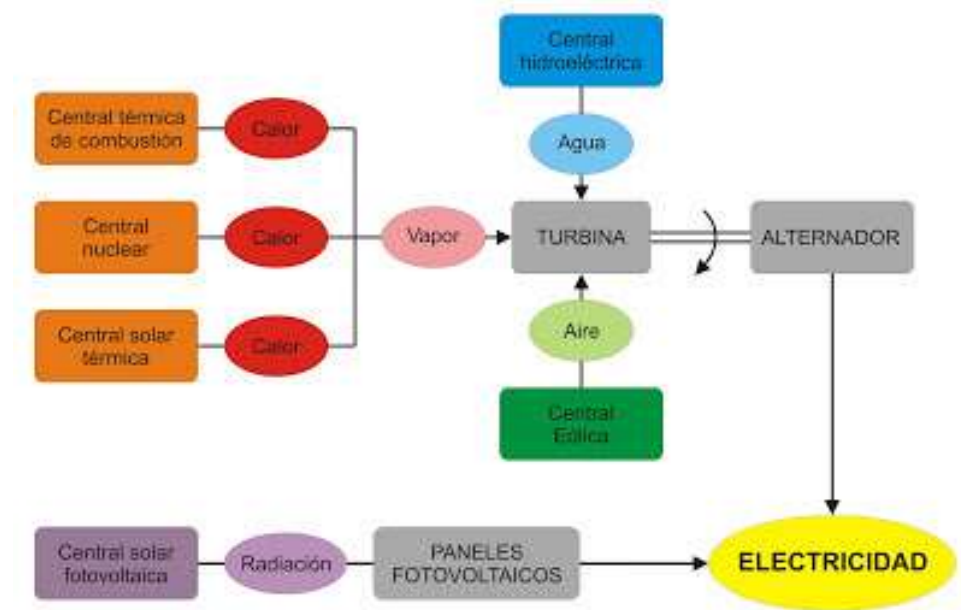
*Ilustración 2 Estructura básica de transformación de vectores energéticos*



La electricidad es un portador de energía básico en hogares, industria y telecomunicaciones. Demanda ser transformada en otras formas de energía para que se pueda realizar algún tipo de trabajo útil. Se puede convertir en movimiento, en calor o frío, en luz y en energía química. También se emplea para amplificar y procesar señales portadoras de información, en la rama de la electricidad aplicada que se llama electrónica. A diferencia de los derivados de combustibles fósiles, la energía eléctrica prácticamente no es acumulable. Se tiene que consumir en el momento que se genera, por eso uno de los problemas de gestión de una red

eléctrica es coordinar las variaciones de demanda con los distintos sistemas de generación.

*Ilustración 3 Esquema general de producción de electricidad*



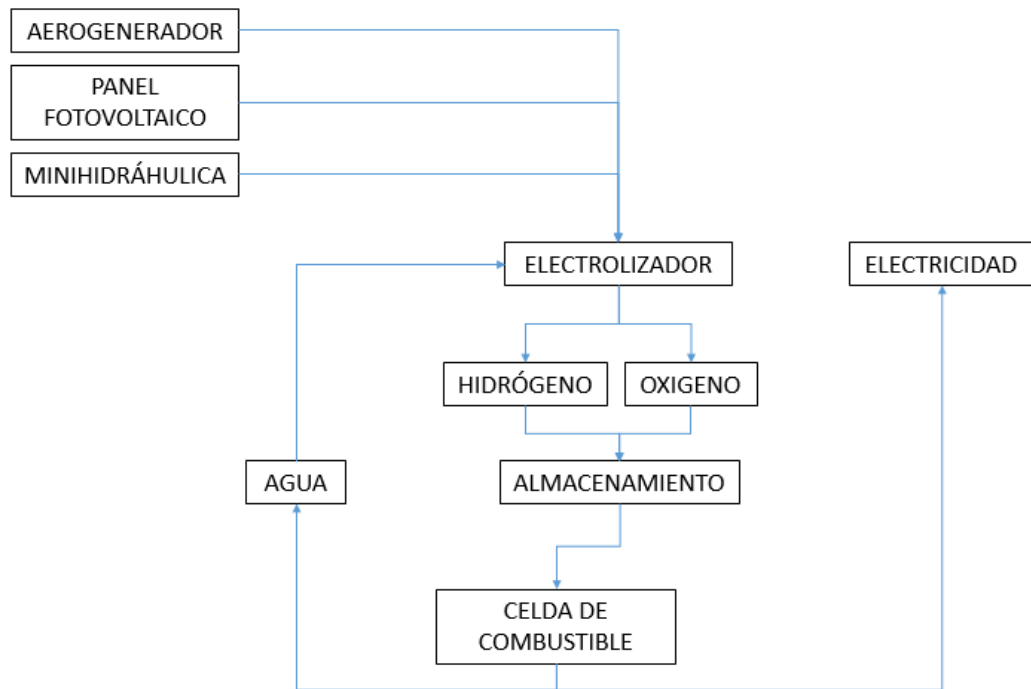
Fuente: brushenko.blogspot.

La producción de hidrógeno realizada en este proyecto es netamente para la generación final de electricidad, buscando acercar más la rentabilidad y cero emisiones de contaminantes al medio ambiente. Con la cual se propone el agua como fuente primaria de explotación, y la electrólisis como mecanismo de transformación. La integración de sistemas que empleen las tecnologías del hidrógeno se presenta como una solución a la aleatoriedad en la producción (generalmente de carácter intrínseco) de fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica, llegando a convertirse en sistemas de almacenamiento intermedios.

La producción de hidrógeno limpio mediante fuentes de energía renovable puede ser una opción de producción de combustible, que aporta soluciones a la problemática de infraestructura necesaria para el transporte del mismo.

Se presume que el hidrógeno podrá encajar con la idea de Desarrollo Sostenible basada en las economías locales, dado que cada región o país podrá producir su hidrógeno (por ejemplo, el hidrógeno que como combustible necesite para el transporte) a partir de las fuentes renovables que se hallen disponibles en cada caso (solar, eólica, biomasa, etc.).

*Ilustración 4 Estrategia de desarrollo del hidrógeno como vector energético*



#### 4.4 ECONOMÍA DE HIDRÓGENO

En la economía actual, la demanda energética mundial se ve cubierta en más de un 85% por combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. Sin embargo el consumo de estos combustibles genera gases que ayudan a incrementar el efecto invernadero y que son tóxicos. Además, esta dependencia tiene importantes repercusiones económicas. Cabe resaltar, que su producción centralizada en determinadas zonas del mundo, donde rigen más factores políticos, lo que resulta en precios volátiles y elevados.

En una economía del hidrógeno, el hidrógeno será producido a través de alguna fuente primaria de energía para reemplazar los combustibles fósiles. El hidrógeno se utiliza como combustible para las celdas de combustible que generan electricidad y en los motores de combustión interna. Esta segunda opción es la menos atractiva, ya que la eficiencia de los motores es más reducida que las celdas de combustible (no superando el 35% de eficiencia) pudiendo difícilmente aumentar esta eficiencia debido a la naturaleza de los procesos termodinámicos.

*Ilustración 5 Celda de combustible comercial*



Fuente: Horizon fuel cell.

La producción de hidrógeno puede ser centralizada, distribuida o una mezcla de ambas. Mientras la generación de hidrógeno en grandes plantas centralizadas promete una mayor eficiencia en la producción del hidrógeno, posee la dificultad de transportar un gran volumen a través de grandes distancias (lo cual es bastante costoso y peligroso por su volatilidad), lo que hace a la distribución de energía eléctrica más atractiva dentro de una economía de hidrógeno local. En ese escenario, pequeñas plantas regionales pueden generar hidrógeno usando energía provista por energía renovable. Mientras la eficiencia de generación es menor en éste caso que en una generación centralizada, las pérdidas en el transporte de hidrógeno, la pueden hacer una opción más llamativa.

Una incertidumbre de llevar a cabo en un futuro la economía de hidrógeno, es si la distribución de hidrógeno va a competir con la distribución eléctrica. En otras palabras, si el hidrógeno va a ser generado de forma limpia a través de energías renovables, nuclear, o a base de combustibles fósiles con captación de carbono y transportado a los puntos de demanda de energía donde sería transformado en electricidad mediante una gran cantidad de pequeños generadores o si va a ser la electricidad la forma de transportar la energía para luego generar el hidrógeno y ser utilizado sólo en aplicaciones móviles. Esto va a depender del avance de las tecnologías. Por el momento el transporte del hidrógeno es sumamente caro, debido a la infraestructura necesaria, la cual es mucho más costosa que para el gas natural debido a que el hidrógeno se fuga fácilmente a través de los conductos y tiene una densidad de energía mucho menor, lo que hace que para transportar la misma energía se requiera transportar mucho más hidrógeno que gas natural.

Los críticos de una economía de hidrógeno argumentan que la baja eficiencia del proceso completo de generación de hidrógeno, almacenamiento, transporte y posterior transformación a electricidad a través de las celdas de combustible (más

adelante se explican las eficiencias de cada proceso) puede ser superada para muchas aplicaciones por el uso directo de energía eléctrica, de baterías, celdas de combustible (existen celdas de combustible que funcionan con hidrocarburos en reemplazo del hidrógeno) y la producción de combustibles sintéticos de CO<sub>2</sub> pueden conseguir los mismos resultados que una economía de hidrógeno requiriendo sólo una fracción de investigación e infraestructura.<sup>1</sup>

## **4.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL HIDRÓGENO**

Aunque todavía hay factores pendientes por resolver para una utilización rentable del hidrógeno, este combustible es uno de los más convenientes para mejorar la eficiencia energética y mejorar la conservación del planeta.

Las ventajas y desventajas derivan de sus propiedades físicas básicas. A continuación se citan algunas de las ventajas y desventajas más importantes:

### **4.5.1 Ventajas**

- El hidrógeno es el más eficiente de los combustibles.
- Es inagotable y bajo ciertas condiciones seguro.
- No altera el estado de la atmósfera.
- A medida que avanza la tecnología se hace más económico de producir.

---

<sup>1</sup> Berry, Gene D; Aceves, Salvador M. (2006). La economía del hidrógeno como solución al problema de la estabilización del clima mundial. Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.

- El hidrogeno tiene el más alto valor calorífico y el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible.
- La molécula de hidrógeno es la más ligera, la más pequeña y está entre las moléculas más simples, además, es relativamente estable.

#### **4.5.2 Desventajas**

- El hidrogeno tiene una energía muy baja por unidad de volumen como gas o como líquido, más o menos una tercera parte de la del gas natural o la gasolina y una cuarta parte del equivalente en volumen del metano. Esta es la principal desventaja del hidrógeno, su baja densidad incluso como líquido.
- Los contenedores para su almacenaje son de gran volumen.
- La obtención del hidrogeno liquido requiere de un proceso altamente consumidor de energía y técnicamente complejo.
- El transporte de hidrogeno gaseoso por gaseoductos es menos eficiente que para otros gases.
- La proporción de pérdidas o escapes de hidrógeno en forma de gas a través de orificios y la de fugas es de 5 a 3 veces mayor que en el metano o el gas natural.
- El hidrogeno no es toxico y no es contaminante, pero es difícil de detectar sin sensores adecuados ya que es incoloro, inodoro y en el aire su llama es casi invisible por lo que resulta más difícil de detectar y de extinguir en un fuego o explosión.
- El límite de inflamabilidad del hidrogeno podría causar problemas ya que el hidrogeno arde en concentraciones entre 4 y 75% en aire en volumen,

mientras que el rango de inflamabilidad del metano está entre 5.3% y 15% y el del propano entre 1 y 9.5%.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Fábrega Ramos, Marc. (2009). Hidrógeno, Aplicación en Motores de Combustión Interna. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

## 5 PROPIEDADES, OBTENCIÓN Y USOS DEL HIDRÓGENO

### 5.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es el más simple de todos los elementos. Es en gran medida el elemento más abundante del universo, constituyendo el 75% de la masa de toda la materia visible en estrellas y galaxias.

En la mayoría de átomos de hidrógeno, el núcleo está formado por un único protón, aunque existe una variante extraña (o "isótopo") del hidrógeno que contiene un protón y un neutrón. Ésta forma de hidrógeno se denomina deuterio o hidrógeno pesado. Existen otros isótopos de hidrógeno, como el tritio, con dos neutrones y un protón, pero son más inestables.

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

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

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

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

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

*Tabla 1. Propiedades generales del hidrógeno*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Peso molecular	2,01594
Densidad del gas a $0^{\circ}\text{C}$ y 1 atm	$0,08987\text{ kg/m}^3$
Densidad del sólido a $-259^{\circ}\text{C}$	$858\text{ kg/m}^3$
Densidad del líquido a $-253^{\circ}\text{C}$	$708\text{ kg/m}^3$
Temperatura de fusión	$-259^{\circ}\text{C}$
Temperatura de ebullición a 1 atm	$-253^{\circ}\text{C}$
Temperatura crítica	12,8 atm
Densidad crítica	$31,2\text{ kg/m}^3$

Tabla 1. Continuación

Calor de fusión a -259°C	58 kJ/kg
Calor de vaporización a -253°C	447 kJ/kg
Conductividad térmica a 25°C	0,019 kJ/(ms°C)
Viscosidad a 25°C	0,00892 centipoise
Calor específico (Cp) a 25°C	14,3 kJ/(kg°C)
Calor específico (Cp) a -256°C	8,1 kJ/(kg °C)

Fuente: Diseño de una pila de combustible de Hidrógeno para producir una diferencia de potencial de 12 voltios. Doñan, Oscar Eduardo y Sermeño, Salvador J osé (2008).

El hidrógeno dispone de un peso atómico más bajo que cualquier otra sustancia, y por lo tanto tendrá una densidad muy baja tanto en estado líquido como gaseoso. Cuando el hidrógeno se almacena como un líquido, se evapora durante su expansión a condiciones atmosféricas, con un aumento correspondiente en su volumen. La relación de expansión del hidrógeno es de 1:848, y significa que el hidrógeno, en su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que en estado líquido.

Ilustración 6 Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gas

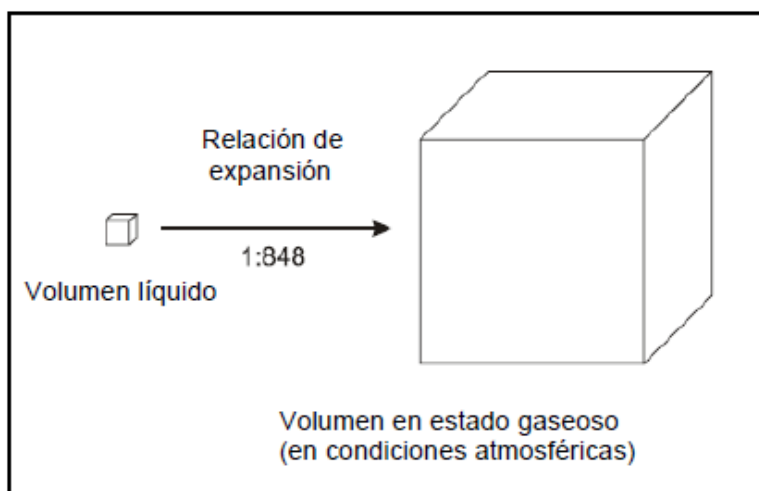


Tabla 2. Cuadro comparativo masa-volumen del hidrógeno

Masa (Kg)	Volumen líquido (Litros)	Volumen gaseoso (m <sup>3</sup> )
1	14,08	11,74
0,071	1	0,83
0,08	1,20	1

Fuente: Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna. Fábrega, Marc (2009).

**5.1.2 Propiedades organolépticas y toxicidad.** El hidrógeno puro es inodoro, no tiene color y es insípido. Si existiese un escape de hidrógeno resultaría casi invisible en la luz del día. El hidrógeno obtenido a partir de otros combustibles fósiles viene acompañado generalmente por nitrógeno, bióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases. Todos ellos son también en la mayoría de casos inodoros, descoloridos e insípidos.

El hidrógeno en sí no resulta tóxico, pero inhalado puede dar lugar a una mezcla inflamable dentro del cuerpo. La inhalación de hidrógeno puede producir inconsciencia y asfixia ya que desplaza el oxígeno que se encuentra en el aire.

Los niveles de oxígeno por debajo del 19,5% resultan insuficientes para los seres humanos. Los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden incluir la hiperventilación, una disminución de las capacidades mentales, coordinación muscular deteriorada, falta de juicio, depresión, inestabilidad emocional y fatiga.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Fábrega Ramos, Marc. (2009). Hidrógeno, Aplicación en Motores de Combustión Interna. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Con concentraciones inferiores al 12% de oxígeno, se produce inconsciencia inmediata, sin síntomas de alerta anteriores. Es por eso que se debe tener precaución en caso de manipular hidrógeno en recintos pequeños y cerrados.

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

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

No obstante si se produce un escape de hidrógeno, la fuga se evaporará muy rápidamente, ya que el punto de ebullición del hidrógeno es, como ya se ha dicho anteriormente, extremadamente bajo.

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

## 5.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL HIDRÓGENO

**5.2.1 Contenido de energía.** En la combustión, el hidrógeno es capaz de liberar una cierta cantidad de combustible al reaccionar con el oxígeno para formar agua. Esta cantidad de energía se mide experimentalmente y se cuantifica con poder calorífico superior HHV (por sus siglas en ingles) y como el poder calorífico inferior LHV (*low heating value*). El poder calorífico superior se define suponiendo que todos los elementos de la combustión (combustible y aire) son tomados a 0°C y los productos (gases de combustión) son llevados también a 0°C después de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará totalmente condensado. De esta manera al condensar el vapor de agua contenido en los gases de combustión se tendrá un aporte energético de calor.

El poder calorífico inferior considera que el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no condensa. Por lo tanto no hay aporte adicional de calor por condensación de vapor y solo se dispondrá del calor de oxidación del combustible.

La diferencia entre HHV y LHV es “calor de evaporación” y representa la cantidad de energía requerida para vaporizar un combustible líquido en uno gaseoso.

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

Ilustración 7 Reacción química del hidrógeno



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

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

**5.2.2 Densidad de la energía.** Mientras que el contenido en energía indica de la cantidad de energía que hay en un determinado peso de combustible, la densidad de energía comunica de la cantidad de energía que hay en un cierto volumen de combustible. La densidad de la energía es en realidad una medida que informa sobre lo compacto que se encuentran los átomos de hidrógeno en un combustible.

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

Tabla 3. Densidad de energía de algunos combustibles

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

Fuente: Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna. Fábrega, Marc (2009).

### 5.2.3 Inflamabilidad del hidrogeno

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

La facilidad de evaporar los combustibles es su punto de inflamación o *flashpoint*. Éste se define como la temperatura mínima a la cual el combustible desprende

vapores inflamables suficientes a la presión atmosférica, indican, que arden al entrar en contacto con una fuente de ignición, pero sin propagarse la combustión a la masa líquida del combustible.

Si la temperatura del combustible se encuentra por debajo de su punto de inflamación, no será capaz de producir la cantidad suficiente de vapores para quemarse y si la temperatura encuentra por encima de su punto de inflamación, los vapores quedeprende estarán presentes.

Dicho esto cabe recordar que todos los combustibles queman únicamente cuando se encuentran en estado gaseoso o de vapor.

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

*Tabla 4. Inflamabilidad de algunos combustibles*

<b>Combustible</b>	<b>Punto de Inflamación</b>
Metanol	11°C
Gasolina	-43°C
Propano	-104°C
Metano	-188°C
Hidrógeno	<-253°C

Fuente: Ensayo de un electrolizador. Huete Guzmán, Mario (2012).

**5.2.4 Rango de inflamabilidad.** Se define como aquel rango comprendido entre el límite inferior explosivo (LEL; Lower Explosive Level) y el límite superior explosivo (UEL; Upper Explosive Level).

La inflamabilidad es la capacidad para iniciar una combustión provocada por los rangos de temperatura local. El límite inferior de inflamabilidad del Hidrógeno es aproximadamente  $-253^{\circ}\text{C}$  y es la mínima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga al ser mezclada con el aire y encendida, para seguir quemando.

Si se tiene una cantidad menor de hidrógeno que de oxígeno, la mezcla será pobre, de manera que se consumirá todo el combustible pero no todo el oxígeno.

El límite superior de inflamabilidad de un gas es la máxima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga después de haberse mezclado con el aire y haber sido encendida, para poder seguir quemando.

Por encima de este límite, hay una deficiencia de oxígeno que no permite continuar la combustión la mezcla de aire/combustible es demasiado rica.

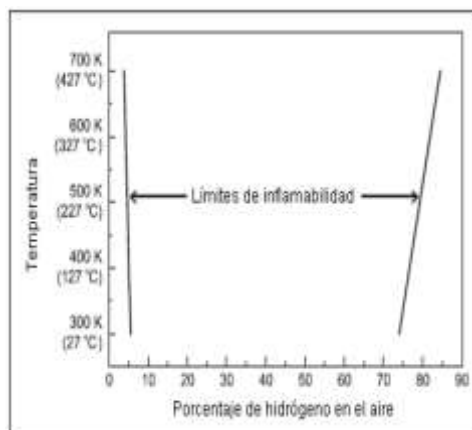
Entre estos dos límites se encuentra la gama inflamable en la cual el gas y el aire disponen de unas proporciones correctas para permitir la combustión una vez se haya encendido.

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

El combustible únicamente será inflamable en la periferia de alguna fuga, donde la mezcla del combustible con el aire alcance las proporciones adecuadas.

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

*Ilustración 8 Límites de inflamabilidad del hidrógeno, en relación a la temperatura*

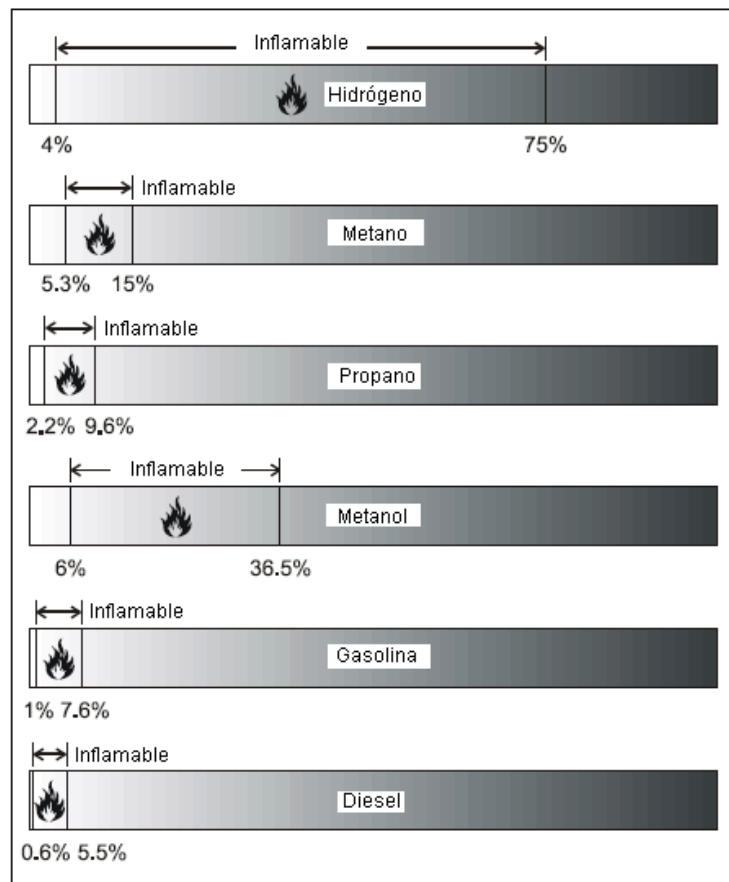


Fuente: Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna. Fábrega, Marc (2009).

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

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

*Ilustración 9 Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente*



Fuente: Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna, Fábrega, Marc (2009).

*Tabla 5. Temperatura de autoencendido de algunos combustibles*

<b>Combustible</b>	<b>Temperatura de autoencendido</b>
Metanol	230-480°C
Gasolina	385°C
Propano	490°C
Metano	540°C
Hidrógeno	585°C

Fuente: Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna, Fábrega, Marc (2009).

### **5.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

El hidrógeno, a pesar de ser el elemento más abundante en el Universo, en la Tierra se encuentra en estado puro con facilidad, pues reacciona muy fácilmente con otros elementos. A diferencia del petróleo o el carbón, el hidrógeno no se consigue en estado natural, y no podrá explotarse de la misma manera, sino que deberá generarse a partir de otros componentes químicos.

Es por este motivo que el hidrógeno es considerado un portador secundario de energía, o lo que los expertos denominan como “vector energético”. La mayoría de compuestos orgánicos son una combinación de carbono e hidrógeno, como es el caso del gas natural (metano), las plantas y la biomasa en general.

El proceso de extraer hidrógeno a partir de combustibles fósiles se denomina reformado de hidrocarburos. En la actualidad, el reformado de hidrocarburos es el

principal y menos costoso método que se utiliza para producir hidrógeno. Desafortunadamente, el reformado de hidrocarburos emite sustancias contaminantes y requiere el consumo de combustibles no renovables.

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

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

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

Aunque tienen gran proyección, siguen siendo en gran parte experimentales y capaces de producir únicamente pequeñas cantidades de hidrógeno.

La obtención del hidrógeno se puede clasificar dependiendo del tipo de energía utilizada en el proceso, eléctrica, térmica, fotónica y bioquímica. Dentro de esta clasificación se hallan diversas maneras de obtener el hidrógeno.

Actualmente, la obtención de la mayor parte del hidrógeno fabricado en todo el mundo es a partir de los combustibles fósiles, como subproducto en industrias

químicas, o a partir de los procesos de refinado del petróleo crudo. La producción de hidrógeno a partir de energías renovables no es todavía factible a gran escala.

*Tabla 6. Principales métodos de obtención de Hidrógeno*

Energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrólisis (agua).</li> <li>• Descomposición de gas natural por arco de plasma (gas natural).</li> </ul>
Energía térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Termólisis.</li> <li>• Termo catálisis.</li> <li>• Proceso termoquímico:               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Conversión de biomasa.</li> <li>✓ División de agua.</li> <li>✓ Gasificación.</li> <li>✓ Reformación de metano.</li> </ul> </li> </ul>
Energía fotónica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PV-electrólisis (agua).</li> <li>• Foto-catálisis (agua).</li> <li>• Método foto-electro-químico (agua).</li> <li>• Bio-fotólisis (agua).</li> </ul>
Energía bioquímica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fermentación oscura (biomasa).</li> <li>• Enzimática (agua).</li> </ul>

### 5.3.1 Electrólisis

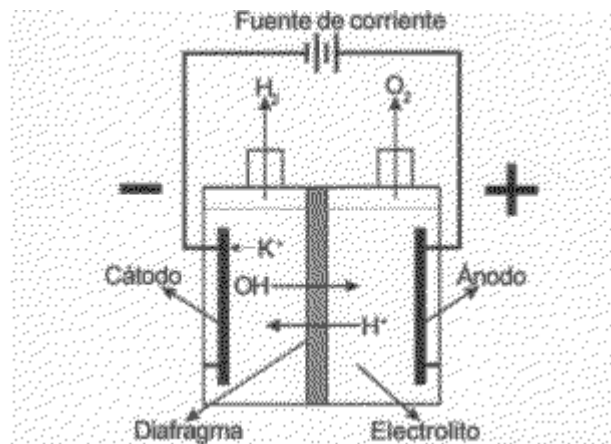
El proceso constituye dos electrodos que están conectados a un flujo de energía eléctrica y sumergida en una solución (comúnmente agua). El electrodo conectado

al polo positivo es conocido como ánodo y el conectado al polo negativo como cátodo, cada electrodo atrae a los iones opuestos, así el ánodo atrae a los iones negativos y es el lugar donde aparece el oxígeno, mientras que en el cátodo se atraen a los positivos haciendo que el hidrógeno aparezca allí.

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

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

*Ilustración 10 Esquema básico de un electrolizador*



Fuente: <http://www.cubsolar.cu/Biblioteca/Energia/Energia01/HTML/articulo13.htm>

La tecnología de la electrólisis actualmente está muy desarrollada y existen una gran cantidad de electrolizadores de distintos tipos en el mercado. De todos estos hay dos que son los más prometedores:

**Electrolizadores de alcalino líquido:** Son los preferidos para la producción de Hidrógeno a gran escala debido a que la tecnología funciona bien a grandes escalas. En los electrolizadores alcalinos a diferencia de los otros tipos de electrolizadores es el uso de un electrolito líquido (típicamente una solución del 25% de hidróxido de potasio). Estos electrolizadores han llegado a alcanzar una eficiencia del 80%.

**Electrolizadores de membrana polimérica (PEM):** Son considerados como la opción a largo plazo más prometedora, actualmente son ideales para aplicaciones a pequeña o media escala, tales como alimentación de coches o aplicaciones más pequeñas, donde la unidad puede ser utilizada para producir Hidrógeno utilizando una fuente de energía renovable como la solar. Estos electrolizadores pueden verse muy beneficiados por el desarrollo técnico que se está llevando a cabo sobre las pilas de combustible PEM y de su producción en masa. Actualmente ya se están vendiendo algunos modelos de electrolizadores PEM, a pesar de ser una tecnología relativamente muy nueva comparada con los electrolizadores alcalinos. Se espera que la eficiencia de los electrolizadores PEM pueda llegar hasta el 94%, pero por ahora esto es algo teórico. Los electrolizadores PEM funcionan bien para sistemas de energías renovables donde el suministro de energía es muy variable. Generalmente los electrolizadores PEM son más adecuados para plantas pequeñas, especialmente aquellas que tienen una salida variable, mientras que los electrolizadores alcalinos son claramente mejores para grandes plantas que están conectadas a la red de energía.

**5.3.2 Descomposición de gas natural por arco de plasma.** Este método consiste en manipular un reactor compuesto de 3 electrodos y plasma inyectado. El plasma se utiliza en estado ionizado y sirve como medio de alto voltaje para la descarga de corriente eléctrica.

Se utiliza como fuente de hidrógeno el metano, cuando se hace fluir el metano a través del arco de plasma ionizado y debido a la excitación de los electrones, este se disocia en hidrógeno y carbono negro, permaneciendo el hidrógeno en su estado gaseoso mientras que el carbono se solidifica en forma de hollín.

**5.3.3 Termólisis.** Es el proceso por el cual un compuesto se divide en dos o más componentes debido a un considerable aumento de temperatura, en el caso del agua, el proceso de de separación se presenta a partir de 2500 Kelvin, una temperatura que permite una disociación de poco más del 4% a presión atmosférica.

Este proceso es reversible, por lo tanto, para no perder el hidrógeno obtenido se debe realizar un enfriamiento para detener la reacción química, este enfriamiento no debe tardar más de unos cuantos milisegundos y es realizado con la ayuda de un gas auxiliar a una temperatura entre los 400 a 450 Kelvin, siendo no reactivo con el hidrógeno, pues de lo contrario se podría perder gran cantidad del hidrógeno.

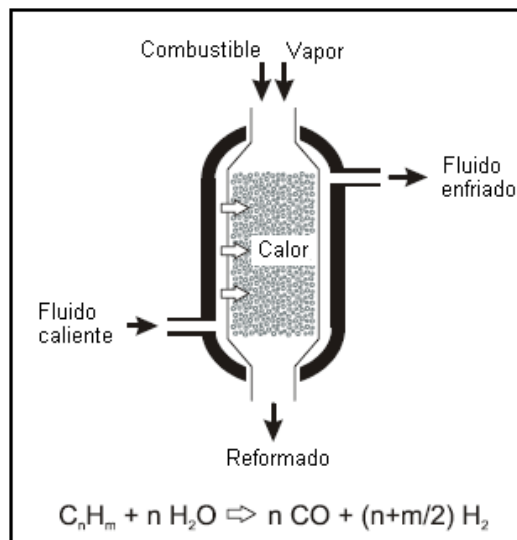
**Termo catálisis:** En vista de la limitación de los materiales existentes hoy en día para la realización de la termólisis debido a las altas temperaturas involucradas, existe la posibilidad de utilizar catalizadores para disminuir las temperaturas de disociación, utilizando hilos metálicos como catalizador. Se observa una disociación del hidrógeno a temperaturas de 1600 Kelvin; la descomposición del agua se

aprecia en porcentajes menores, pero esto se ve compensado en el aumento en la tasa de reacción debido al catalizador.

**5.3.4 Reformado.** Este proceso consiste en la reacción de un hidrocarburo con el vapor de agua. Básicamente se expone el hidrocarburo (generalmente metano) con vapor de agua, generando varias reacciones químicas que dan como resultado hidrógeno y dióxido de carbono, a unas condiciones de presión entre 3 y 25 bares y temperatura entre 700 y 900 °C.

Debido a la gran cantidad de energía involucrada en el proceso, generalmente se utiliza para producir a gran escala. En algunos casos la pureza del hidrógeno no es muy buena, por el contenido de azufre presente en el hidrocarburo.

*Ilustración 11 Reformado de vapor*

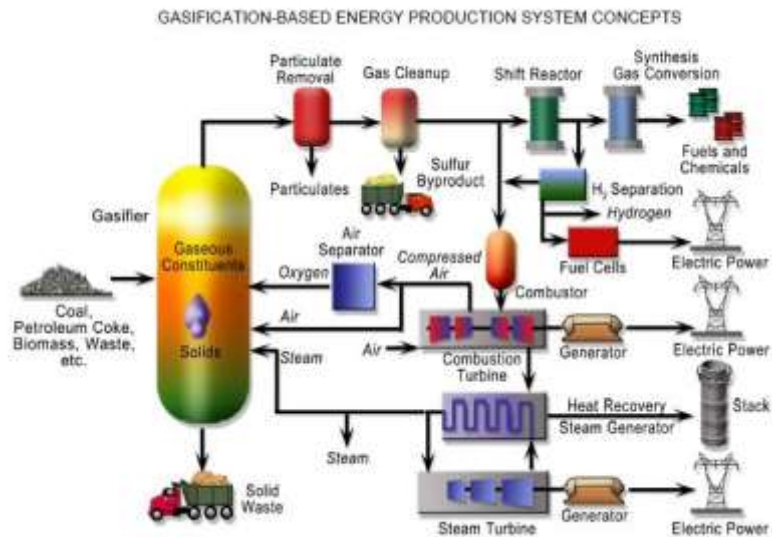


Fuente: [biotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec\\_7.htm](http://biotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_7.htm).

**5.3.5 Gasificación.** Se trata de un proceso termoquímico en el que las sustancias carbonosas (carbón o biomasa) se transforman en un gas combustible. Este proceso genera una serie de reacciones en las que son participes agentes gasificantes como el aire, oxígeno o el vapor de agua entre otros. La composición de estos gases depende de las condiciones en las que ha tenido lugar dicha gasificación. Por tanto, dependiendo del tipo de sustrato y del agente gasificante utilizado, dependerá el poder calorífico del gas.

**5.3.6 Bio-fotólisis.** También conocido como foto disociación biológica del agua, este proceso expone micro algas o cianobacterias a la luz del sol, las cuales transforman el agua en hidrógeno y oxígeno; hoy en día no es muy viable este proceso, debido a su bajo ritmo de producción, pero se está estudiando mucho acerca de este método, por su gran potencial y bajo consumo energético para la producción del hidrógeno. Se está haciendo énfasis en encontrar un tipo de organismo adecuado para aumentar la eficiencia de la producción de hidrógeno.

*Ilustración 12 Industria de gasificación*



Fuente: [https://jmirez.files.wordpress.com/2012/03/conversion\\_energy\\_4.jpg](https://jmirez.files.wordpress.com/2012/03/conversion_energy_4.jpg)

**5.3.7 Fermentación oscura.** El aprovechamiento energético de residuos por métodos biológicos, se suele vincular a la producción de metano en procesos de digestión anaerobia. Sin embargo, existen procesos biológicos, como la denominada fermentación oscura, que permiten obtener hidrógeno en lugar de metano como subproducto final de la conversión anaerobia de la materia orgánica. Este proceso se logra gracias a microorganismos anaerobios (que no utilizan oxígeno) los cuales digieren los residuos para obtener energía química generando como producto hidrógeno.

## **5.4 APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO EN LA INDUSTRIA**

El hidrógeno actualmente tiene aplicaciones en su gran mayoría industriales. Ya sea en la industria química, refinado de petróleo, metalúrgica o electrónica.

**5.4.1 Hidrógeno en la Industria Química.** Este es el campo donde el hidrógeno cobra más importancia. Participando en procesos como:

- Síntesis de amoníaco: En este proceso el nitrógeno y el hidrógeno se combinan entre ellos para formar amoníaco mediante una reacción exotérmica (11,01 kcal) que es seguida de una disminución del volumen alcanzando el equilibrio. El rendimiento mejora con la presión pero disminuye con la temperatura. Considerándose condiciones óptimas 1000 atm y 200°C con un rendimiento del 98,29 %.
- Procesos de Refinería: Son procesos de hidrogenación, los cuales tienen por objetivo la obtención de fracciones de crudo ligeras, disminuyendo su peso molecular y aumentando el contenido en hidrógeno. Durante este mismo

proceso también puede eliminarse del crudo, elementos no deseados como el azufre, el nitrógeno, o metales que pueda contener éste.

- Tratamiento de carbón: Mediante el tratamiento de carbón en presencia de hidrógeno, en diferentes condiciones de presión, temperatura, pueden obtenerse productos líquidos y/o gaseosos mediante diferentes procesos (hidrogenación, pirolisis, y gasificación).
- Aprovechamiento del Gas de Síntesis: Hablar de gas de síntesis, hace referencia a las diversas mezclas de monóxido de carbono e hidrógeno que se emplean para fabricar productos químicos. La forma más habitual de obtenerlo es a partir de metano, aunque también puede obtenerse con facilidad a partir de etano, propano o butano. La principal aplicación del gas de síntesis es la producción de amoníaco.
- Síntesis orgánica e inorgánica: En química orgánica el hidrógeno participa en un gran número de procesos de hidrogenación o reducción para la obtención de productos químicos e intermedios. En la síntesis inorgánica el hidrógeno es imprescindible en procesos de importancia comercial como por ejemplo la producción de ácido clorhídrico.

Ilustración 13 Diagrama porcentual del uso de hidrógeno en la Industria Química



Fuente: Fundación Bellona/AIE.

**5.4.2 Hidrógeno en la Industria Metalúrgica.** En la industria siderúrgica, el mineral de hierro puede ser reducido empleando coque o un gas que contenga hidrógeno, monóxido de carbono, o mezclas de éstos. Este gas reductor puede obtenerse mediante reformado con vapor de agua u oxidación parcial de combustibles fósiles. Además, en la industria metalúrgica, el hidrógeno se emplea como agente reductor y en procesos de producción de otros metales no-férricos como por ejemplo cobre, níquel o cobalto.

**5.4.3 Motores de combustión.** El uso de hidrógeno en motores de combustión interna es un campo que está recibiendo cada vez más interés. El hidrógeno es un excelente combustible, haciendo que los motores basados en este gas sean 20 % más eficaces que los que emplean gasolina.

Las investigaciones actuales se centran tanto en motores de combustión externa (motores Stirling) o interna para vehículos de transporte terrestre, aéreo y marítimo. Según describe la American Stirling Company (ASC), en los motores Stirling, el hidrógeno se utiliza como el gas de trabajo que se mueve de la parte fría a la caliente

del cilindro sellado.

## 5.5 APLICACIONES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Una pila o celda de combustible es un generador de energía donde el trabajo eléctrico se obtiene a partir de una reacción química, de ahí a que se trate de generadores electroquímicos. Se trata de una reacción de sentido único y flujo continuo siempre que estén presentes los reactivos; hidrógeno en el ánodo y aire en el cátodo. El electrolito es el elemento que intercambia protones entre las 2 partes, suele ser de material cerámico o bien una membrana.

Las aplicaciones de las pilas de combustible pueden abarcar una amplia variedad de productos: desde dispositivos portátiles (teléfonos móviles, ordenadores, pequeños electrodomésticos), donde las pilas empleadas son de pequeño tamaño, pasando por aplicaciones móviles como vehículos de todo tipo, hasta generadores de calor y energía en aplicaciones estacionarias para empresas, hospitales, zonas residenciales, viviendas, etc.

- Industria militar: Se espera que este sea el mercado más importante de la tecnología de las pilas de combustible. Los principales motivos de su uso en este campo son por su gran eficacia, versatilidad, tiempo de funcionamiento y ausencia de ruidos.
- Dispositivos portátiles: La posibilidad de ofrecer pilas de combustible con unas dimensiones mucho más pequeñas que las baterías convencionales y las mejoras en el tiempo de operación, facilidad de recarga o la reducción de

peso ha hecho que sean muchas las marcas que apuesten en un futuro muy cercano por estos dispositivos.

El primer caso es el más utilizado en los últimos años y actualmente se está trabajando en mejorar el funcionamiento de las pilas de metanol directo. Se han efectuado ensayos de DMFC en Estados Unidos para el suministro energético a teléfonos móviles, mientras que los ensayos en ordenadores portátiles se han desarrollado en Alemania.

- Misiones espaciales: La pila de combustible Grubb-Niedrach producida el año 1958 por General Electric fue la primera usada por la NASA para suministrar energía al proyecto espacial Gemini. Este fue el primer uso comercial de las celdas de combustible. EE.UU fue desde el principio el país que mostró más interés y el que dio los impulsos más fuertes para la investigación de las pilas aplicadas al campo aeroespacial. El motivo era encontrar una energía segura que asegurara el abastecimiento energético de las diversas misiones.
- Transporte: La mayoría de los fabricantes de automóviles ven las pilas PEM (de membrana polimérica) como sucesoras de los motores de combustión interna. General Motors, Ford, DaimlerChrysler, Toyota, Honda entre otros, disponen de prototipos con esta tecnología. Los ensayos en carretera han sido positivos empleando distintos vehículos y lugares. Se han realizado con éxito ensayos en autobuses impulsados con pilas PEM en Vancouver y Chicago. Se están llevando a cabo experiencias similares en distintas ciudades de Alemania junto con otras diez ciudades europeas incluida Madrid. Según datos de Pembina Institute for Appropriate Design de Alberta (Canadá), han mostrado que la cantidad de dióxido de carbono procedente de un coche pequeño puede reducirse hasta en un 72 % cuando se emplea una pila de combustible de hidrógeno obtenido a partir de gas natural en lugar

de un motor de combustión interna de gasolina. Esto incluso se mejoraría utilizando motores eléctricos.

- Abastecimiento energético en viviendas: Las dificultades técnicas a la hora de diseñar las pilas de combustibles se simplifican en las aplicaciones estáticas. La mayoría de las pilas de combustibles comercializadas, si no todas, son inmóviles y trabajan a gran escala (generando más de 50 kW de energía eléctrica). Hay, sin embargo, un potencial significativo para unidades menores para aplicaciones en viviendas (menores que 50 kW).

*Ilustración 14 Flota de buses en Inglaterra impulsada por hidrógeno*



Fuente:<http://www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/londres-pone-en-marcha-los-primeros-autobuses-a-hidrogeno>.

## **5.6 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE**

Una celda de combustible es un emisor energético-receptor de combustible que utiliza procesos químicos para producir energía eléctrica a partir de iones de

hidrógeno y átomos de oxígeno. Estos iones atraviesan una capa de electrolito (material que conduce electricidad), y reaccionan con los átomos de oxígeno. La celda de combustible al igual que la batería produce electricidad, pero difieren en que la celda nunca se descarga, la celda sigue produciendo energía mientras se disponga de combustible. Esta energía es proporcional al tamaño del electrolito, por lo cual se manejan láminas que pueden ser “apiladas” hasta llegar al nivel de energía que se pretende alcanzar. Una forma más sencilla de decirlo es que la celda usa la combinación de los gases de hidrógeno y oxígeno para producir agua y energía. Estableciendo una sencilla ecuación:

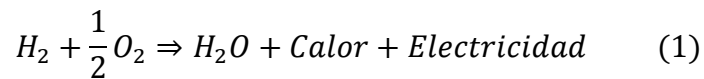
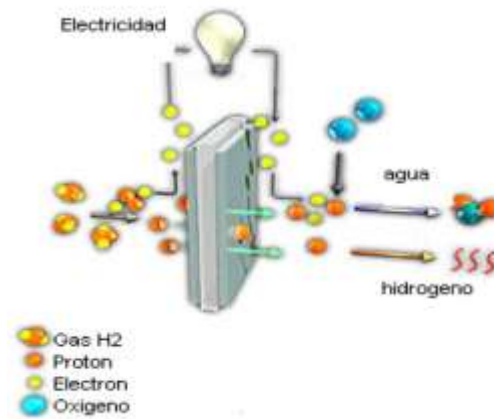


Ilustración 15 Principio de operación de una celda de combustible

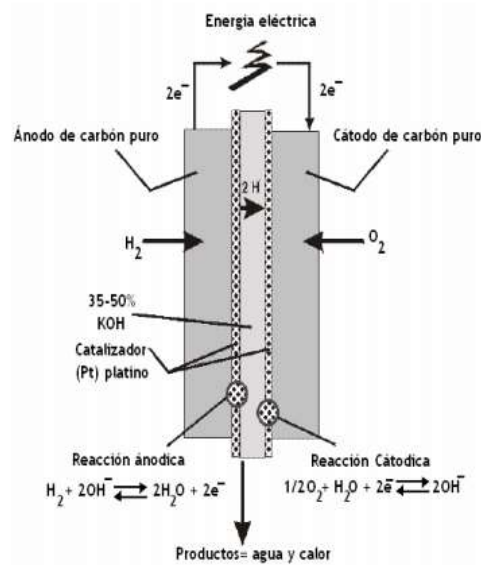


Fuente: Diseño de una pila de combustible de Hidrógeno para producir una diferencia de potencial de 12 voltios. Doñan, Oscar Eduardo y Sermeño, Salvador José (2008).

**5.6.1 Tipo de celdas de combustible.** Las celdas de combustible se diferencian o clasifican dependiendo de electrolito que usan:

**Celdas alcalinas (AFC):** Manejan una solución concentrada de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. El electrolito es retenido en una matriz (normalmente asbesto), se pueden usar una gran variedad de catalizadores (níquel, óxidos metálicos, plata y metales nobles). Esta celda es intolerante al CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) presente en el combustible o en el oxidante. Estas celdas han sido utilizadas en el programa espacial de la NASA (Apollo en 1960).

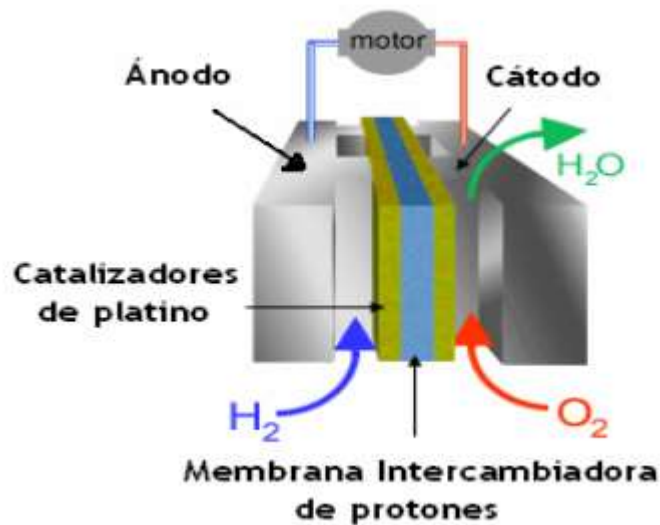
*Ilustración 16 Estructura de una celda de combustible alcalina. (AFC por sus siglas en ingles)*



Fuente: Tecnología de las celdas de combustibles y su interface electrónica de potencia para aplicaciones Domesticas e Industriales, CENIDET.

**Membrana de polímero electrolítico (PEMFC):** Utilizan una membrana delgada conductora de protones como electrolito. El catalizador es normalmente platino puesto en carbón, o se alimenta con hidrógeno cargado de monóxido de carbono (CO), se usan aleaciones de platino. La temperatura de operación varía entre 60°C y 80°C.

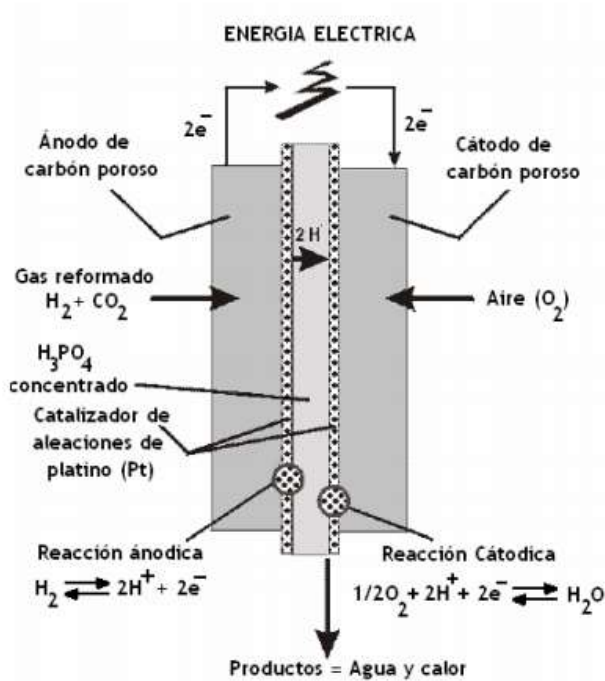
*Ilustración 17 Estructura de una celda de combustible de membrana de intercambio electrónico (PEMFC por sus siglas en inglés)*



Fuente: Tecnología de las celdas de combustibles y su interface electrónica de potencia para aplicaciones Domesticas e Industriales, CENIDET.

**Celdas de ácido fosfórico (PAFC):** El ácido fosfórico concentrado se usa al 100% y es usado como electrolito en esta celda, su temperatura de operación va desde 150°C a 200°C; a bajas temperaturas el ácido fosfórico es un pobre conductor de iones y el envenenamiento con monóxido de carbono en el electrolizador es perjudicial. La relativa estabilidad del ácido fosfórico concentrado es alta, comparado a otros ácidos comunes y consecuentemente la celda PAFC es capaz de operar con valores superiores a su temperatura de operación.

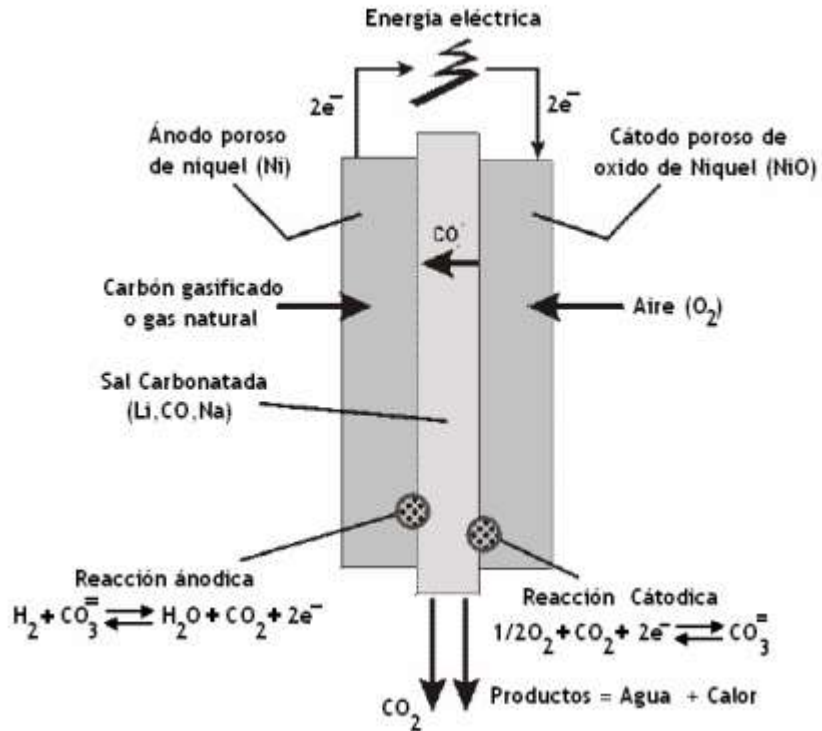
Ilustración 18 Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC por sus siglas en inglés)



Fuente: Tecnología de las celdas de combustibles y su interface electrónica de potencia para aplicaciones Domesticas e Industriales, CENIDET.

**Celdas de carbón derretido (MCFC):** Tienen un electrolito compuesto de una combinación de carbonatos alcalinos (Li, Na, K), la cual es retenida en una matriz de cerámica de  $LiAlO_2$ . Opera a temperaturas entre los  $600^\circ C$  y  $700^\circ C$ , a la cual los carbonatos forman una sal derretida extremadamente conductiva, los catalizadores hechos de metales nobles no son requeridos.

Ilustración 19 Celdas de carbón derretido (MCFC por sus siglas en ingles)



Fuente: Tecnología de las celdas de combustibles y su interface electrónica de potencia para aplicaciones Domesticas e Industriales, CENIDET.

**5.6.2 Aspectos ambientales en las celdas de combustibles.** Como se menciona anteriormente, una de las mayores ventajas en el uso de las celdas de combustible es el bajo nivel de emisiones contaminantes, lo que ha impulsado principalmente al desarrollo e investigación de este proyecto. Al utilizar hidrógeno como combustible, el único producto de la reacción electroquímica es el vapor de agua, sin la compañía del CO<sub>2</sub> que sí es producido por los combustibles fósiles. Esta ventaja a futuro va ser más aprovechada por la industria automotriz la cual su objetivo es la de vehículo “cero emisiones”.

Tabla 7. Tabla comparativa de emisiones contaminantes entre diversos tipos de vehículos

Tipo de vehículo	CRITERIOS DE EMISIONES CONTAMINANTES					Gases de efecto invernadero
	Gases orgánicos (no metanos)	Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> )	Partículas	
Línea base: máquina de combustión interna impulsada por gasolina (gramos por kilómetro)	0.48	3.81	0.28	0.035	0.01	282.5
Vehículo eléctrico (usando baterías)	-95%	-99%	-56%	+321%	+153%	-37%
Vehículo eléctrico a base de celdas de combustible (usando hidrógeno)	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-65%
Vehículo eléctrico a base de celdas de combustible (usando hidrógeno comprimido obtenido por vía solar)	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-94%
Vehículo eléctrico de baterías o celdas de combustible (alimentado por hidrógeno obtenido de la energía solar)	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

Fuente: <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/webmkro/submenu/investigacion/tesis/9%20Nestor%20Ramirez%20Morales.pdf>

**5.6.3 Ventajas en la selección de las celdas de combustible.** Los sistemas de las celdas de combustible son usualmente comparados a los de motores de combustión interna y baterías. Estos ofrecen ventajas únicas y desventajas con respecto a los últimos.

- Las celdas de combustible operan sin polución cuando funcionan con hidrógeno puro, el único producto de la reacción es el agua pura y calor. Cuando trabajan con una mezcla de hidrógeno y mezclas de gases, algunas emisiones dañinas son liberadas aunque son menores que las que emite un

motor de combustión interna usando combustibles fósiles convencionales. Sin embargo, los motores de combustión interna que queman mezcla de hidrógeno y aire también poseen niveles de polución extremadamente bajos que resultan de la quema accidental de aceite.

- Las celdas de combustible operan a una eficiencia termodinámica mayor que la de motores de calor. Los motores de calor como las turbinas y los motores de combustión interna, convierten la energía química en calor para luego ser convertida en energía mecánica. Siendo la eficiencia optima de Carnot en un motor de calor:

$$\eta_{carnot} = 1 + \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

Donde  $T_1$  es la temperatura absoluta de la entrada de gas caliente (en Rankine o Kelvin),  $T_2$  es la temperatura absoluta del gas frío.

- Además de tener una eficiencia térmica mayor que los motores de calor, las celdas de combustible también permiten una eficiencia mayor en cuanto a carga se refiere, y su eficiencia no disminuye drásticamente cuando decrece el tamaño de la celda.
- Las celdas de combustible exhiben características buenas de acoplamiento de carga. Como las baterías, que son dispositivos de estado sólido que reaccionan químicamente e instantáneamente a cambios de carga. Los sistemas de combustible sin embargo, son integrados a dispositivos

mecánicos predominantes los cuales tienen su propio tiempo de respuesta de demanda.

- Cuando se usan como dispositivos de generación de energía eléctrica, las celdas de combustible requieren menos energía de transformación que la energía asociada a un motor de calor. Cuando se usan para generar energía mecánica, se requiere el mismo número de conversiones, aunque las transformaciones sean diferentes. Cada transformación de energía tiene sus pérdidas asociadas así que menos transformaciones equivalen a menos pérdidas. Por lo tanto las celdas poseen una mayor eficiencia para aplicaciones que requieren energía eléctrica que otros dispositivos de generación.
- Las pilas de combustible operan a bajas temperaturas, menores a 100°C. Nos da la ventaja puesto que requieren menor tiempo de calentamiento para trabajo óptimo, evita los riesgos de trabajar con temperaturas altas, y la eficiencia de la reacción es mejor. Esto puede ser una desventaja en climas calientes puesto que es más difícil liberar el calor generado.
- Las celdas de combustible pueden ser utilizados en aplicaciones de cogeneración. Además de potencia eléctrica, las celdas generan agua con un grado medio de calor, que puede ser usado en aplicaciones industriales o aplicaciones de uso doméstico.
- Las celdas de combustible no requieren recarga. En realidad, deben ser abastecidos de combustible, lo que es más rápido que recargar una batería, y pueden proveer un tiempo mayor de operación dependiendo del tamaño del tanque.

**5.6.4 Desventajas de las celdas de combustible.** Estos sistemas también tienen sus desventajas.

- El hidrógeno representa un problema para las celdas de combustible. Esto se debe a que este es difícil de producir y de almacenar. Los procesos actuales son caros y requieren de bastante energía.
- Las celdas de combustible requieren combustible de alta pureza, libre de contaminantes. Estos contaminantes, incluidos el azufre, oxidantes y compuestos de carbono; pueden dañar el catalizador de la celda. Ninguno de estos contaminantes impiden la operación de un motor de combustión interna.
- El agua no debe congelarse dentro de la celda de combustible. Las celdas generan agua pura y cualquier residuo de esta no debe permitírsele que se congele. Al congelarse este aumenta su volumen y podría dañar la celda de combustible.
- Las celdas de combustible son una tecnología nueva. Por lo tanto la reducción en costos, peso y tamaño, además de mejoras en confiabilidad y tiempo de vida siguen siendo metas de diseño de ingeniería.

**5.6.5 Desempeño ideal de la celda.** El desempeño ideal de una celda de combustible está definido por su potencial de Nernst ( $E_{\text{Nernst}}$ ), el cual es el potencial a circuito abierto, es decir sin carga asociada.

La ecuación de Nernst provee una relación entre el potencial ideal ( $E^0$ ) para la reacción de la celda y el potencial ideal de equilibrio ( $E$ ) a otras temperaturas y presiones parciales de los reactivos y productos.

Una vez que el potencial ideal a condiciones estándar es determinado, el voltaje ideal puede ser calculado a otros valores de temperatura y presión por medio de la ecuación de Nernst. De acuerdo a esta ecuación, para una reacción que usa hidrógeno como combustible, el potencial ideal de la celda a condiciones estándar de temperatura y presión y el potencial ideal a otra temperatura, pueden ser incrementados mediante la manipulación de las presiones de los reactivos, y con ello el desempeño de la celda.

*Tabla 8. Reacciones electroquímicas en las celdas de combustibles*

Celda de combustible	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
PAFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
MCFC	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$
SOFC, TSOFC, ITSOFC	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$

Las reacciones mostradas en la tabla anterior muestran las reacciones en cada electrodo, en el caso de las celdas MCFC, SOFC, TSOFC, ITSOFC se presentan otras alternativas de reacciones en el ánodo, debido a la flexibilidad de usar combustibles como el metano y el dióxido de carbono.

Cuando un combustible impuro está presente en la reacción anódica se produce CO<sub>2</sub>. En el caso de las celdas de combustible de sales carbonatadas (MCFC) el CO<sub>2</sub> se requiere en la reacción del cátodo para mantener una concentración invariante de carbonato en el electrolito.

Debido a que en las celdas MCFC el CO<sub>2</sub> es producido en el ánodo y consumido en el cátodo y a que las concentraciones en las corrientes de alimentación del ánodo y cátodo no son necesariamente iguales, las presiones parciales de CO<sub>2</sub> están presentes en las ecuaciones de Nernst y se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 9. Ecuación de Nernst asociada a cada celda*

Celdas	Reacción global en la celda de combustible	Ecuación de Nernst asociada
PEMFC, PAFC		$E_{Nernst}$ $= E^0$ $+ \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left[ \frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right]$ $+ \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left( P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right)$

Tabla 9. Continuación

AFC	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_{2(c)} \rightarrow H_2O + CO_{2(a)}$	$E_{Nernst} = E^0 + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left[ \frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}(P_{CO_2})_{(a)}} \right] + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln [P_{O_2}^{\frac{1}{2}}(P_{CO_2})_{(c)}]$
MCFC	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$E_{Nernst} = E^0 + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left[ \frac{P_{CO}}{P_{CO_2}} \right] + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln (P_{O_2}^{\frac{1}{2}})$
SOFC, TSOFC, ITSOFC	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E_{Nernst} = E^0 + \left(\frac{RT}{8F}\right) \ln \left[ \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2O})^2(P_{CO_2})} \right] + \left(\frac{RT}{8F}\right) \ln (P_{O_2}^2)$

Donde:

(a): Ánodo.

(c): Cátodo.

$E^0$ : Potencial de equilibrio (es la *fem* de la celda a presión estándar).

F: Constante de Faraday.

P: Presión parcial del gas.

R: Constante universal de los gases.

T: Temperatura absoluta.

El potencial definido entre los electrodos como ( $E^0$ ) se define como la medida cuantitativa del máximo potencial de la celda, en este caso voltaje a circuito abierto y se define mediante la siguiente ecuación:

$$E^0 = \frac{-\Delta g_f}{2F} \quad (3)$$

Donde:

$-\Delta g_f$ : Cambio de la energía libre de Gibbs de formación.

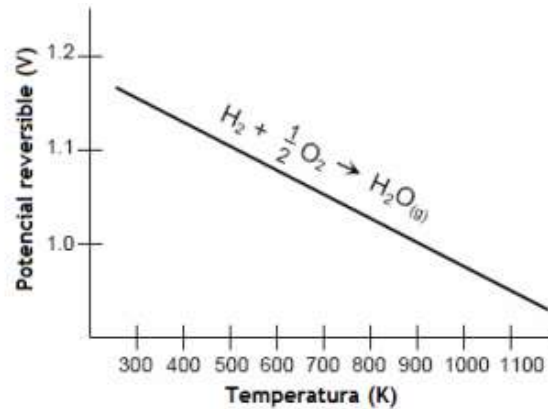
F: Es la constante de Faraday. (La carga presente en un mol de electrones).

El signo negativo indica que se trata de una pérdida de energía.

El valor estándar del potencial ideal ( $E^0$ ) para una celda, en la cual reaccionan  $H_2$  y  $O_2$  es de 1,229 Volts con agua como estado líquido como producto, o 1,18 Volts con vapor de agua. Este valor es mostrado en la mayoría de la literatura especializada en el tema como potencial de oxidación del hidrógeno.

En la siguiente figura se muestra el potencial de las celdas a altas temperaturas y corresponde a la reacción donde el agua está en estado gaseoso, entonces el valor de potencial a condiciones estándar es a 1,18 Volts.

Ilustración 20 Potencial ideal en una celda de combustible en función de la temperatura



Fuente:<http://www.cenidet.edu.mx/subaca/webmktro/submenus/investigacion/tesis/9%20Nestor%20Ramirez%20Morales.pdf>.

El desempeño ideal de una celda de combustible depende de las reacciones electroquímicas que ocurren entre los diferentes combustibles y el oxígeno. Las celdas de baja temperatura (PEMFC, AFC, y PAFC) requieren electro catalizadores de metales nobles para alcanzar velocidades de reacción adecuadas en el ánodo y cátodo y en la mayoría de los casos se usa hidrógeno como combustible.

**5.6.6 Energía libre de Gibbs.** Cualquier energía que un sistema pierda deberá ser ganada por el entorno y viceversa. Todo esto es conocido como la primera ley de la termodinámica, que también se denomina ley de la conservación de la energía.

Esta ley expresa como el cambio de la energía interna  $U$  de un sistema en cualquier proceso, y es igual al calor  $q$  agregado al sistema más el trabajo hecho sobre el sistema por su entorno.

En la naturaleza los procesos espontáneos ocurren siempre en una misma dirección: de un potencial alto a un potencial bajo y están acompañados por un incremento en la entropía del universo.

La segunda ley de la termodinámica sintetiza lo anterior como “Un proceso siempre ocurre en la dirección que cause un incremento en la entropía del universo”.

A partir de esta ley, es posible definir dos nuevas funciones de estado que dependen exclusivamente de las propiedades del sistema y establecer nuevos criterios de espontaneidad para un proceso. Estas dos nuevas funciones de estado son la energía libre de Gibbs y la energía de Helmholtz, las cuales se relacionan con la cantidad de trabajo que puede realizar un sistema.

Para una celda de hidrógeno operando a presión y temperatura estándar, significa que su energía libre de Gibbs de formación de entrada es cero.

La función de Gibbs de un sistema está definida en términos de la entropía y la entalpía, en términos sencillos la entropía se define como “la magnitud termodinámica que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir un trabajo. En un sentido más sencillo se interpreta como la medida del desorden de un sistema”.<sup>4</sup>

La entalpía se deduce como “el contenido calorífico del sistema”.

---

<sup>4</sup> [www.quimitube.com/termodinamica\\_energia\\_libre\\_Gibbs](http://www.quimitube.com/termodinamica_energia_libre_Gibbs)

La entalpía de un sistema es una función de estado y no depende de la historia del sistema, sino solo de su condición actual, por tanto, la energía de Gibbs de un sistema está definida por la siguiente ecuación:

$$G = H - TS \quad (4)$$

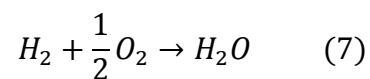
Escrita en forma molar, la energía libre de Gibbs molar de formación, la entalpía molar de formación y la entropía molar de formación se escriben de la siguiente manera:

$$\bar{g}_f = \bar{h}_f - T\bar{s} \quad (5)$$

En este caso, el cambio de la energía es importante. En una celda de combustible se asume como isotérmica, entonces se puede decir que la energía libre de Gibbs se define como:

$$\Delta\bar{g}_f = \Delta\bar{h}_f - T\Delta\bar{s} \quad (6)$$

Considerando la reacción global de la celda de combustible de hidrógeno:



Las entradas son un mol de hidrógeno  $H_2$  y media de mol de  $O_2$  y el producto obtenido es un mol de agua, de forma general entonces se puede definir que:

$$\Delta \bar{g}_f = g_f \text{ de productos} - g_f \text{ de reactivos} \quad (8)$$

Se puede escribir:

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{O_2} \quad (9)$$

Si no existen pérdidas en las celdas de combustible, es decir, el proceso es reversible, entonces toda la energía libre de Gibbs es convertida en energía eléctrica, en la práctica alguna de esta energía se libera en forma de calor. Esta simplificación se usa para encontrar el voltaje reversible a circuito abierto de una celda de combustible.

**5.6.7 Voltaje generado por una celda de combustible.** Para la celda de hidrógeno, dos moles de electrones pasan alrededor del circuito externo por cada mol de agua producida y cada mol de hidrógeno usado, así que, para un mol de hidrógeno usando  $2N$  electrones circulan por el circuito externo (donde  $N$  es el número de Avogadro). Si  $e^-$  es la carga de un electrón, entonces la carga que fluye en la celda está definida por:

$$-2N e = -2F \text{ Coulombs} \quad (10)$$

Donde  $F$  es la constante de Faraday, o la carga en un mol de electrones.

Si  $E$  se define como el voltaje de una celda de combustible, entonces el trabajo eléctrico realizado por el movimiento de cargas alrededor de este circuito es:

$$\text{Trabajo eléctrico hecho} = \text{carga} * \text{voltaje} = -2 * F * E \text{ (joules)} \quad (11)$$

Ahora bien, si el sistema es reversible (sin pérdidas) el trabajo eléctrico realizado será igual a la energía libre de Gibbs liberada  $\Delta\bar{g}_f$ . Así:

$$\Delta\bar{g}_f = -2 * F * E \quad (12)$$

Por tanto:

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \quad (13)$$

Esta ecuación define la fuerza electromotriz o el voltaje de circuito abierto de la celda de combustible de hidrógeno.

**5.6.8 Eficiencia real e ideal en una celda de combustible.** La eficiencia térmica de un aparato de conversión energética se define como el cociente de la cantidad de energía útil producida y el cambio de energía química almacenada (comúnmente denominada energía térmica) y que se produce cuando un combustible reacciona con un oxidante.

$$\eta_{Real} = \frac{\text{energía útil}}{\Delta H} \quad (14)$$

En el caso ideal de un convertidor electroquímico, como el de una celda de combustible se basa en el cambio de la energía libre de Gibbs  $\Delta G$  de la reacción es aprovechable como energía eléctrica útil a una temperatura de la conversión. La eficiencia ideal de una celda de combustible, operando reversible, es entonces:

$$\eta_{Ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (15)$$

Se puede analizar un ejemplo el cual; en condiciones normales, (25°C y atm de presión), la energía calorífica o cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) en la reacción tiene un valor -286 (kJ/mol) y es denominado como HHV (higher heating value). El máximo cambio de energía libre de Gibbs o fuerza electromotriz a condiciones estándar en una celda de combustible es de  $\Delta G = -237,2$  (kJ/mol), por lo tanto, la eficiencia termodinámica de una celda de combustible ideal operando reversiblemente con hidrógeno y oxígeno puros en condiciones estándar es:

$$eficiencia = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-237,2 \text{ kJ/mol}}{-286 \text{ kJ/mol}} = 0,83 \quad (16)$$

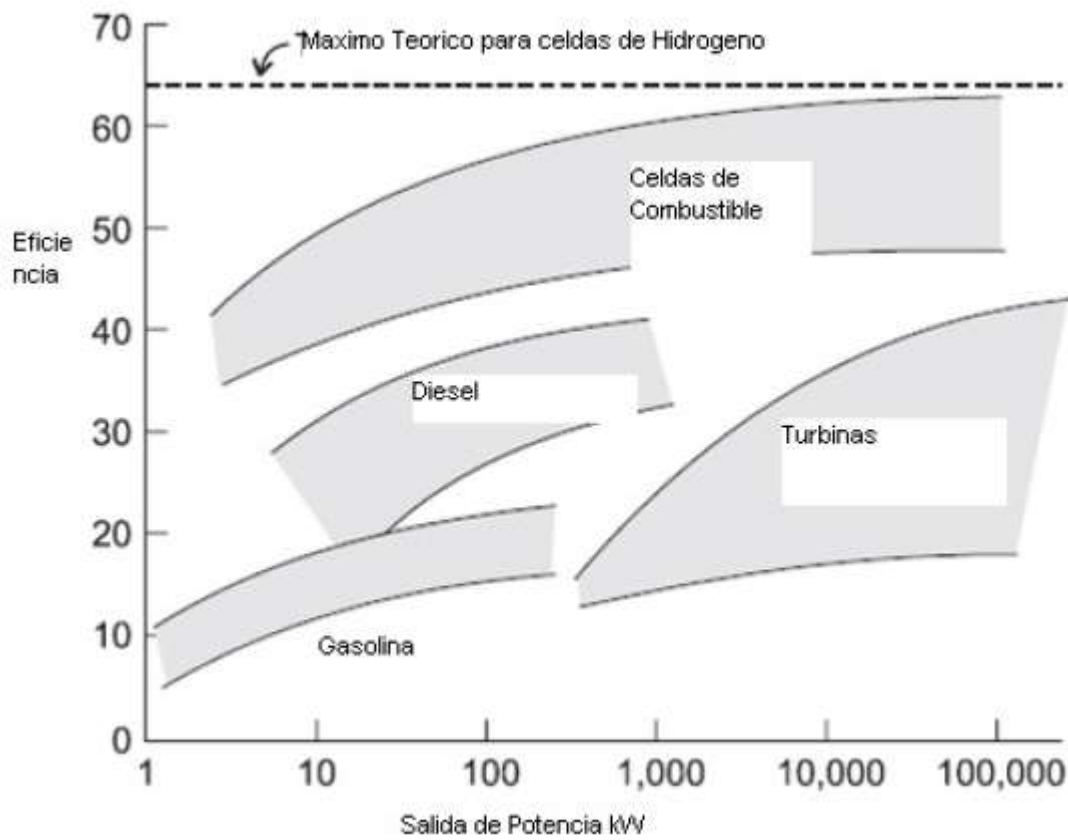
La eficiencia real de una celda de combustible se puede expresar como la relación entre la tensión de la celda en operación a su tensión ideal. La tensión real de la celda es menor que la tensión ideal debido a las pérdidas asociadas con las polarizaciones de activación, óhmicas y de concentración de la celda.

$$\eta_{real} = \frac{Energía \text{ útil}}{\Delta H} = \frac{Potencia \text{ útil}}{\left(\frac{\Delta G}{0,83}\right)} = \frac{Tensión_{Real} * corriente}{Tensión_{ideal} * \left(\frac{corriente}{0,83}\right)} \quad (17)$$

La tensión ideal de una celda reversible con hidrógeno y oxígeno puro a 1 atm de presión y 25°C es 1,229 Volts. Por lo tanto, la eficiencia térmica de una celda real funcionando a tensión de  $V_{celda}$ , basado en el poder calorífico superior está dado por;

$$\eta_{Real} = 0,83 * \frac{V_{celda}}{V_{ideal}} = \frac{0,83 * V_{celda}}{1,229} = 0,675V_{celda} \quad (18)$$

Ilustración 21 Comparación de la eficiencia con los diferentes sistemas de potencia

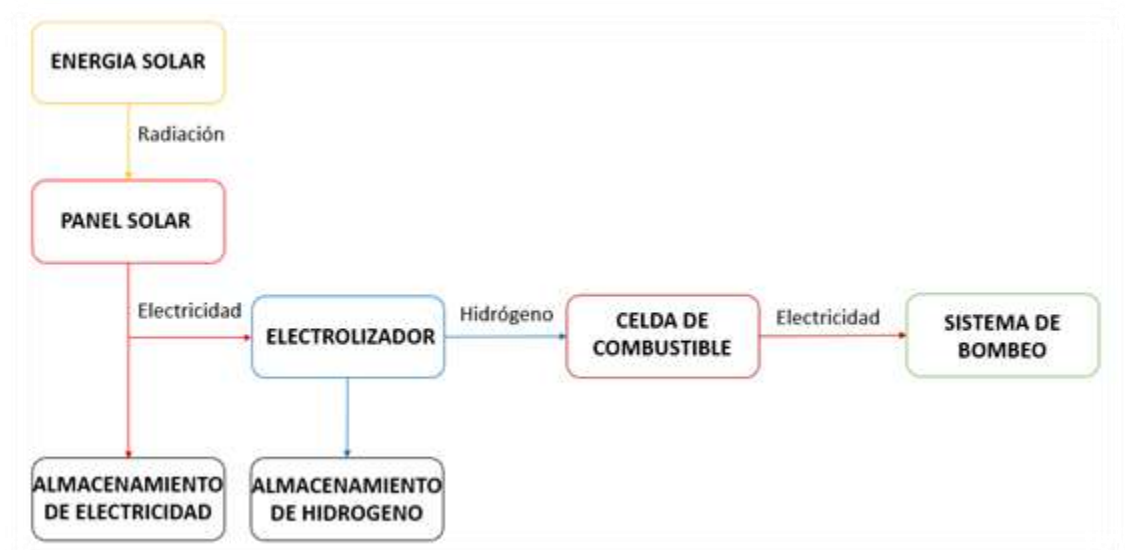


Fuente:<http://www.cenidet.edu.mx/subaca/webmktro/submenu/investigacion/tesis/9%20Nestor%20Ramirez%20Morales.pdf>.

## 6 DISEÑO DEL SISTEMA

De acuerdo con lo descrito en los objetivos específicos, se quiere diseñar y construir un modelo a escala, capaz de almacenar 40 litros de agua al día, a una altura de dos (2) metros de altura y un rata de 10 LPM. Para un análisis concreto, se ha subdividido en las siguientes fases o subsistemas:

Figura. Esquema básico del sistema.



- Subsistema de transporte de fluido: Bomba centrífuga con capacidad de mover 10 LPM a una altura de 2,50 metros, las tuberías y válvulas requeridas para llevar el fluido a un tanque de 10 litros de capacidad.
- Subsistema de potencia para la bomba: Basada en una celda de combustible alimentada por hidrogeno que genere 30W de potencia eléctrica.

- Subsistema de generación y almacenamiento de hidrogeno: Basado en un electrolizador que produzca 3 Litros/Hora de hidrogeno y un tanque de 10 (o más) litros para almacenar el hidrogeno a 30 bar de presión máxima.
- Subsistema de potencia para la producción del hidrogeno por electrolisis: Basado en celdas fotovoltaicas de 50W de potencia pico nominal.

Se determinará en el capítulo siguiente la viabilidad económica de este tipo de instalaciones.

## **6.1 DISEÑO CONCEPTUAL**

El diseño conceptual por definición, considera diferentes soluciones alternativas para cumplir los requerimientos del sistema. Es una de las fases principales del proceso del diseño, por el cual los integrantes del proyecto traducen los requisitos del prototipo a un lenguaje común compartido por los usuarios y calificadores del proyecto.

Se estudian cada uno de subsistemas y los componentes que lo conforman, desarrollando una función de calidad (QFD), para seleccionar entre las posibles alternativas.

**6.1.1 Diseño conceptual para el subsistema de transporte de fluido.** Se clasifican y ordenan los requerimientos según su importancia y se asigna un valor cuantitativo para relacionarlos entre sí. En el sistema, las bombas tienen la función de desplazar el fluido del depósito inferior al superior por medio de un sistema de bombeo, cuya altura máxima es de 2,50 metros a una velocidad 10 litros en un minuto:

*Tabla 10. Requerimientos organizados y valorados.*

Aspecto	Valor asignado
Económica	10
Bajo consumo de energía	9
Costos de mantenimiento	8
Fácil operatividad	7
Funcional	6
Resistente	5
Piezas de poco desgaste y corrosión	4
No contaminante	3
Estética	2
Sonoridad	1

Con estas características, encontramos dos tipos de bomba en el mercado que nos pueden ser útiles:

*Tabla 11. Bombas y sus especificaciones*

Tipo de bomba	Unidades	Potencia consumida (Watt)	Voltaje (Volt)	Cabeza máxima de altura (mts)	Caudal (litros por minuto)	Valor comercial (COP)
Bomba sumergible para acuario	1	12	110	4	12	110 900
Bombas eléctricas en paralelo para gasolina	2	22	12	2,5	10	90 000

Una de las ventajas que se visualizan en este cuadro comparativo, es la opción de dos bombas en paralelo eléctricas que se usan para tanques de gasolina. Ya que trabajan con corriente continua. De esta forma, la omisión del uso de inversor de corriente el cual disminuiría la eficiencia total del sistema.

Tabla 12. Matriz de calidad de la bomba.

		Bomba sumergible para acuario		Bombas eléctricas en paralelo para gasolina	
Económica	10	60	6	80	8
Bajo consumo de energía	9	72	8	90	10
Costos de mantenimiento	8	72	9	80	10
Fácil operatividad	7	70	10	70	10
Funcional	6	42	7	54	9
Resistente	5	35	7	50	10
Piezas de poco desgaste y corrosión	4	40	10	36	9
No contaminante	3	30	10	30	10
Estética	2	16	8	14	7
Sonoridad	1	10	10	10	10
Total		447		514	

Con estos resultados de la matriz de calidad, se identifica la opción más viable. Dando como resultado las bombas eléctricas en paralelo para gasolina.

Tabla 13. Resultados ponderados

	Puntaje	Ponderación
Bomba sumergible para acuario	447	46,5%
Bombas eléctricas en paralelo para gasolina	514	53,5%

### 6.1.2 Diseño conceptual para el abastecimiento de energía de la bomba.

Existen 7 tipos diferentes de celdas de combustible, las cuales se analizan y se seleccionan:

Tabla 14. Factores de valoración de la selección de la celda de combustible

Aspecto	Valor asignado
Económica	10
Eficiencia de producción de energía	9
Costos de mantenimiento	8
Tipo de combustible	7
Temperatura de Operación	6
Resistente	5
Piezas de poco desgaste y corrosión	4
No contaminante	3

Tabla 14. Continuación

Estética	2
Sonoridad	1

Tabla 15. Diferentes tipos de celdas de combustible

Característica	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC	AFC	DMCF
<b>Electrolito</b>	Ácido Fosfórico	Polímero	Carbonato fundido	Oxido Solido	Hidróxido de potasio	Oxido Solido
<b>Temperatura de operación</b>	175-200°C	60-100°C	600-1000°C	600-1000°C	90-100°C	60-100°C
<b>Combustibles</b>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> -OH
<b>Reformado</b>	Externo	Externo	Interno	Externo	Externo	Externo
<b>Oxidante</b>	O <sub>2</sub> , Aire	O <sub>2</sub> , Aire	O <sub>2</sub> , Aire, CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , Aire	O <sub>2</sub> , Aire	O <sub>2</sub> , Aire
<b>Eficiencia</b>	40-50%	40-50%	50-60%	45-55%	45-55%	45-55%

Según la anterior tabla, se plantea la matriz de calidad para la selección óptima de la celda de combustible.

Tabla 16. Matriz de calidad para la celda de combustible

		PAFC		PEMFC		MCFC		SOFC		AFC		DMFC	
Económica	10	60	6	80	8	50	5	50	5	50	5	50	5
Eficiencia de producción de energía	9	72	8	72	8	81	9	54	6	54	6	54	6
Costos de Mantenimiento	8	64	8	80	10	64	8	56	7	64	8	48	6
Tipo de Combustible	7	49	7	56	8	63	9	63	9	63	9	49	7
Temperatura de Operación	6	42	7	60	10	30	5	30	5	30	5	60	10
Resistente	5	35	7	50	10	35	7	35	7	30	6	35	7
Piezas de poco desgaste y corrosión	4	24	6	40	10	28	7	24	6	32	8	28	7
No contaminante	3	30	10	30	10	24	8	21	7	24	8	24	8
Estética	2	16	8	18	9	16	8	16	8	16	8	16	8
Sonoridad	1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Total		402		496		401		359		373		374	

Las celdas PEM son de nueva tecnología, debido a eso, por sus bajos costos de producción y mayor eficiencia, se consiguen a mayor número en el mercado y a un costo más exequible.

*Tabla 17. Ponderación de la matriz de calidad para la celda de combustible*

	<b>Puntaje</b>	<b>Ponderación</b>
PAFC	402	16.7%
PEMFC	496	20.7%
MCFC	401	16.6%
SOFC	359	14.9%
AFC	373	15.5%
DMFC	374	15.6%

**6.1.3 Diseño conceptual para el subsistema de generación de hidrógeno.** La producción de hidrógeno mediante el proceso electrolizador. Se rigen bajo la misma tecnología de las celdas de combustible, por lo tanto, los parámetros a seleccionar serán muy parecidos. Por lo tanto, la tecnología que más se adecua a la generación de 3 litros por hora diario y una pureza mayor a 99,9% que demanda la celda de combustible es la de electrolizadores de tecnología PEM.

**6.1.4 Diseño conceptual para el subsistema de almacenamiento de hidrógeno.** El volumen que ocupa un combustible es un factor importante para su almacenamiento y transporte. Se requiere entonces emplear un método que densifique al hidrógeno y que permita transportarlo en forma segura y poco costosa, para poder ser llevado sin dificultades a bordo de los vehículos o aplicaciones móviles evitando agregar peso adicional excesivo.

Existen 4 formas de almacenamiento de hidrógeno:

**Hidrógeno en estado gaseoso comprimido:** Los sistemas de almacenamiento de gas comprimido son los más comunes y más considerablemente desarrollados en lo que se refiere a métodos de almacenamiento. La mayoría de las aplicaciones que se abastecen de hidrógeno usan esta forma de almacenamiento. El hidrógeno a alta presión se almacena en cilindros, similares a los usados para gas natural comprimido. La mayoría de cilindros poseen paredes cilíndricas con domos hemisféricos en las puntas, aunque los nuevos diseños usen cilindros múltiples en serie y distorsionan la forma cilíndrica para incrementar el volumen utilizable.

*Tabla 18. Clasificación de los cilindros de gas a alta presión*

Designación	Descripción	% de carga del Metal vs. Compuesto
Tipo 1	Cilindro hecho completamente de acero o aluminio.	100/0
Tipo 2	Cilindro con una línea de acero o aluminio y una	55/45

Tabla 18. Continuación

	capa circunferencial de compuesto.	
Tipo 3	Cilindro con una capa de acero o aluminio y una cobertura completa tejido de compuestos	20/80
Tipo 4	Cilindro con una capa delgada de plástico y una cobertura completa de tejida de material compuesto.	0/100

En general, mientras menos metal se utilice menor el peso. Por lo cual los cilindros tipo 3 son los más utilizados para aplicaciones de hidrógeno. Y los de tipo 4 serán utilizados más a futuro. Los pesos específicos dependen de los fabricantes pero en términos generales un cilindro tipo 1 pesa 100 kg, un tipo 3 pesa 65 kg y un tipo 4 pesa 30 kg.

*Ilustración 22. Cilindro tipo 3*



Fuente: Ensayo de un electrolizador. Huete Guzmán, Mario (2012).

**Hidrógeno líquido:** Esta forma de almacenamiento permite incrementar la masa de hidrógeno con relación al volumen del contenedor. Se almacena en tanques criogénicos a  $-252\text{ °C}$  a presión atmosférica. Debido a la baja temperatura crítica del hidrógeno ( $-241\text{ °C}$ ), solo puede almacenarse en forma líquida en sistemas abiertos para evitar una fuerte sobre presión. Por lo tanto, la transferencia de calor a través de las paredes del contenedor produce una pérdida en función del tamaño, la forma y el aislamiento térmico del recipiente. También es proporcional a la relación superficie/volumen, por lo cual la velocidad de evaporación disminuye al aumentar el tamaño del contenedor. Para recipientes térmicos tipo Dewar esféricos de doble pared con aislamiento de vacío, las pérdidas por evaporación por día son: 0,4% para los tanques cuyo volumen es de  $50\text{ m}^3$ , 0,2% para los de  $100\text{ m}^3$  y 0,06% para los de  $600\text{ m}^3$ .

El trabajo necesario para licuar el hidrógeno desde la temperatura ambiente es  $3,23\text{ kWh/kg}$ , pero el trabajo técnico es  $15,2\text{ kWh/kg}$ , casi la mitad del valor calórico más bajo de combustión. El gran consumo de energía para la licuefacción y la continua pérdida por evaporación limitan el posible uso de sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido para aplicaciones donde el costo del hidrógeno no es importante y el gas es consumido en un corto tiempo, como por ejemplo en aplicaciones aéreas o espaciales.

El hidrógeno no puede ser almacenado en forma líquida indefinidamente. Todos los tanques sin importar que tan bien aislados estén, encontrarán fugas de transferencia de calor desde los alrededores. La fuga de calor depende del diseño y tamaño del tanque. Los tanques de almacenamiento son regularmente esféricos puesto que esta forma ofrece el área superficial menor para un volumen dado. Los tanques de almacenamiento tienen un capacidad de sobre presión de cerca de 5 bares; si el hidrógeno no se consume más rápido de lo que se vaporiza, la presión se

incrementa hasta el punto donde se descarga al exterior por medio de la válvula de alivio. Este hidrógeno no representa solamente una pérdida de dinero sino también un riesgo de incendio. Para este tipo de almacenamiento debe poseer un método adecuado de ventilación que reduzca la acumulación de hidrógeno. Los tanques de hidrógeno líquido no necesitan ser tan fuertes como los cilindros de alta presión.

El hidrógeno líquido es más denso que el gas hidrógeno pero es mucho mayor que la gasolina en una equivalencia energética. Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido son de cuatro a diez veces más pesados y más grandes que un tanque equivalente de gasolina.

La licuefacción del hidrógeno es un proceso que requiere de mucha energía debido a las bajas temperaturas involucradas. Los pasos de la licuefacción son los siguientes:

1. La compresión del hidrógeno utilizando compresores reciprocantes, enfriamiento del gas comprimido a temperaturas del nitrógeno líquido -  $195^{\circ}\text{C}$  (78 K).
2. Expansión a través de turbinas.
3. Conversión catalítica a su forma estable.

En total la energía requerida para el proceso de licuefacción es equivalente al 40% del LHV del hidrógeno. Una vez en su forma líquida, el hidrógeno es fácilmente transportado y fácil de usar.

**Hidruros metálicos:** Algunos hidruros metálicos absorben y liberan hidrógeno a temperatura ambiente y a presión constante, cercana a la presión atmosférica. Estas propiedades son importantes para el almacenamiento de hidrógeno. El proceso consiste en absorber el gas a baja temperatura y a una presión suficiente para que la aleación se hidrure completamente. Por razones prácticas y económicas las presiones de carga no debieran ser mayores que 27 bares y las de descargas no menores que 2 bares y las temperaturas no menores que 10°C ni mayores que 100°C, para la absorción y la liberación, respectivamente. Estas limitaciones de presión y de temperatura se imponen para evitar un aumento indeseable de los requerimientos de energía y equipos de soporte. La energía involucrada para operar con un sistema de almacenamiento empleando hidruro metálico es relativamente baja, del orden del 12% del calor de combustión del hidrógeno.

Una de las características de los hidruros metálicos es su fragilidad y en algunos casos, el aumento de volumen de hasta un 25% respecto del material no hidrurado. Esto hace que en unos pocos ciclos de absorción – liberación se produzca un envejecimiento del material transformándose en polvo con tamaño de partículas del orden del micrón, lo cual dificulta el flujo del calor, que es necesario para que el proceso sea cinéticamente eficiente. La velocidad a la que la aleación hidrurada pueda absorber o liberar hidrógeno depende de la transferencia de calor hacia dentro o fuera de la aleación. Es muy importante tener en cuenta este aspecto en el diseño de los recipientes contenedores de hidruros.

Se observa que, en general, la capacidad de almacenamiento gravimétrica de los hidruros de compuestos inter metálicos está limitada a no más de 3% en masa, si bien la densidad volumétrica de hidrógeno es el doble que la del hidrógeno líquido (Tabla II). Una excepción es el elemento Magnesio, que por ser un metal liviano, su hidruro (de carácter iónico/covalente) tiene una capacidad de almacenamiento de

7,6% en masa. Pero posee dos grandes desventajas dadas por su cinética lenta y su baja presión de equilibrio a temperatura ambiente, por lo cual para tener presiones útiles de liberación su aplicación resulta práctica sólo a temperaturas del orden de 300°C. Actualmente se está trabajando para mejorar su comportamiento, basándose en la adición de elementos o compuestos catalizadores mediante aleado mecánico con molino de bolas, que producen un polvo muy fino de compuesto nanoestructurado que mejora en forma considerable la cinética y permite bajar la temperatura de liberación, sin desmejorar apreciablemente la capacidad (~5 a 6 % en masa).

*Tabla 19. Algunos importantes compuestos intermetálicos formadores de hidruro*

Familia	Metal	Hidruro	H % masa	kgr H <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	P <sub>eq.</sub> , T
Elemental	Mg	MgH <sub>2</sub>	7,6	110	1 bar, 573 K
AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6,5</sub>	1,37	115	2 bar, 298 K
AB <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub> H <sub>5,5</sub>	3,01		10 <sup>-8</sup> bar, 323 K
AB	FeTi	FeTiH <sub>1,9</sub>	1,89	112	5 bar, 303 K
A <sub>2</sub> B	Mg <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	3,59	97	1 bar, 555 K
AB <sub>2</sub> (b.c.c.)	TiV <sub>2</sub>	TiV <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,6		10 bar, 313

Fuente: <http://www.inifta.unlp.edu.ar/extension/Hidrogeno.pdf>

El sistema que tiene más futuro y por el cual se debe desarrollar más estudio de nuevos materiales, es por medio de hidruros metálicos. Ya que la relación de tamaño por almacenamiento energético podría ser muy alta y rentable.

Es por eso que se utiliza los hidruros metálicos como componentes de almacenamiento.

Tabla 20. Factores de valoración para almacenar hidrógeno

Aspecto	Valor asignado
Seguridad	10
Economía	9
Costos de mantenimiento	8
Capacidad de almacenamiento	7
Temperatura de Operación	6
Tamaño	5
Piezas de poco desgaste y corrosión	4
No contaminante	3
Resistente	2
Estética	1

Tabla 21. Matriz de calidad para el almacenamiento de hidrógeno

		Cilindros alta presión		Almacenamiento líquido		Hidruros metálicos	
Seguridad	10	70	7	90	9	100	10
Economía	9	81	9	27	3	54	6
Costos de Mantenimiento	8	64	8	16	2	80	10

**Tabla 21. Continuación**

Capacidad de almacenamiento	7	42	6	56	8	70	10
Temperatura de Operación	6	36	6	24	4	60	10
Tamaño	5	35	7	40	8	50	10
Piezas de poco desgaste y corrosión	4	32	8	24	6	36	9
No contaminante	3	24	8	18	6	30	10
Resistente	2	18	9	18	9	18	9
Estética	1	9	9	8	8	9	9
<b>Total</b>		411		321		507	

*Tabla 22. Resultados ponderados para el almacenamiento de hidrógeno*

	<b>Puntaje</b>	<b>Ponderación</b>
Tanque alta presión	411	33.2%
Almacenamiento líquido	321	25.9%
Hidruros metálicos	507	40.9%

**6.1.5 Diseño del subsistema de potencia para la producción del hidrogeno por electrolisis.** Se estudian dos sistemas de energía renovable para así, poderlo hacer un poco más rentable:

- Panel solar capaz de producir 50 Watt de potencia.
- Sistema eólico capaz de producir 50 Watt de potencia.

**Panel Solar:** Este sistema está basado en la captación de los rayos solares por los paneles solares para la entrega de potencia que requiere el electrolizador para poder generar hidrógeno.

Cuanto mayor sea la cantidad de fotones que golpean la célula, mayor será la relación electrón-carga positiva producidas por el efecto fotovoltaico y por lo tanto, más elevada la cantidad de corriente producida.

*Ilustración 23. Esquema básico de un panel solar fotovoltaico*



Fuente: <http://maraliz.wordpress.com/2011/07/06/energia-fotovoltaica/>

El aprovechamiento de la energía solar para la generación de electricidad favorece la sostenibilidad del medio ambiente, pues evita que se genere electricidad a partir de combustibles fósiles no renovables (reduciendo las emisiones de gases asociados a éstos) y de centrales nucleares. La energía solar fotovoltaica distribuida, además, no requiere ocupación de espacio adicional, pues se puede instalar en tejados o integrarla en edificios.

En referencia a los aspectos económicos y sociales, la energía solar fotovoltaica permite reducir la tasa de dependencia exterior para el abastecimiento de combustibles y aumentar así la seguridad en el suministro. Esta seguridad resulta también reforzada por una mayor diversificación de las fuentes energéticas.

La energía solar fotovoltaica también evita costes de mantenimiento y transporte de las líneas eléctricas, tanto en zonas de difícil acceso, donde no llega la red, como en áreas urbanas, donde muchas veces coinciden las puntas de demanda eléctrica con los momentos de máxima insolación. Una vez instalada, tiene un coste energético de mantenimiento casi nulo.

*Tabla 23. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaicas*

Energía solar fotovoltaica	
Ventajas	Desventajas

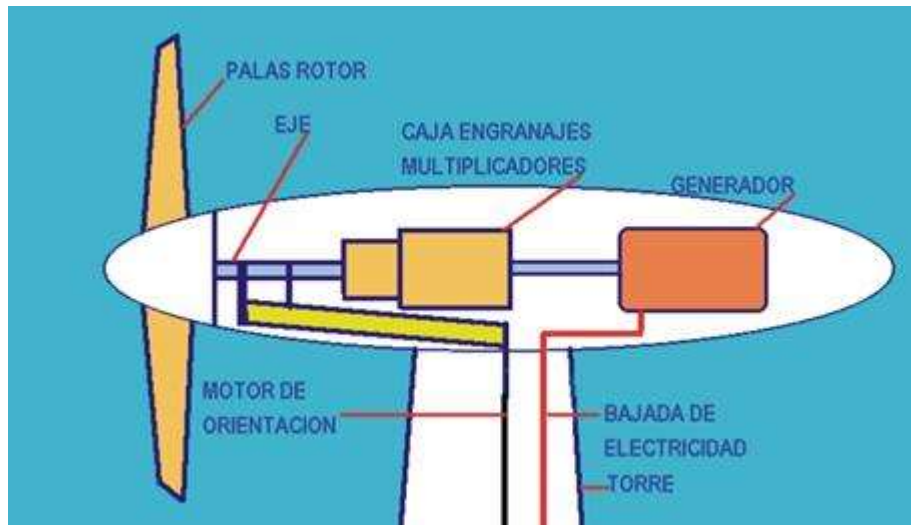
Tabla 23. Continuación

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite crear electricidad en áreas remotas las cuales es difícil la instalación de cableado.</li> <li>• Uso de tecnología renovable amigable con el medio ambiente.</li> <li>• Bajo costo de mantenimiento.</li> <li>• Independencia de abastecimiento energético a terceros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coste de inversión inicial elevado a diferencia de las fuentes de energía tradicionales.</li> <li>• Solo se genera energía en presencia de radiación solar.</li> <li>• Tecnología de acumulación de energía eficiente en fase de desarrollo.</li> <li>• Producción de energía variable, dependiente de los cambios climáticos.</li> <li>• Periodo de amortización de la inversión es largo, aproximadamente 10 años.</li> <li>• Rendimiento es bajo, debido a la baja eficiencia de las células inferior al 20%.</li> </ul>
--	--

**Energía eólica:** Un aerogenerador es un dispositivo que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica. En la actualidad, casi la totalidad de las turbinas eólicas son del tipo eje horizontal y tripalas. El funcionamiento de las antiguas turbinas eólicas, de modo similar a los molinos de viento, se basaba en el principio de la resistencia al arrastre que ofrecen las palas frente a la acción del viento. Este diseño, no aerodinámico, conducía a un rendimiento de conversión de

la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje de la máquina muy pequeño, con valores en torno al 12%.

*Ilustración 24. Esquema básico de un aerogenerador*



Fuente: <http://web.ing.puc.cl/power/alumno03/alternativa.htm>

El viento es aire en movimiento y es una forma indirecta de la energía solar. Este movimiento de las masas de aire se origina por diferencias de temperatura causada por la radiación solar sobre la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra, crean entonces los, llamados, patrones globales de circulación de aire.

Se calcula que entre el 1 y el 2% de la energía proveniente del Sol se convierte en viento. Si se excluyen las áreas de gran valor ambiental, esto supone un potencial de energía eólica de 53 TWh/año en el mundo, es decir, cinco veces más que el actual consumo eléctrico en todo el planeta. Por tanto, en teoría, la energía eólica permitiría atender sobradamente las necesidades energéticas del mundo.

La principal desventaja de la energía eólica es la incapacidad para controlar el viento. Al ser una energía menos predecible la descartamos en este proyecto como única fuente de generación eléctrica. Para salvar los momentos en los que no se dispone de viento suficiente para la producción de energía eólica es indispensable un respaldo de las energías convencionales y el resto de renovables.

## 7 CÁLCULOS Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Para el diseño y construcción de un modelo a escala, capaz de almacenar 40 litros de agua al día, a una altura de dos (2) metros y un caudal constante de 10 LPM usando energía alternativa, es necesario dividirlo en varios subsistemas:

- Subsistema de transporte de fluido.
- Subsistema de abastecimiento de energía para la bomba.
- Subsistema de generación y almacenamiento de hidrógeno.
- Subsistema de abastecimiento de energía para la producción del Hidrógeno por electrolisis.

*Ilustración 25. Prototipo desarrollado*



Una vez definido cada subsistema, se realiza el cálculo de la eficiencia que cada uno aporta y describir los elementos que lo componen. Por lo anterior, el subsistema de transporte de fluido posee dos bombas centrifugas generalmente utilizadas para suministrar gasolina a los motores de combustión interna de los automóviles, tubería en PVC y acoples para desplazar el fluido de un tanque de almacenamiento a otro. El abastecimiento energético de la bomba es por medio de celdas de combustible, con su sistema de control y regulación de hidrógeno y voltaje.

El hidrógeno es producido por un electrolizador y almacenado por tanques compuestos de hidruros metálicos. La electrolisis o separación del hidrógeno y el oxígeno en el agua, se hace efectiva gracias a la corriente eléctrica que le proporcionamos por medio de los paneles solares.

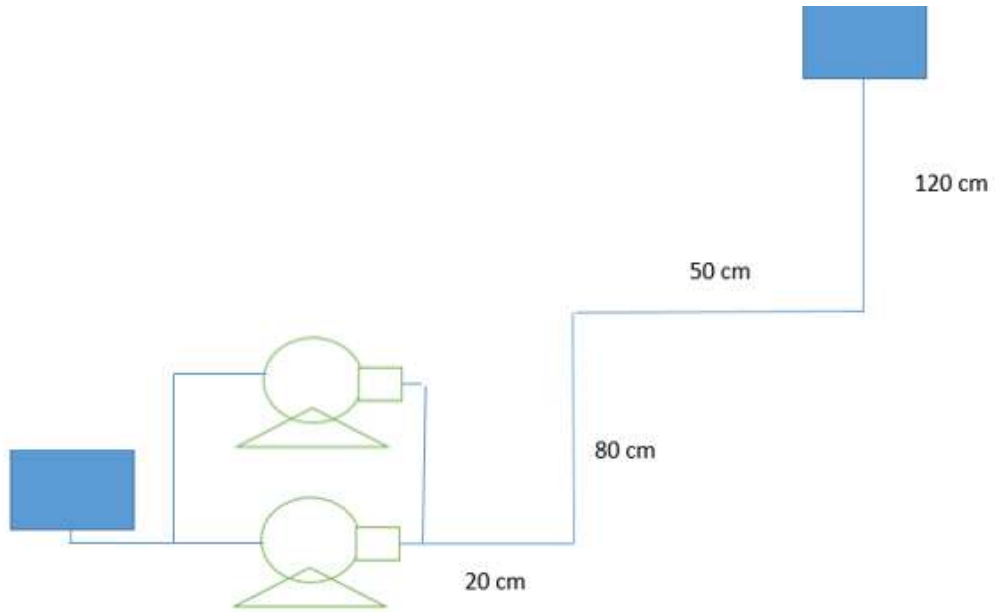
Para el subsistema de abastecimiento de energía para la producción de hidrogeno por electrolisis, se calcula la cantidad de irradiación en un tiempo determinado por una superficie y la selección de los paneles solares.

Por lo anterior, el presente capítulo presentará cada subsistema y los elementos que componen cada fase, además del cálculo necesario para el modelo.

## **7.1 SUBSISTEMA DE TRANSPORTE DE FLUIDO**

El subsistema de transporte de fluido tiene los siguientes elementos: dos bombas centrifuga en paralelo con capacidad de mover 10 LPM a una altura de 2,50 metros, tuberías y válvulas para llevar el fluido a un tanque de 10 litros de capacidad.

Ilustración 26. Esquema básico de los tramos de las tuberías



Con base al pequeño flujo demandado se seleccionaron dos bombas de marca Bosch de corriente continua, de 5 GPM para cumplir con los objetivos requeridos, normalmente utilizada para el abastecimiento de gasolina en los automóviles. El análisis del subsistema se reducirá a la evaluación de la capacidad de la bomba de soportar las pérdidas de presión por fricción en las tuberías y accesorios y la diferencia de niveles de los tanques que establece la ecuación:

$$H_{BOMBA} = H_D - H_s + \frac{P_D - P_S}{\gamma} + h_l + h_A \quad (19)$$

Donde:

$H_{BOMBA}$  : Cabeza de presión.

$H_D$  : Altura de descarga.

$H_S$  : Altura de succión.

$P_D$  : Presión en el recipiente de descarga.

$P_S$  : Presión en el recipiente de succión.

$\gamma$  : Peso específico del fluido.

$h_l$  : Perdida en las tuberías.

$h_A$  : Perdida en los accesorios.

*Ilustración 27. Bomba para suministro de gasolina marca Bosch*



Para este caso, la presión en el recipiente de descarga es igual a la presión en el recipiente de succión, por lo tanto, la carga estática total es la diferencia de altura entre el recipiente de descarga y el recipiente de succión; que es igual a 2,00 metros.

**7.1.1 Cálculo de pérdidas en tuberías.** La selección de tubería de PVC transparente de un diámetro de 2 centímetros es de acuerdo al tipo de bomba que se utiliza, siendo prioridad las ventajas que brinda la bomba seleccionada sobre las pérdidas por material y diámetro de la tubería. Las pérdidas de carga en las tuberías se determinan mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_l = \frac{flv^2}{2Dg} = \frac{8flQ^2}{D^5g\pi^2} \quad (20)$$

Donde:

$Q$  : Caudal (m<sup>3</sup>/s).

$h_l$  : Pérdida de carga en tuberías (m).

$f$  : Factor de fricción (adimensional).

$l$ : Longitud de la tubería (m).

$D$  : Diámetro de la tubería (m).

$g$  : Aceleración de la gravedad. (m/s<sup>2</sup>).

*Tabla 24. Cálculo de pérdida en tuberías*

	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Factor de fricción $f$ (adimensional)	Diámetro de tubería (m)	Longitud de la tubería (m)	Pérdida en tubería $h_l$ (m)
Tramo 1	1,67x10 <sup>-5</sup>	0,0015	0,02	0,2	2,163x10 <sup>-6</sup>
Tramo 2	1,67x10 <sup>-5</sup>	0,0015	0,02	0,8	8,65x10 <sup>-6</sup>

Tabla 24. Continuación

Tramo 3	$1,67 \times 10^{-5}$	0,0015	0,02	0,5	$5,406 \times 10^{-6}$
Tramo 4	$1,67 \times 10^{-5}$	0,0015	0,02	1,2	$1,298 \times 10^{-5}$
<b>Todo el tramo</b>	$1,67 \times 10^{-5}$	0,0015	0,02	2,7	$2,920 \times 10^{-5}$

**7.1.2 Cálculo de pérdidas en accesorios.** Se determinan mediante la ecuación:

$$h_A = \frac{kv^2}{2g} = \frac{8kQ^2}{D^4 g \pi^2} \quad (21)$$

Donde:

$h_A$  : Pérdida de carga en accesorios (m).

$k$  : Coeficiente de resistencia (adimensional).

$v$  : Velocidad del fluido (m/s).

$Q$  : Caudal (m<sup>3</sup>/s).

$D$  : Diámetro de la tubería (m).

$g$  : Aceleración de la gravedad. (m/s<sup>2</sup>).

$$h_A = \frac{8 * 50 * 0,0015 * (1,67 \times 10^{-5})^2}{0,02^4 * 9,8 * 3,1416^2} = 1,082 \times 10^{-5} [m] \quad (22)$$

El factor “k” es adimensional y depende de cada accesorio, de su material y la dimensión de su diámetro, se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula u accesorio.

**7.1.3 Curva de funcionamiento del sistema.** Es la respuesta de la cabeza del sistema de flujo al variar el flujo volumétrico, calculado a través de un balance de energía mecánica. Los datos de la bomba están dados según la siguiente tabla:

Tabla 25. Datos de la bomba

 Kit de reposição Kit de repuesto	 Veículo Vehículo	 Data de aplicação Fecha de aplicación	 Nº Marval (kit)	 Nº fabricante	 Nº original	 Bomba elétrica Bomba eléctrica	 Pré-filtro Prefiltro
<b>F 000 TE1 187</b> 1,0 bar    300 l/h							
	GM	Blazer / S10 2.2 EFi	03.95 → 10.98		93 281 846/ 93 256 738	0 580 453 483	F 000 TE9 005 <sup>(2)</sup>
	Fiat	Tipo 1.6 i.e.	03.93 → 10.95	MAM00053	7782390		

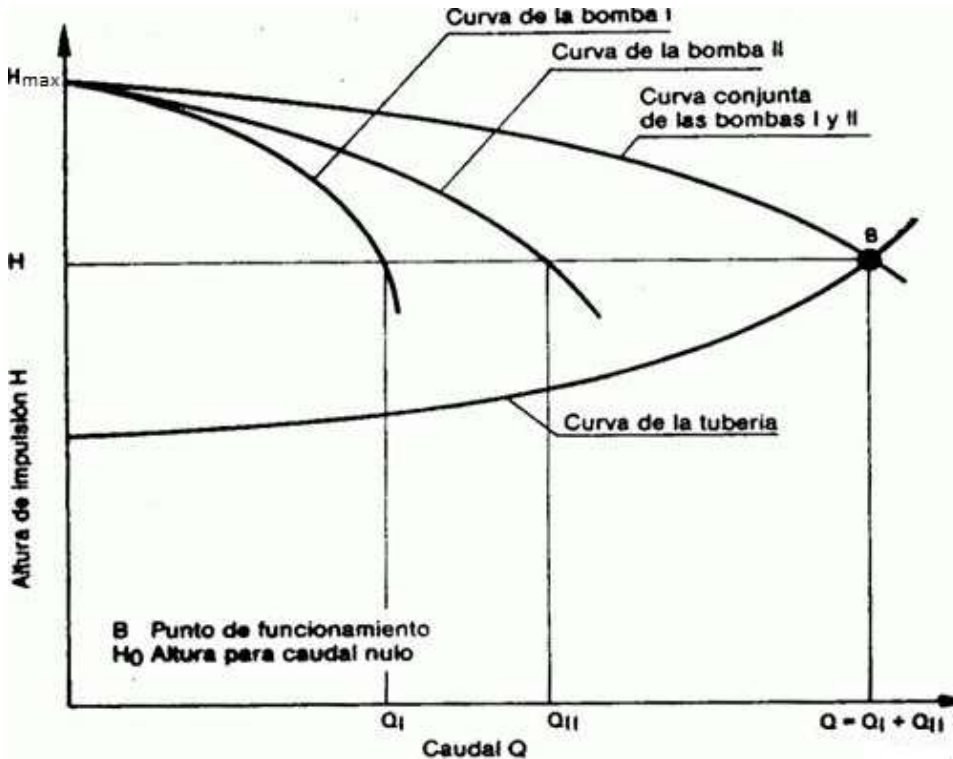
Fuente: Catalogo de bombas de combustible BOSCH.

Y resolviendo la siguiente ecuación:

$$H = H_D - H_s + \frac{P_D - P_s}{\gamma} + h_l + h_A = 2 + 2.920 \times 10^{-5} + 1.082 \times 10^{-5} \approx 2[m] \quad (23)$$

Representamos la curva:

Ilustración 28. Curva del sistema



Donde

$H_{max}$ : Máxima cabeza de la bomba (dado en el catálogo) = 10,19[m]

$H$ : Altura o cabeza del sistema = 2[m]

$Q_I$  y  $Q_{II}$ : Caudal óptimo de cada bomba= 5 LPM

$Q$ : Caudal total del sistema= 10LPM

**7.1.4 Determinación de la eficiencia de la bomba.** En caso de no contar con las curvas características de la bomba, se puede determinar la eficiencia cuantificando por la siguiente ecuación;

$$\eta_{bomba}(\%) = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Potencia demandada por la bomba (medida)}} \quad (24)$$

Y la ecuación que define la potencia hidráulica:

$$\text{Potencia hidráulica (W)} = \rho g Q H_{Total} \quad (25)$$

Donde:

$\rho$  : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

$g$  : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$Q$  : Caudal (m<sup>3</sup>/s).

$H_{Total}$  : Carga total (m).

La ecuación de eficiencia quedaría de la forma:

$$\eta_{bomba}(\%) = \frac{\rho g Q H_{Total}}{\text{Potencia demandada por la bomba (medida en Watt)}} \quad (26)$$

Para este caso:

$\rho$ : 1000 (kg/m<sup>3</sup>).

$g$ : 9,8(m/s<sup>2</sup>).

$Q: 0.000027777778 \text{ (m}^3\text{/s)}$ .

$H_{Total}: 2,50 \text{ (m)}$ .

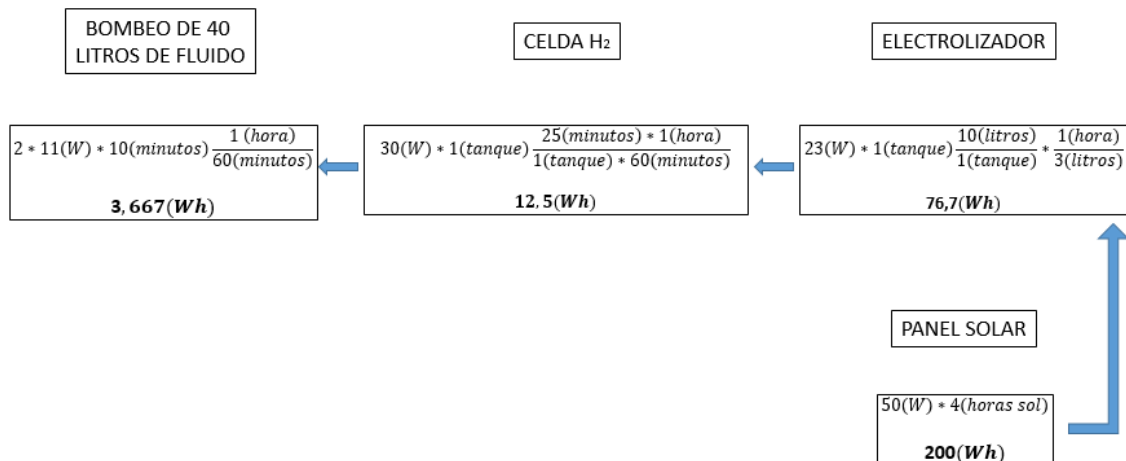
Potencia demanda por la bomba = 11 (W).

$$\eta_{bomba}(\%) = \frac{1000 * 9,8 * 0,000027777778 * 2,50}{11} = 0,6063 \quad (27)$$

Con esto se puede definir la demanda de potencia que pide el sistema y cual nos entrega.

## 7.2 SUBSISTEMA DE POTENCIA PARA LA BOMBA

*Ilustración 29. Esquema energético del sistema*



De acuerdo con las especificaciones consignadas en los objetivos, la energía requerida para la bomba debe ser producida por una celda de combustible alimentada por hidrógeno. La selección de esta celda se basó en una búsqueda en el mercado de una celda que cumpliera con los requerimientos mínimos que demanda la bomba de 3,7 Watt-hora y 22 Watt. Los cuales están analizados en la tabla 26.

Ilustración 30. Catálogo de la celda Horizon Fuel Cell

**H-20 PEM FUEL CELL 20W FCS-B20** ORDER ONE NOW INSTALLATION MANUAL

Semi-integrated 20W fuel cell system

**Includes:**

- Inlet/outlet electronic valve
- Control electronics
- Integrated fan and casing
- Low pressure protection
- 20W stack with blower



Number of cells..... 13

Rated power..... 20W

Rated Performance..... 7.8V@2.6A

Purging valve voltage..... 6V

Blower voltage..... 5V

Reactants..... Hydrogen and Air

Ambient temperature..... 5-30°C (41-86°F)

Max stack temperature..... 55°C (131°F)

Hydrogen pressure..... 0.45-0.55 Bar

Humidification..... Self-humidified

Cooling..... Air (integrated cooling fan)

Stack Weight (with fan & casing)..... 275g (± 30g)

Controller weight..... 90g

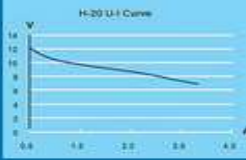
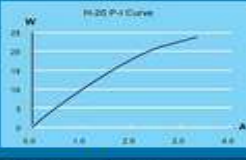
Stack Size..... 75 x 47 x 70mm (3 x 1.8 x 2.8 in)

Flow rate at max output..... 0.25L/min

Hydrogen purity..... ≥ 99.995% dry H<sub>2</sub>

Start up time..... ≤ 30s(ambient temperature)

Efficiency of system..... 40% at full power


---

**H-30 PEM FUEL CELL 30W FCS-B30** ORDER ONE NOW INSTALLATION MANUAL

Semi-integrated 30W fuel cell system

**Includes:**

- Inlet/outlet electronic valve
- Control electronics
- Integrated fan and casing
- Low pressure protection
- 30W stack with blower



Number of cells..... 14

Rated power..... 30W

Rated Performance..... 8.4V@3.5A

Purging valve voltage..... 6V

Blower voltage..... 6V

Reactants..... Hydrogen and Air

Ambient temperature..... 5-30°C (41-86°F)

Max stack temperature..... 55°C (131°F)

Hydrogen pressure..... 0.45-0.55 Bar

Humidification..... Self-humidified

Cooling..... Air (integrated cooling fan)

Stack Weight (with fan & casing)..... 280g (± 30g)

Controller weight..... 90g

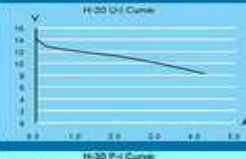
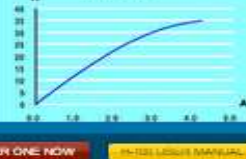
Stack Size..... 80 x 47 x 75mm (3.1 x 1.8 x 3 in)

Flow rate at max output..... 0.42L/min

Hydrogen purity..... ≥ 99.995% dry H<sub>2</sub>

Start up time..... ≤ 30s(ambient temperature)

Efficiency of system..... 40% at full power


---

**H-100 PEM FUEL CELL 100W FCS-C100** ORDER ONE NOW INSTALLATION MANUAL

Semi-integrated 100W fuel cell system

**Includes:**

- Connections/Tubing
- Electronic valves
- Electronic control box
- 100W stack with blower
- Fuel cell ON/OFF switch
- SOU ON/OFF switch



Number of cells..... 20

Rated power..... 100W

Rated Performance..... 12V@8.3A

Hydrogen supply valve voltage..... 12V

Purging valve voltage..... 12V

Blower voltage..... 12V

Reactants..... Hydrogen and Air

Ambient temperature..... 5-30°C (41-86°F)

Max stack temperature..... 65°C (145°F)

Hydrogen pressure..... 0.45-0.55 Bar

Humidification..... Self-humidified

Cooling..... Air (integrated cooling fan)

Stack Weight (with fan & casing)..... 1250g (± 30g)

Controller weight..... 400g

Stack Size..... 118 x 104 x 94mm (4.6 x 4.1 x 3.7 in)

Flow rate at max output..... 1.3L/min

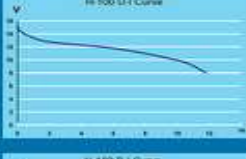

Hydrogen purity..... ≥ 99.995% dry H<sub>2</sub>

Start up time..... ≤ 30s(ambient temperature)

Efficiency of system..... 40% at 12V

Low voltage protection..... 10V

Over current protection..... 12A

Fuente: [www.horizonfuelcell.com](http://www.horizonfuelcell.com).

Tabla 26. Cuadro comparativo de las celdas que se encuentran en el proyecto

	Voltaje [Volt]	Potencia [Watt]	Energía por ciclo [Watt-hora]	Tipo de corriente
<b>Requerimientos de la bomba</b>	9	22	3,7	Continua
H-20 PEMFC	7,8	20	8,3	Continua
<b>H-30 PEMFC</b>	<b>9</b>	<b>30</b>	<b>12,5</b>	<b>Continua</b>
H-100 PEMFC	12	100	41,7	Continua

**7.2.1 Componentes de la celda.** La celda que seleccionada para este proyecto es una celda de tecnología PEMFC (Celda de combustible de intercambio electrónico) importada de China por la empresa HORIZON FUELL CELL, con capacidad de 30W de potencia y un voltaje de trabajo de 12V. Este sistema va conectado directamente al sistema de bombeo y es alimentado por hidrogeno al 99,994% de pureza.

Ilustración 31 Celda de combustible Horizon Fuell Cell de 30W



La celda de combustible viene provista de un sistema de componentes para proporcionar un mejor uso y seguridad los cuales son:

1. Controlador de la válvula de purga y de voltaje para evitar el corto circuito.
2. Válvula de purga para el control de la salida de vapor de agua de la celda y exceso de Hidrógeno en el sistema.
3. Tubos de silicona para el suministro del Hidrógeno desde el almacenamiento hacia la celda evitando así, micro fugas ya que el hidrógeno al ser más liviano y diminuto que el oxígeno pudiese escapar de mangueras comunes para uso de aire.
4. Tanques de almacenamiento HYDROSTICK PRO.

*Ilustración 32. Controlador.*



*Ilustración 33. Válvula de purga*



*Ilustración 34. Tubos de silicona*



*Tabla 27. Especificaciones Técnicas de la celda fabricada por Horizon Fuel Cell.*

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	14
Rated Power	30W
Performance	8.4V @ 3.6A
Purging valve voltage	6V
Blower voltage	5V
Reactants	Hydrogen and Air
External temperature	5 to 30°C
Max stack temperature	55°C
H2 Pressure	0.45-0.55bar
Hydrogen purity	≧99.995% dry H2
Humidification	self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Weight (with fan & casing)	280grams(±30 grams)
Controller	90 grams(±10 grams)
Dimension	8cmX4.7cmX7.5cm
Flow rate at max output*	0.42 L/min
Start up time	≧30S at ambient temperature
Efficiency of stack	40% @ at full power

\* The flow rate may change with the power output.

\*\* The Specification is subject to change without notice.

Fuente: <http://www.horizonfuelcell.com/>

### 7.3 SUBSISTEMA DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO

Aunque se requiere solo 3,7 W-h para un ciclo de transporte de agua desde el tanque de almacenamiento inferior al superior, la celda de combustible H-30 es capaz de producir 12,5 W-h alimentada con 10 litros de hidrógeno al 99,996% de pureza.

Estos 10 litros de hidrógeno se almacenan en unos tanques llamados HYDROSTICK PRO compuestos por Hidruros Metálicos y con un peso aproximado de 105 g cada uno, son comercializados por la empresa Horizon Fuel Cell technologies.

*Ilustración 35. Alimentación de hidrógeno a la celda.*



Y los constituyen las siguientes características descritas en la siguiente tabla:

Tabla 28. Especificaciones técnicas de Hydrostick-Pro

<b>Name</b>	HYDROSTIK PRO
<b>Model number</b>	LWH22-10L-5
<b>Capacity</b>	10 L hydrogen
<b>Hydrogen purity</b>	$\geq 99.995\%$
<b>Cartridge size</b>	$\varnothing 22 \times 88 \text{mm}$
<b>Weight</b>	Approx. 105g
<b>Storage material</b>	AB5 metal hydride
<b>Rated charging pressure</b>	3.0MPa
<b>Working temperature</b>	0-55°C (0-131°F)
<b>Service life</b>	10 years

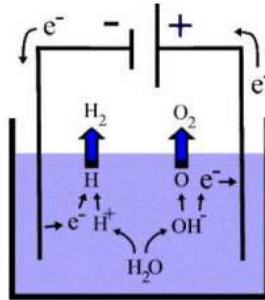
Fuente: <http://www.horizonfuelcell.com/>

La producción de los 10 litros de hidrógeno como se dijo en el capítulo anterior (4.1.3), se realiza mediante un proceso de electrolisis utilizando tecnología PEM, y un electrolizador comercial llamado Hydrofill-Pro, con un consumo aproximado de 20 ml/hora de agua, que genera 3 Litros/hora de hidrógeno con 99,99% de pureza. La selección de este electrolizador en específico se apoyó en el hecho de la compatibilidad de conexión con la celda de combustible y los tanques de almacenamiento son fabricados por la misma empresa.

El electrolizador HYDROFILL-PRO consume una potencia eléctrica de 23W y produce los 10 litros de hidrógeno en 3 horas y 20 minutos aproximadamente, es decir, consume en promedio 77 W-h. Este tiempo de producción es cercano a las horas Sol en Bucaramanga que mediante un panel solar le suministramos energía eléctrica al electrolizador. Estos 10 litros de Hidrógeno que se producen y se

transforman en 12,5 W-h en la celda de combustible y se pueden usar las veces que se requiera sin el problema de autodescarga que sufren las baterías convencionales.

*Ilustración 36. Esquema del proceso electrolizador*



Fuente: National Research European Council.

*Ilustración 37. Hydrofill-Pro (electrolizador para generar hidrógeno)*



Tabla 29. Especificaciones de Hydrofill-Pro

Stack type	Proton exchange membrane electrolysis cell
Dimensions (W x D x H)	145 x 153 x 208 mm (5.7 x 6 x 8.2 in)
Weight	1.8Kg ±5% (3.97Lbs ±5%)
Rated power	≤23W
Input voltage	DC: 10V-19V
Water input	De-ionized or distilled water
Water temperature	10-40°C (50-104°F)
Water consumption	Approx. 20ml/hr (1.2in <sup>3</sup> /hr)
Hydrogen output pressure	0-3.0 MPaG (0-435.11 PSI)
Hydrogen generation capacity	Up to 3L/hr (0-183 in <sup>3</sup> /hr)
Purity	99.99%
Compatible cartridge	HYDROSTIK and HYDROSTIK PRO
Refilling time for one cartridge	Around 4 hours (at 25C ambient temperature)

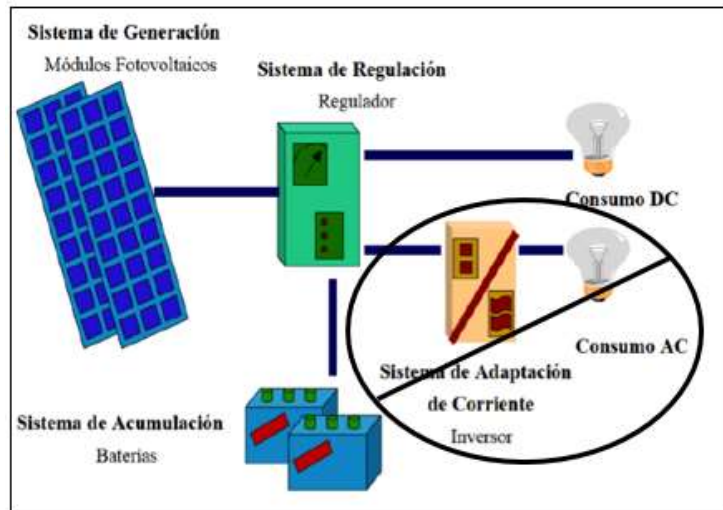
Fuente: <http://www.horizonfuelcell.com/>

#### 7.4 SUBSISTEMA DE POTENCIA PARA LA PRODUCCIÓN DEL HIDROGENO POR ELECTROLISIS

Este sistema está basado en la captación de los rayos solares por los paneles solares para la entrega de potencia que requiere el electrolizador para poder generar hidrógeno.

Igualar la demanda de energía es difícil con energías que dependen del ambiente y se producen interrumpidamente como las energías eólicas y solares. Pero si estas fuentes se usan para producir hidrógeno, entonces podrían ser usadas totalmente cuando estén disponibles. A grandes rasgos, no importa cuándo entren o salgan de disponibilidad: el hidrógeno simplemente se almacena y es usado cuando se requiera.

Ilustración 38. Esquema básico instalación fotovoltaica instalada



Fuente: modificada por autores.

**7.4.1 Cálculos para la selección de los paneles solares.** Antes de cualquier tipo de cálculos se debe entender muy bien un concepto fundamental, se trata el de “Horas de Sol Pico” o HPS [horas]. Las Horas de Sol Pico define el número de horas que disponen los usuarios de una hipotética irradiancia solar constante de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Es decir, una hora de sol pico “HPS” equivale a  $1\text{ kWh}/\text{m}^2$ . Algo más sencillo de decir, es un modo de contabilizar la energía recibida del sol agrupándola en paquetes, cada “paquete” de 1 hora recibe  $1000\text{ watts}/\text{m}^2$ .

Con estos dos conceptos tenemos;

**Irradiancia:** Es la magnitud que describe la radiación o intensidad de iluminación solar que llega a la superficie de la tierra medida como una potencia instantánea por unidad de superficie,  $\text{W}/\text{m}^2$  o unidades equivalentes.

**Irradiación:** Es la cantidad de irradiancia recibida en un lapso de tiempo determinado, es decir, la potencia recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie, se suele medir en Wh/m<sup>2</sup> o, en caso de un día, en Wh/m<sup>2</sup>/día, o unidades equivalentes.

Para calcular el valor de las horas de sol pico HPS se debe dividir el valor de la irradiación incidente entre el valor de la potencia de irradiancia en condiciones estándar de medida, pues en esas condiciones se cumple las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos. Ese valor de irradiancia en condiciones estándar es de 1000 watts/m<sup>2</sup>. Es decir, si se dispone de los datos de irradiación solar en un determinado día y se divide entre 1000, se obtienen las HPS. Por ejemplo, si hay una irradiación de 4500 Wh/m<sup>2</sup>, con lo que obtenemos 4,5 HPS.

Después de tener muy bien definidos estos conceptos, se realiza la estimación del consumo, donde es fundamental recolectar los datos de interés del consumidor lo más realistas posible y evitar así desviaciones de dimensionamiento. En el caso de uso constante de todos los días del año, hay que escoger el valor medio de todo el año.

*Tabla 30. Consumo del electrolizador para todo el año*

Unidades	Carga	Potencia unitaria (Watt)	Horas de funcionamiento al día (Horas)	Total de energía necesaria (Wh)	Total de energía necesaria (Wh)*factor de seguridad 20%
1	Electrolizador (DC)	23	3,33	76,7	92,04

Con los datos de la tabla de consumo se obtiene el consumo medio diario de la instalación al que se le ha aplicado al 20% como margen de seguridad recomendado<sup>5</sup>. Igualmente, se debe tener en cuenta que en la instalación habrá pérdidas por rendimientos de la batería y aunque no es el caso al manejar corriente continua el inversor y esto influye en la energía necesaria final. Generalmente, para un buen dimensionamiento, se toma un rendimiento de la batería del 95% y de los conductores un 100%.

Para el cálculo de los consumos medios diarios ( $L_{md}$ ) se considera la siguiente ecuación;

$$L_{md} = \frac{L_{md,DC} + \frac{L_{md,AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} * \eta_{cond}} = \frac{92,04 + \frac{N.E}{N.E}}{0,9 * 1} = 102,26 \frac{Wh}{día} \quad (28)$$

El consumo diario es ligeramente superior al nominal, se toman las pérdidas que se pueden producir en algunos de los elementos de la instalación fotovoltaica, más e margen de seguridad del 20%.

Se calcula el consumo total anual (LT) y medio anual ( $L_{ma}$ ).

$$LT = L_{md} * 365 \text{ días} = 37\,324,9 \frac{Wh}{año} \quad (29)$$

---

<sup>5</sup> Hontoria García, Leocadio (2012). Sistemas Fotovoltaicos Autónomos: CIEMAT. Coruña; España.

$$L_{ma} = \frac{LT}{365} = 102,26 \frac{Wh}{día} \quad (30)$$

En este caso coincide con el medio diario, pues el consumo que se ha estimado es constante todo el año, no sucedería si hubiese variaciones de consumos estacionales.

Una vez calculado el consumo, se calcula la irradiancia sobre una superficie plana inclinada ubicada sobre la superficie terrestre, se determina la energía que se adquiere del sol dependiendo de la localización geográfica. La irradiancia sobre una superficie inclinada se halla por medio de las siguientes ecuaciones<sup>6</sup>:

$$q_{s\beta} = H_b * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho_r * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (31)$$

O también

$$q_{s\beta} = I * \cos(\theta) + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho_r * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (32)$$

Donde la irradiancia es función de varios factores a determinar

---

<sup>6</sup> C. Rus, F.J. Muñoz, L. Hontoria et al. Instalaciones Fotovoltaicas (Cap. 2. Radiación Solar)

**Radiación directa ( $H_b$ ):** Es la radiación solar que llega a la superficie terrestre desde el ángulo sólido subtendido por el disco solar, sin haber pasado por difusión o reflexión a su paso por la atmósfera. El flujo de radiación directa depende de la constante solar, ángulo de incidencia de la radiación solar, y la transparencia atmosférica, es:

$$H_b = I * \cos \theta_z \quad (33)$$

Donde  $I$  representa la intensidad de radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

$$I = -520 + 1800K_T \quad \text{si } 0,85 > K_T \geq 0,30$$

$$I = 0 \quad \text{si } 0,30 > K_T$$

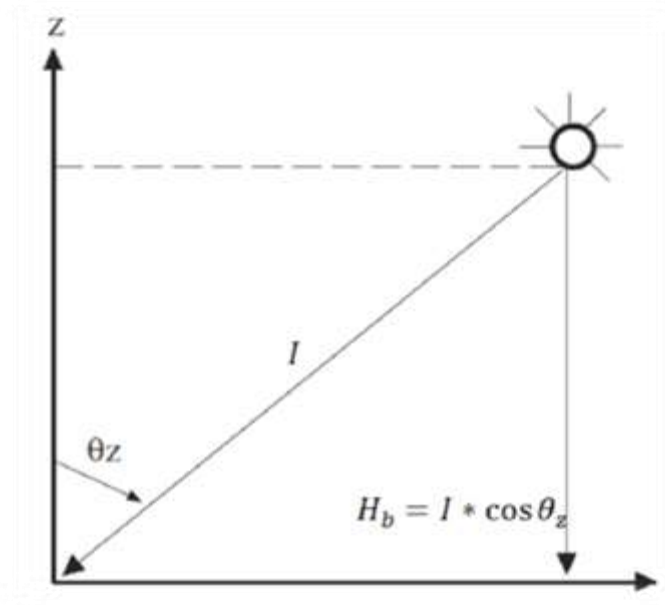
$K_T$  es el índice de claridad o constante de claridad que indica la transparencia de la atmósfera, dicha constante se define como la relación entre la radiación media en la superficie terrestre y la radiación terrestre

$$K_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (34)$$

En donde:

$$\bar{H}_0 = \frac{24}{\pi} * 1353 \left( 1 + 0,034 * \cos \frac{360n}{365} \right) \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega + \frac{\pi \omega}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (35)$$

Ilustración 39. Radiación directa.



Fuente: Modificada por los autores.

**Radiación difusa ( $H_d$ ):** Es la radiación solar distorsionada que llega a la superficie terrestre debido a partículas presentes en la atmósfera, dicha radiación difusa incide en todas las direcciones. El flujo de radiación difusa depende de la altura del sol sobre el horizonte, la cantidad de partículas componentes de la atmósfera, la presencia de capa de nubes, y la altura de la superficie sobre el nivel del mar.

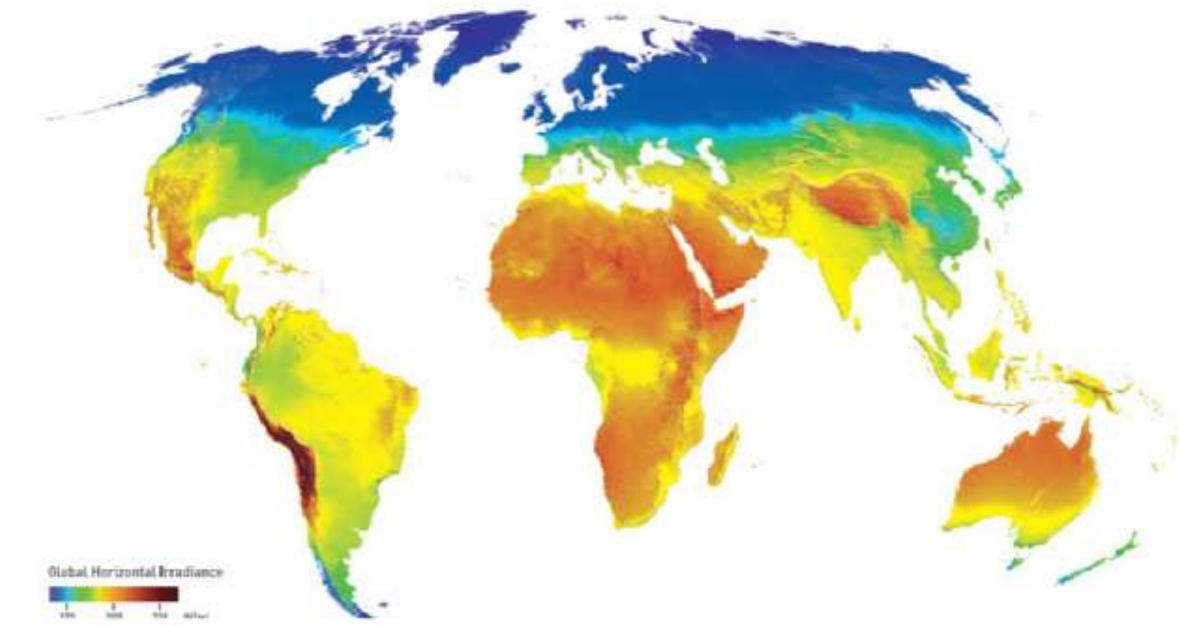
**Radiación total ( $H$ ):** Es el resultado de la componente vertical de la radiación directa con la radiación difusa. La evaluación de la radiación total se efectúa por el

flujo de energía por unidad de área y tiempo sobre una superficie horizontal expuesta al sol y sin ningún tipo de sombra.

$$H = H_b + H_d \quad (36)$$

La radiación total también se puede encontrar en los mapas de radiación solar hecho por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambiental y Unidad de Planeación Minero Energético (IDEAM y UPME). En Colombia, por su posición cerca de la línea de Ecuador, se obtiene cierta ventaja en el potencial solar, aunque puede verse afectado por ciertas condiciones climáticas variadas.

*Ilustración 40. Irradiación solar promedio mundial*



Fuente: [www.3tier.com/en/](http://www.3tier.com/en/).

## 7.5 DEFINICIONES

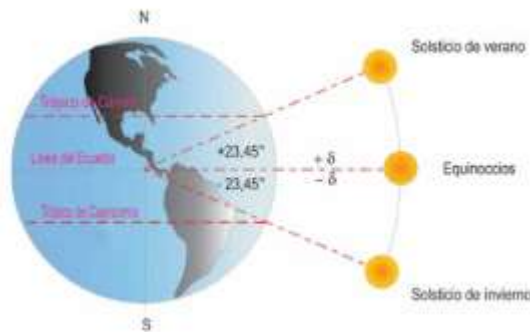
**Angulo de declinación ( $\delta$ ):** Es la posición angular del sol, al medio día solar, con respecto al plano de Ecuador. Este ángulo varía en todo su recorrido desde  $-23,5^\circ$  (21 de Diciembre) a  $23,5^\circ$  (21 de Junio).

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) \quad (37)$$

Donde n representa el día del año (n=1 para el primero de Enero).

Debido a que el ángulo de declinación varía conforme la tierra realiza su movimiento de traslación, un observador localizado en la tierra observará que la dirección de los rayos solares varía durante todo el año.

*Ilustración 41. Esquema del cambio de declinación con movimiento del Sol respecto al plano del Ecuador*

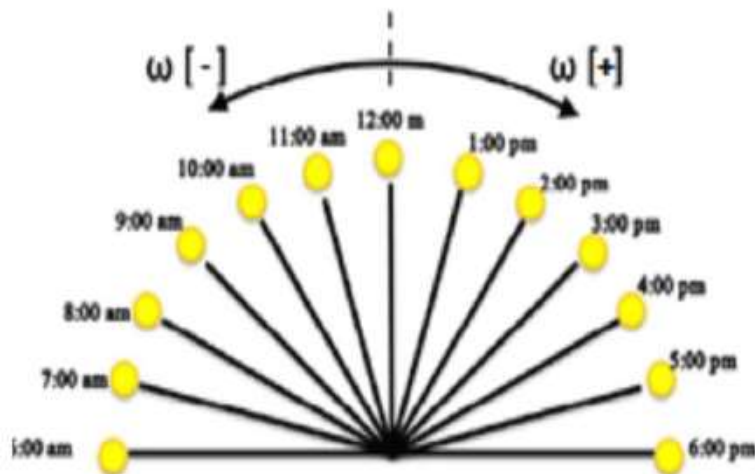


Fuente: Atlas de radiación Solar de Colombia

**Angulo de inclinación horaria ( $\omega$ ):** Este ángulo depende de la rotación terrestre y mide el desplazamiento angular del sol respecto al medio día solar, tomando valores negativos en las horas de la mañana y valores positivos en las horas de la tarde. Una hora solar equivale a  $15^\circ$  ( $360/24$  horas).

$$\omega = 15 * \left[ \left( hora + \frac{min}{60} + \frac{seg}{3600} \right) - 12 \right] \quad (38)$$

*Ilustración 42. Angulo de inclinación horaria*



Fuente: Modificada por autores.

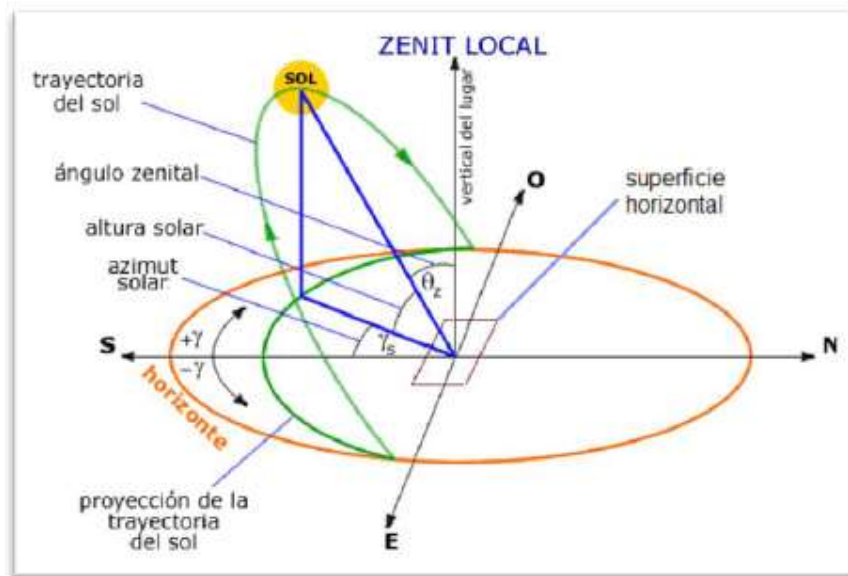
**Latitud terrestre ( $\varphi$ ):** Es el ángulo entre la línea ecuatorial, y un punto determinado de la tierra medido a lo largo del meridiano en el que se encuentre dicho punto. La latitud puede estar orientada hacia el sur o hacia el norte según si está por encima de la línea de Ecuador (latitud norte) o si se encuentra por debajo (latitud sur). La latitud en grados sexagesimales, de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ .

**Angulo de inclinación superficial ( $\beta$ ):** Es el ángulo formado entre la superficie horizontal y la superficie colectora.

**Azimut de la pared ( $\gamma_p$ ):** Es el ángulo formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la normal de la superficie colectora. Se toma como positivo desde el sur hacia el oeste y como negativo desde el sur hacia el este.

**Azimut solar ( $\gamma_s$ ):** Es el ángulo formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la dirección radial solar.

*Ilustración 43. Ángulos del sol con respecto a una superficie horizontal*



Fuente: Modificada por autores.

**Calculo del ángulo de incidencia  $\theta$  de la radiación solar para una superficie inclinada orientada hacia el sur:** El ángulo de incidencia de la radiación solar en la que está formada entre la normal al plano de la superficie y la dirección de la radiación solar. Dicho ángulo se puede tomar como referencia al eje vertical (zenit) y se conoce con el nombre de ángulo cenital ( $\theta_z$ ).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (39)$$

Una vez hallado la energía brindada por el sol, se elabora una tabla de radiaciones (Wh/m<sup>2</sup>/día) en diferentes ángulos de inclinación de la superficie captadora

*Tabla 31. Radiaciones (Wh/m<sup>2</sup>/día) según las inclinaciones a estudio*

<b>Mes</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>
<b>Enero</b>	3,240	3,240	3,400	3,480
<b>Febrero</b>	3,630	3,830	3,930	3,940
<b>Marzo</b>	4,860	4,960	4,940	4,800
<b>Abril</b>	5,250	5,160	4,950	4,630
<b>Mayo</b>	5,680	5,430	5,070	4,600
<b>Junio</b>	6,120	5,770	5,300	4,730
<b>Julio</b>	6,320	5,990	5,540	4,960
<b>Agosto</b>	5,990	5,830	5,530	5,100

Tabla 31. Continuación

<b>Septiembre</b>	5,360	5,410	5,320	5,100
<b>Octubre</b>	4,200	4,390	4,460	4,420
<b>Noviembre</b>	3,100	3,330	3,470	3,530
<b>Diciembre</b>	<b>2,780</b>	<b>3,040</b>	<b>3,220</b>	<b>3,320</b>

Se calcula la inclinación óptima para la instalación; para ello aplicamos el criterio del mes crítico, así pues, se ha de preparar a partir de la tabla de radiaciones, la “Tabla de cocientes” consumo/Radiación que se muestra a continuación.

Tabla 32. Tabla de cocientes consumo/Radiación

<b>Mes</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>
<b>Enero</b>	850,31	850,31	810,29	791,67
<b>Febrero</b>	758,95	719,32	701,02	699,24
<b>Marzo</b>	566,87	555,44	557,69	573,96
<b>Abril</b>	524,76	533,91	556,57	595,03
<b>Mayo</b>	485,04	507,37	543,39	598,91
<b>Junio</b>	450,16	477,47	519,81	582,45
<b>Julio</b>	435,92	459,93	497,29	555,44
<b>Agosto</b>	459,93	472,56	498,19	540,20

Tabla 32. Continuación

<b>Septiembre</b>	513,99	509,24	517,86	540,20
<b>Octubre</b>	655,95	627,56	617,71	623,30
<b>Noviembre</b>	888,71	827,33	793,95	780,45
<b>Diciembre</b>	<b>991,01</b>	<b>906,25</b>	<b>855,59</b>	<b>865,59</b>

Con el criterio del mes crítico se definen las horas de sol pico críticas y poder establecer el número de paneles que requerimos.

$$N_{panel} = \frac{L_{mdcrit}}{P_{MPP} * HPS_{crit} * PR} = \frac{102,26}{60 * 3,32 * 0,90} = 0,571 = 1 \text{ panel solar} \quad (40)$$

## **8 ESTUDIO FINANCIERO PARA DESARROLLAR UN PROYECTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOSTENIBLE CON HIDRÓGENO EN ZONAS RURALES**

Antes de introducir datos y cuadros comparativos se definen ciertos conceptos:

### **8.1 MATEMÁTICAS FINANCIERAS**

Es el conjunto de herramientas matemáticas con las cuales se puede analizar cuantitativamente la viabilidad o factibilidad económica de proyectos a desarrollar.

### **8.2 EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN**

Es un proceso mediante el cual se elabora un análisis para buscar las ventajas y desventajas, asignando recursos a una iniciativa que surge como una solución o una necesidad. A partir de los resultados se decide la ejecución y operación del proyecto; mediante un análisis que se anticipe al futuro, se pueden evitar posibles inconvenientes a largo plazo. La evaluación nos determina qué recursos usar y de qué forma se ejecute eficientemente.

### **8.3 FACTIBILIDAD FINANCIERA**

En la factibilidad financiera de un proyecto de inversión se evalúa el retorno del dinero, se determina si la inversión efectuada obtiene la rentabilidad esperada.

## **8.4 RENTABILIDAD**

La rentabilidad es el rendimiento o beneficio obtenido, que en un periodo de tiempo produce el capital invertido.

## **8.5 CRITERIOS EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS**

Ahora se hará mención de los principales criterios que se tienen en cuenta a la hora de evaluar un proyecto:

**8.5.1 Ingreso de los proyectos.** Es el ahorro en dinero o el capital que se recibe en el futuro una vez culminado el proyecto.

**8.5.2 Inversión en el proyecto.** Son los recursos que inicialmente se depositan en el proyecto, los cuales se espera la obtención de dicha inversión más un extra de ganancias.

**8.5.3 Gastos de operación de proyecto.** Son los desembolsos a realizar para que la inversión del proyecto se convierta en los ingresos del proyecto. Un proyecto se mantiene en equilibrio cuando los ingresos igualan a los egresos.

La finalidad de un buen proyecto es recuperar los gastos operacionales y la inversión, conjuntamente obtener una buena rentabilidad. Para cuantificar la viabilidad y de que se va por buen camino tenemos una herramienta que son el Valor Presente Neto (VPN).

## **8.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RESPECTO AL SERVICIO PÚBLICO QUE OFRECE LA COMPAÑÍA ESSA**

El análisis comparativo del uso del hidrógeno como fuente de energía eléctrica en producciones de 30 y 5000 Watt respecto al servicio público se realiza comparando la utilidad del VPN.

Para hallar la utilidad, se procede a calcular el valor presente neto en estas situaciones:

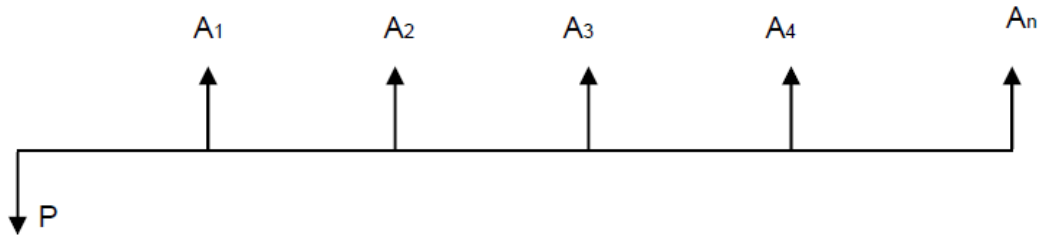
- Sistema de generación de 30 Watt a partir del hidrógeno.
- Sistema de generación de 5000 Watt a partir de hidrógeno.
- Sistema de generación de electricidad por servicios públicos para 30 y 5000 Watt (Sistemas de hidrógeno totalmente fuera de servicio).

## **8.7 AHORRO DE DINERO ESPERADO**

El VPN es una cifra monetaria que resulta de comparar el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos. Se requiere entonces estimar los flujos netos de efectivo (A), la inversión inicial para arrancar el proyecto (P), y, conociendo la tasa de interés (i) planteamos la ecuación de la siguiente manera.

$$VPN(i) = -P + \frac{A_1}{(1+i)^1} + \frac{A_2}{(1+i)^2} + \frac{A_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{A_n}{(1+i)^n} \quad (41)$$

*Ilustración 44. Representación Gráfica del VPN*



**8.7.1 Cálculo del VPN Sistema de generación de 30 Watt a partir del hidrógeno.** En el capítulo anterior se hicieron los cálculos para bombeo del prototipo, en el cual, la celda generaba una potencia requerida de 0,0125 kWh/día, lo que sería 4,5625 kWh/año que se usaría de energía renovable. Según los recibos proporcionados por la empresa ESSA el precio del kWh (\$/kWh) es de 419,30 pesos Colombianos (COP). Por lo tanto, la energía del hidrógeno estaría reduciendo el precio de la electricidad al año \$ 1913,52 pesos Colombianos (COP).

La celda puede entregar 30W de potencia en un lapso de 1 hora, que es el promedio que se demora en consumir el hidrógeno almacenado.

La inversión inicial que se hizo para el desarrollo del prototipo se describe a continuación en el siguiente cuadro.

Tabla 33. Costo para desarrollar primer prototipo

Elementos	Valor total
1 celda fotovoltaica de 50W	\$ 100 000
1 batería seca	\$ 50 000
1 regulador de voltaje para la celda	\$ 80 000
1 electrolizador	\$ 1 047 900
1 Celda H30	\$ 1 558 200
4 tanque de 10L	\$ 100 000
<b>Total</b>	<b>\$ 2 886 100</b>

Ilustración 45. Línea de tiempo para un Sistema de generación de 30 Watt a partir del hidrógeno



Se planteó la posibilidad de recuperación de 20 años del proyecto con un costo de mantenimiento o de posibles gastos de \$50000 cada año y una tasa de interés del (3,33<sup>10</sup>%) de acuerdo a TRADING ECONOMICS<sup>7</sup>.

La ecuación quedaría de esta forma:

$$\begin{aligned}
 VPN_{H30} = & -\frac{2\,886\,100}{1,033^1} - \frac{50\,000}{1,033^2} - \frac{50\,000}{1,033^3} - \frac{50\,000}{1,033^4} - \frac{50\,000}{1,033^5} - \frac{50\,000}{1,033^6} - \frac{50\,000}{1,033^7} \\
 & - \frac{50\,000}{1,033^8} - \frac{50\,000}{1,033^9} - \frac{50\,000}{1,033^{10}} - \frac{50\,000}{1,033^{11}} - \frac{50\,000}{1,033^{12}} - \frac{50\,000}{1,033^{13}} - \frac{50\,000}{1,033^{14}} \\
 & - \frac{50\,000}{1,033^{15}} - \frac{50\,000}{1,033^{16}} - \frac{50\,000}{1,033^{17}} - \frac{50\,000}{1,033^{18}} - \frac{50\,000}{1,033^{19}} - \frac{50\,000}{1,033^{20}} \quad (42)
 \end{aligned}$$

$VPN_{H30} = -3\,378\,434$  Pesos colombianos (COP).

**8.7.2 Estimación del costo sin la producción de energía con hidrógeno.** En los recibos de energía eléctrica existe una tarifa que registra el valor de cada kilovatio-hora que se consume, la cual es publicada por la CREG (Comisión Reguladora de Energía y Gas Resolución 108 de la Ley 142 de 1994), ente encargado de estipular y variar la tarifa de energía de acuerdo con el costo, los procesos de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía.

---

<sup>7</sup> TRADING ECONOMICS. Colombia – Tasa de inflación [online]. New York City – Lisboa. Enero 2015. Disponibilidad y acceso a la web:

<http://es.tradingeconomics.com/colombia/inflation-cpi>

ESSA se encarga de distribuir y comercializar la energía eléctrica que llega a hogares o negocios.

La tarifa la componen **7** factores:

- **G:** Costo por Generación. Valor pagado por la compra de energía.
- **T:** Costo por Transporte. Valor pagado por el uso del Sistema de Transmisión Nacional.
- **PR:** Costo por pérdidas técnicas que se dan en el proceso de Generación y Transporte (esto varía mensualmente en la medida en que varían esos dos componentes).
- **D:** Costo por Distribución de la energía que se lleva a los usuarios a través de redes eléctricas.
- **O:** Costos Adicionales. Es el valor por costos administrativos y de operación de CREG, SIC; Superintendencia, etc. También incluye las restricciones o pérdidas por hurto.
- **C:** Costo por comercialización de la energía.
- **CU:** Costo Unitario. Es el resultado de la sumatoria de todos los anteriores.

Ilustración 46. Costo total por kWh consumido en el periodo

Generación (G):	163.75
Transmisión (T):	23.90
Distribución (D):	156.97
Comercialización (Cv):	39.56
Pérdidas (PR):	31.03
Restricciones (R):	4.09
<b>CUv (\$/kWh):</b>	<b>419.30</b>
<b>Costo Total por kWh consumido en el periodo.</b>	

Costo Unitario Variable (\$/kWh)  
 $CUv = G + T + D + Cv + PR + R$

Fuente: Recibo eléctrico entregado por ESSA.

La fórmula tarifaria determina los costos que pueden ser trasladados a los usuarios finales por la prestación del servicio. La determinación de las tarifas finales aplicables a los diferentes estratos depende de la aplicación de subsidios y contribuciones definidos por la Ley de acuerdo con lo que se explica a continuación.

La Ley 142 de 1994 (Artículos 87, 89 y 99) y la Ley 143 de 1994 (Artículos 6o., 23 Literal h y 47), en desarrollo del principio de solidaridad y redistribución de ingresos ordenados por la Constitución Nacional, la ley fijó subsidios y contribuciones a la prestación del servicio de electricidad. Una vez se aplican estos subsidios y contribuciones, se obtienen las tarifas finales a aplicar a los usuarios para los diferentes estratos.

Los usuarios de los Estratos 1, 2 y 3 (usuarios de menores ingresos), reciben subsidios equivalentes al 60%, 50% y 15% sobre el Costo de Prestación del Servicio, aplicable al denominado "Consumo de Subsistencia", el cual actualmente

es de 173 kWh-Mes. Esta cifra podrá ser revisada por la Unidad de Planeamiento Minero Energético–UPME. (Ley 632 de 2001).

Los usuarios de los estratos 5 y 6 (usuarios residenciales de mayores ingresos), así como los usuarios pertenecientes a los sectores industrial y comercial, pagan una contribución del 20% sobre el costo de prestación del servicio, con destino a cubrir los subsidios otorgados a los usuarios de los estratos 1, 2 y 3.

El estrato 4, así como los servicios especiales como hospitales, clínicas, puestos y centros de salud, centros educativos y asistenciales sin ánimo de lucro, no pagan contribuciones. Los acueductos pagan contribución del 10% sobre el costo de la tarifa.

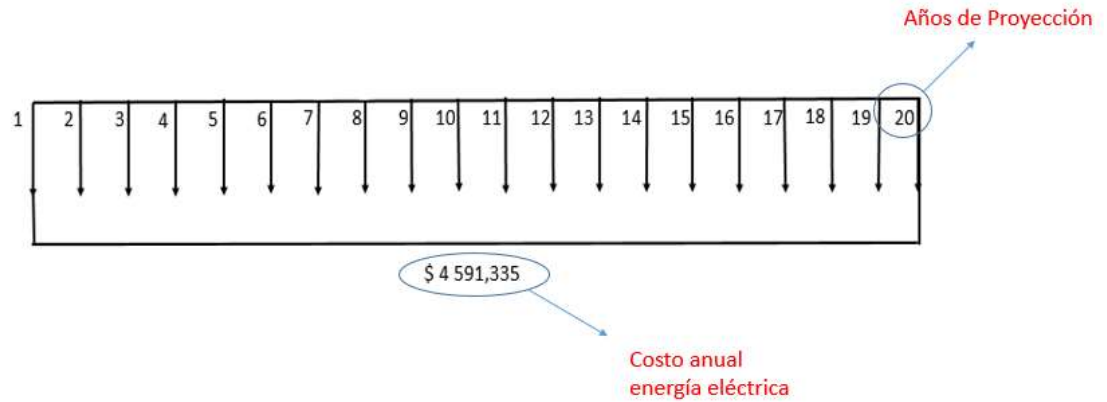
El análisis se realiza con respecto a una tarifa de estrato 4 de la siguiente forma:

$$\text{Pago Anual (\$)} = \text{Energía Producida (kWh)} * \text{Tarifa (\$/kWh)} \quad (45)$$

$$\text{\$ 4 591,335} = 10,95 \text{ (kWh)} * 419,30 \text{ (\$/kWh)}$$

El costo aproximado en la producción al año de 30W funcionando una hora diaria es de \$4 591,335.

Ilustración 47. Línea de tiempo VPN recibo eléctrico



Donde no existen costos de inversión inicial, se proyecta a una duración de 20 años y se paga anualmente la suma de \$4 591 335 pesos Colombianos.

La ecuación quedaría de esta forma:

$$\begin{aligned}
 VPN_{ESSA} = & -\frac{4\,591,335}{1,033^1} - \frac{4\,591,335}{1,033^2} - \frac{4\,591,335}{1,033^3} - \frac{4\,591,335}{1,033^4} - \frac{4\,591,335}{1,033^5} \\
 & - \frac{4\,591,335}{1,033^6} - \frac{4\,591,335}{1,033^7} - \frac{4\,591,335}{1,033^8} - \frac{4\,591,335}{1,033^9} - \frac{4\,591,335}{1,033^{10}} \\
 & - \frac{4\,591,335}{1,033^{11}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{12}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{13}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{14}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{15}} \\
 & - \frac{4\,591,335}{1,033^{16}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{17}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{18}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{19}} - \frac{4\,591,335}{1,033^{20}} \quad (44)
 \end{aligned}$$

$VPN_{ESSA} = -58230$  Pesos Colombianos (COP)

Reflejando que en 20 años solamente se ve una recuperación inferior al 2% de la inversión inicial.

**8.7.3 Calculo del VPN para un Sistema de generación de 5000 Watt a partir de hidrógeno.** Para este caso, donde el proyecto fue inspirado en la necesidad o falencia que se veía reflejado en el alto costo energético de una finca ubicada en el sector rural aledaño a Bucaramanga. El costo elevado se debía al uso constante de bombeo de agua para suministro de granjas avícolas, las cuales se verían gravemente afectadas si se cortara este suministro, se tiene como resultado una tasa de mortandad de aves alta, llevando así al fracaso de esta microempresa.

Aunque este proyecto no enfocó sus objetivos en la reducción de costos para esta granja avícola, sí se desarrolló un prototipo a escala sobre un sistema de bombeo utilizando hidrógeno como recurso de energía renovable, para poder así, analizar qué tan viable es, en la perspectiva económica y ambiental, este tipo de tecnología acá en Colombia.

La celda de hidrógeno H5000 tiene una potencia de 5 kwatt (167 veces más potente que la celda H30), y su precio llevada a pesos colombianos es aproximadamente de \$ 36 000 000 (23 veces más costosa que la celda H30). Se espera entonces que su relación precio potencia entregue una recuperación de inversión en un menor tiempo.

Ilustración 48. Celda de hidrógeno H5000



Fuente: <http://www.horizonfuelcell.com/#!/h-series-stacks/c52t>

Ilustración 49. Costo para generar 5kW de potencia trabajando 4 horas

Elementos	Valor total
Celda fotovoltaica	\$ 1 000 000
1 batería seca	\$ 200 000
1 regulador de voltaje para la celda	\$ 80 000
1 electrolizador	\$ 36 963 000
1 Celda H5000	\$ 36 000 000
tanque de almacenamiento	\$ 2 000 000
<b>Total</b>	<b>\$ 76 243 000</b>

Para producir 5 kW de potencia con una autonomía de 4 horas, se requiere una inversión inicial de \$ 76 243 000 Pesos Colombianos con un costo de mantenimiento o imprevistos de 100 000 Pesos Colombianos anuales y la misma tasa de interés. Los años de duración los vamos a plantear hasta el año donde se recupere la inversión, y la ecuación del VPN de la celda H5000 quedaría de esta forma;

$$VPN_{H5000} = -\frac{76243000}{1,033^1} - \frac{100000}{1,033^2} - \frac{100000}{1,033^3} - \frac{100000}{1,033^4} - \dots - \frac{100000}{1,033^{54}} \quad (45)$$

$$VPN_{H5000} = - \$ 76 220 000$$

El pago anual a la compañía ESSA por 7300 kWh sería:

$$\text{Pago Anual (\$)} = \text{Energía Producida (kWh)} * \text{Tarifa (\$/kWh)} \quad (46)$$

$$\$ 3 060 890 = 7300 \text{ (kWh)} * 419,30 \text{ (\$/kWh)}$$

La ecuación del VPN quedaría de la siguiente forma

$$VPN_{ESSA} = -\frac{3060890}{1,033^1} - \frac{3060890}{1,033^2} - \frac{3060890}{1,033^4} - \dots - \frac{3060890}{1,033^{54}} \quad (47)$$

$$VPN_{ESSA} = - \$ 76 690 000$$

En 54 años se recupera la inversión.

## 9 CONCLUSIONES

Luego que se analiza los impactos ambientales a que se ve sometido el planeta tierra en la producción convencional de energía eléctrica, se presenta un sistema que a largo plazo podrá ser competente y suplir el abastecimiento energético.

Se diseñó y construyó un modelo a escala de un sistema capaz de almacenar 40 litros de agua a una altura de 2 metros para una granja auto sostenible mediante generación autónoma de energía renovable, con finalidad netamente académica y didáctica dirigida a los estudiantes de Laboratorio de Sistemas Térmicos.

El uso de hidrógeno como vector energético presenta un reducido impacto ambiental, con respecto a las tecnologías convencionales que emplean combustibles fósiles. Estos impactos ambientales son cero emisiones que producen gases de efecto invernadero.

El uso de celdas de combustible alimentadas por hidrógeno presenta una opción de almacenamiento de energía para aplicaciones móviles, debido a su reducido peso y que no tiene el inconveniente de autodescarga.

La eficiencia total de sistema para generación y aprovechamiento de energía es del 6.25%, porcentaje muy pequeño debido a que existen varias etapas de conversión de energía.

En Colombia se encuentran varios obstáculos para la implantación de la llamada economía del hidrógeno por la inexistencia de infraestructura de producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno; al igual que legislaciones que lo regulan.

El costo elevado de los electrolizadores al igual que las celdas de combustible es un impedimento para satisfacer la demanda energética. Principalmente porque los materiales de los que están compuestos son caros y su producción es a bajo volumen. En la medida que los problemas de manufactura sean solucionados, bajen los costos de los materiales y también las tolerancias de precisión, se deberá esperar una baja muy considerable en los costos.

## BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ PLATA, Jezir y SIACHOQUE ALARCÓN, Luis Esteban. Celdas de Combustible: Determinación del Tipo Apropriado Para la Generación Eléctrica Utilizando Gas Natural Como Combustible. Trabajo de grado Ingeniero Eléctricista. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2011.

BACA, Guillermo. Ingeniería económica. 8ed. Bogotá, D.C.: Fondo Educativo Panamericano, 2001.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA: UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. Demanda de energía en Colombia [en línea] [Bogotá: Colombia] Ministerio de Minas y Energía: UPME, Octubre 2010. [Citado: 4 Agosto 2015] Disponible en Internet: [http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC\\_DEMANDA\\_ENERGIA\\_OCTU\\_BRE\\_2010.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC_DEMANDA_ENERGIA_OCTU_BRE_2010.pdf)

DOMÍNGUEZ, Juan Jose. Celdas de Combustibles (I). En: Anales de Mecánica y electricidad. Marzo-Abril (2002).

DOÑAN VELAZCO, Oscar Eduardo y SERMEÑO MENA, Salvador Jose. Diseño de una Pila de Combustible de Hidrógeno Para Producir una Diferencia de Potencial de 12 Voltios. Proyecto de Grado Ingeniero Mecánico. San Salvador: Universidad don Bosco 2008.

FABRÉGA RAMOS, Marc. HIDRÓGENO Aplicación en Motores de combustión interna. Trabajo de grado de Ingeniería Técnica Naval. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña 2009.

VILLABONA, Álvaro y PÁEZ BELTRÁN, Édison. Entrenador de Celdas Fotovoltaicas. Proyecto De Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica 2004.